



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Agronòmica i del Medi Natural

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica
y del Medio Natural

ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES ANTIOXIDANTES Y
ANTIMICROBIANAS DE PRODUCTOS EN POLVO
OBTENIDOS A PARTIR DE RESIDUOS DE
CONFECCIÓN DE HORTALIZAS EN COOPERATIVA

Trabajo Fin de Grado

Grado en Biotecnología

AUTOR/A: Labrador Miguel, Patricia

Tutor/a: Seguí Gil, Lucía

Cotutor/a: Barrera Puigdollers, María Cristina

Director/a Experimental: Bas Bellver, Claudia Isabel

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

RESUMEN

El desperdicio alimentario es un problema a nivel mundial para el que se busca solución mediante la valorización de los residuos generados. En concreto, durante el procesado de frutas y hortalizas se pierden pieles, semillas, hojas externas, bagazos o partes dañadas en formas de residuos. Todos ellos cuentan con grandes cantidades de compuestos antioxidantes y bioactivos, con propiedades nutricionales a tener en cuenta para ser valorizados. La obtención de productos en polvo a partir de estos residuos es una alternativa interesante para evitar este desperdicio de nutrientes, ya que permite una valorización integral de los mismos. Los productos en polvo obtenidos a partir de frutas u hortalizas son concentrados, estables y versátiles, de modo que mantienen o incluso mejoran las propiedades el contenido en componentes antioxidantes y bioactivos del material de partida, pudiendo llegar a superarlo gracias al procesado.

En este trabajo se obtuvieron productos en polvo a partir de diferentes hortalizas provenientes de las líneas de confección de bandejas y IV gama en cooperativa: apio, brócoli, col repollo, ajo puerro y zanahoria. Los productos se obtuvieron mediante y proceso de triturado, secado por aire caliente (SAC) o liofilización (LIO, y molienda con el fin de obtener un polvo fino. Los ingredientes en polvo obtenidos se analizaron en cuanto a sus propiedades fisicoquímicas (actividad del agua, humedad, contenido en sólidos solubles y tamaño de partícula) y antioxidantes (contenido en fenoles y flavonoides totales y actividad antioxidante por los métodos de los radicales libres ABTS y DPPH); adicionalmente se realizó la identificación de compuestos fenólicos específicos mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) y se estudió su potencial antimicrobiano mediante ensayos de inhibición en placa y determinación de la concentración mínima inhibitoria (CMI) frente a distintos microorganismos (*Listeria innocua*, *S. aureus*, *Salmonella* y *E. coli*).

Los resultados del presente trabajo demostraron que fue posible obtener productos en polvo con una actividad del agua que asegura su estabilidad, y demostraron que el método de deshidratación empleado influye en las características fisicoquímicas y antioxidantes, siendo los polvos LIO más finos que los SAC por ser más fácil de moler gracias a la estructura porosa formada al sublimar el el hielo, y presentando los SAC un mayor contenido en fenoles y flavonoides totales, así como una actividad antioxidante superior, por norma general. Además, se confirmó que estos productos en polvo tienen cierta capacidad antimicrobiana en los ensayos de inhibición en placa, a pesar de que los resultados obtenidos en el ensayo de concentración mínima inhibitoria no fue el esperado.

Una vez finalizado este trabajo, se puede concluir que la valorización integral de residuos de frutas y hortaliza mediante la producción de productos en polvo es una alternativa de gran interés. Esto se debe a la gran versatilidad que ofrecen los productos en polvo, así como las mejoras en propiedades antioxidantes y nutricionales que estos pueden aportar a las formulaciones a las que se añadan. Además, si se confirma el potencial antimicrobiano que tienen podrían llegar a utilizarse como conservantes naturales.

Palabras clave: productos en polvo; hortalizas; valorización de residuos; antioxidantes; potencial antimicrobiano; frutas; hortalizas; ingredientes funcionales.

ABSTRACT

Food waste is a worldwide problem for which a solution is being sought through the valorization of the waste generated. Specifically, during the processing of fruits and vegetables, skins, seeds, outer leaves, bagasse or damaged parts are lost in the form of waste. All of them contain large amounts of antioxidant and bioactive compounds, with nutritional properties to be considered for valorization. Obtaining powdered products from these residues is an interesting alternative to avoid this waste of nutrients, since it allows an integral valorization of them. Powdered products obtained from fruits or vegetables are concentrated, stable and versatile, so that they maintain or even improve the properties of the antioxidant and bioactive components content of the starting material and can even surpass it thanks to processing.

In this work, powdered products were obtained from different vegetables from the tray packing and pre-prepared convenience food lines in the cooperative: celery, broccoli, cabbage, leek and carrot. The products were obtained by grinding, hot air drying (SAC) or freeze drying (LIO) and milling in order to obtain a fine powder. The powdered ingredients obtained were analyzed for their physicochemical properties (water activity, moisture, soluble solids content and particle size) and antioxidant properties (total phenol and flavonoid content and antioxidant activity by ABTS and DPPH free radical methods); in addition, specific phenolic compounds were identified by high-performance liquid chromatography (HPLC) and their antimicrobial potential was studied by plate inhibition assays and determination of the minimum inhibitory concentration (MIC) against different microorganisms (*Listeria innocua*, *S. aureus*, *Salmonella* and *E. coli*).

The results of the present work showed that it was possible to obtain powdered products with a water activity that ensures their stability, and demonstrated that the dehydration method used influences the physicochemical and antioxidant characteristics, with LIO powders being finer than SAC powders because they are easier to grind thanks to the porous structure formed by the sublimation of ice, and SAC powders having a higher content of total phenols and flavonoids, as well as a higher antioxidant activity, as a general rule. In addition, it was confirmed that these powdered products have some antimicrobial capacity in the plate inhibition assays, although the results obtained in the minimum inhibitory concentration assay were not as expected.

Once this work has been completed, it can be concluded that the integral valorization of fruit and vegetable wastes through the production of powdered products is an alternative of great interest. This is due to the great versatility offered by powdered products, as well as the improvements in antioxidant and nutritional properties that they can provide to the formulations to which they are added. In addition, if their antimicrobial potential is confirmed, they could be used as natural preservatives.

Keywords: powdered products; vegetables; residue valorization; antioxidants; antimicrobial potential; fruits; vegetables; functional ingredients.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Generación de residuos en la Industria Alimentaria	1
1.2. Obtención de productos en Polvo	2
1.3. Efecto del procesado sobre las propiedades de los productos en polvo	5
2. OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO	7
3. MATERIAL Y MÉTODOS	8
3.1. Materia prima	8
3.2. Proceso de obtención de los polvos	8
3.3. Determinaciones Analíticas	9
3.3.1. Actividad del agua (a_w).....	9
3.3.2. Humedad	10
3.3.3. Sólidos solubles	10
3.3.4. Tamaño de partícula	10
3.3.5. Propiedades Antioxidantes mediante técnicas espectrofotométricas	11
Fenoles totales.....	11
Flavonoides totales	11
Capacidad antioxidante por los métodos ABTS y DPPH.....	12
3.3.6. Identificación y cuantificación de compuestos fenólicos mediante HPLC.....	12
3.4. Capacidad Antimicrobiana	13
3.4.1. Ensayos de inhibición en placa	13
3.4.2. Concentración Mínima Inhibitoria (CMI).....	13
3.5. Análisis estadístico	14
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	15
4.1. Caracterización fisicoquímica de los productos en polvo	15
4.1.1 Actividad del agua, humedad y contenido en sólidos solubles totales.....	15
4.1.2. Tamaño de partícula	16
4.2 Propiedades Antioxidantes	18
4.2.1 Contenido en fenoles y flavonoides totales	18
4.2.2 Actividad antioxidante: por los métodos ABTS y DPPH	19
4.2.3 Compuestos fenólicos específicos determinados mediante HPLC.....	21
4.3 Propiedades Antimicrobianas	25
4.3.1 Ensayos de inhibición en placa	25
4.3.2 Concentración mínima inhibitoria (CMI)	26
5. CONCLUSIONES	36
6. BIBLIOGRAFÍA	37
7 ANEXOS	42

7.1	Anexo I: Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2030...	42
7.2	Anexo II: Cromatogramas	43

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Representación del diagrama de fases del agua. A: condiciones ambientales iniciales. B: congelación del alimento. C: alimento congelado, punto en el que se empieza a bajar la presión para pasar el punto triple. D: sublimación del hielo a vapor de agua. Ratti, C (2023). *Phase diagram of water*. [Figura]. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-98820-9.00001-6>.....4
- Figura 2.** Diagrama de flujo del proceso de obtención de los productos en polvo. SAC 70: secado por aire caliente a 70 °C. LIO: deshidratación por liofilización.....8
- Figura 3.** Aspecto de los polvos obtenidos a partir de la confección de hortalizas. ASAC: residuo de apio secado por aire caliente a 70 °C. ALIO: residuo de apio liofilizado. BSAC: residuo de brócoli secado por aire caliente a 70 °C. BLIO: residuo de brócoli liofilizado. CSAC: residuo de col repollo secado por aire caliente a 70 °C. CLIO: residuo de col repollo liofilizada. PSAC: residuo de ajo puerro secado por aire caliente a 70 °C. PLIO: residuo de ajo puerro liofilizado. ZSAC: residuo de zanahoria secada por aire caliente a 70 °C. ZLIO: residuo de zanahoria liofilizada.....9
- Figura 4.** Tamaño de partícula de los polvos obtenidos mediante secado por aire caliente a 70 °C (SAC) o liofilización (LIO): **A**) medido por vía seca y **B**) medido por vía húmeda. A: apio; B: brócoli; C: col repollo; P: ajo puerro; Z: zanahoria.....16
- Figura 5.** **A**) Fenoles totales expresados como miligramos de ácido gálico equivalentes (EAG) por gramo de materia seca de los productos en polvo de apio, brócoli, col repollo, ajo puerro y zanahoria, obtenidos mediante secado por aire caliente a 70 °C (SAC) o liofilización (LIO). **B**) Flavonoides totales expresados como miligramos de quercetina equivalentes (QE) por gramo de materia seca de los productos en polvo de apio, brócoli, col repollo, ajo puerro y zanahoria, obtenidos mediante secado por aire caliente a 70 °C (SAC) o liofilización (LIO). Letras diferentes (^{a, b, c...}) en las distintas columnas de un mismo gráfico indican diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95% (p-valor < 0,05).....19
- Figura 6.** Actividad antioxidante, expresada en miligramos de trólox equivalentes (TE) por gramo de materia seca, de los productos en polvo de apio, brócoli, col repollo, ajo puerro y zanahoria, obtenidos mediante secado por aire caliente a 70 °C (SAC) o liofilización (LIO). **A**) medida por el método del radical ABTS y **B**) medida por el método del radical DPPH. Letras diferentes (^{a, b, c...}) en las distintas columnas de un mismo gráfico indican diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95% (p-valor < 0,05).....20
- Figura 7.** Cromatogramas para la identificación de compuestos fenólicos por HPLC de los extractos de zanahoria **A**) SAC y **B**) LIO.....23
- Figura 8.** **A**) Resultado del ensayo de inhibición en placa en *Listeria innocua*. **B**) Resultado del ensayo de inhibición en placa en *Staphylococcus aureus*. **C**) Resultado del ensayo de inhibición en placa de *Salmonella* entérica. Se enfrentan los microorganismos a extractos metanol-agua al 80% (v/v) de los distintos productos en polvo producidos, siendo estos apio (A), brócoli (B), col repollo (C), ajo puerro (P) y zanahoria (Z), secados por aire caliente a 70°C (S) o liofilizados (L).....26

ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1.** Propiedades fisicoquímicas de los productos en polvo obtenidos a partir residuos de apio, brócoli, col, puerro y zanahoria, mediante secado por aire caliente a 70 °C (SAC) o por liofilización (LIO). Media \pm desviación estándar de tres repeticiones. a_w : actividad del agua. x_w : humedad. x_{ss} : fracción másica de sólidos solubles.....15
- Tabla 2.** Parámetros característicos del tamaño de partícula medidos por vía húmeda y por vía seca. Media \pm desviación estándar de 10 repeticiones en el caso de las medidas en vía húmeda y 5 en el caso de la vía seca de los productos en polvo obtenidos a partir de residuos de apio, brócoli, col repollo, ajo puerro y zanahoria, mediante secado por aire caliente a 70 °C (SAC) o liofilización (LIO).....17
- Tabla 3.** Compuestos fenólicos identificados mediante HPLC expresados en mg por cada 100 g de masa seca (ms) de los productos en polvo de apio, brócoli, col repollo, ajo puerro y zanahoria, obtenidos por secado por aire caliente a 70 °C (SAC) o por liofilización (LIO). Media \pm desviación estándar de 2 repeticiones.....24
- Tabla 4.** Diámetros medidos (cm) de los halos de inhibición producidos por discos con extractos de los productos en polvo de apio, brócoli, col repollo, ajo puerro y zanahoria, obtenidos por secado por aire caliente (SAC) o por liofilización (LIO).....25
- Tabla 5.** Medidas de absorbancia e incrementos de absorbancia absolutos y relativos de los ensayos de concentración mínima inhibitoria por el método de microdilución en caldo de los extractos acuosos de los polvos de apio, brócoli, col, puerro y zanahoria obtenidos mediante secado por aire caliente (SAC) o liofilización (LIO) frente a *Listeria*. Extractos ordenados del 1 al 4 del más concentrado al menos concentrado: 0,1 g/mL, 0,05 g/mL, 0,0025 g/mL y 0,0125 g/mL.....28
- Tabla 6.** Medidas de absorbancia e incrementos de absorbancia absolutos y relativos de los ensayos de concentración mínima inhibitoria por el método de microdilución en caldo de los extractos acuosos de los polvos de apio, brócoli, col, puerro y zanahoria obtenidos mediante secado por aire caliente (SAC) o liofilización (LIO) frente a *S. aureus*. Extractos ordenados del 1 al 4 del más concentrado al menos concentrado: 0,1 g/mL, 0,05 g/mL, 0,0025 g/mL y 0,0125 g/mL.
- Tabla 7.** Medidas de absorbancia e incrementos de absorbancia absolutos y relativos de los ensayos de concentración mínima inhibitoria por el método de microdilución en caldo de los extractos acuosos de los polvos de apio, brócoli, col, puerro y zanahoria obtenidos mediante secado por aire caliente (SAC) o liofilización (LIO) frente a *Salmonella*. Extractos ordenados del 1 al 4 del más concentrado al menos concentrado: 0,1 g/mL, 0,05 g/mL, 0,0025 g/mL y 0,0125 g/mL.
- Tabla 8.** Medidas de absorbancia e incrementos de absorbancia absolutos y relativos de los ensayos de concentración mínima inhibitoria por el método de microdilución en caldo de los extractos acuosos de los polvos de apio, brócoli, col, puerro y zanahoria obtenidos mediante secado por aire caliente (SAC) o liofilización (LIO) frente a *E. coli*. Extractos ordenados del 1 al 4 del más concentrado al menos concentrado: 0,1 g/mL, 0,05 g/mL, 0,0025 g/mL y 0,0125 g/mL.....34

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generación de residuos en la Industria Alimentaria

La industria alimentaria genera gran cantidad de residuos. Según la FAO (2019), el 14% de los alimentos a nivel mundial se pierden entre el cultivo de la cosecha y su distribución (lo que se estima que supone unos 400.000 millones de dólares americanos), y otro 17% se pierde debido a los consumidores finales. La generación de residuos tiene diversos orígenes; entre ellos, que el consumidor busca que el alimento que va a adquirir tenga ciertas características, rechazando los productos que no cumplen con estos estándares de calidad, lo que los convierte en desechos. Por otro lado, la industria de transformación también genera una gran cantidad de residuos que suponen un desperdicio alimentario. Solo en Europa, el 12% de los alimentos se pierden en las etapas de manipulación y almacenamiento antes de ser transformados, un 5% en el procesado y un 9% en la comercialización. Por otro lado, hasta un 50% de las frutas y hortalizas producidas a nivel mundial se convierten en residuos o desperdicio alimentario, lo que incluye desechos, excedentes de producción, o bien como partes separadas y descartadas durante el procesado. Los residuos del procesado de frutas y hortalizas suelen consistir en pieles, semillas, hojas externas, bagazos o partes dañadas que se separan de la materia prima y se retiran del proceso. Esto obliga a que los agricultores deban cultivar mayores cantidades para poder alcanzar los niveles de producción y comercialización necesarios, aumentando la cantidad de agua, energía y terreno necesarios para ello (Kaur *et al.*, 2023). Todo esto conlleva que grandes cantidades de alimentos se conviertan en material de desecho, lo que afecta de manera negativa al medio ambiente, además de suponer un coste de gestión para la industria.

Anteriormente, la práctica más común era deshacerse de estos residuos en lugar de tratar de reutilizarlos. Para ello se hacía uso de métodos convencionales como son los vertederos, la incineración, el compostaje, o las digestiones anaerobias (Kaur *et al.*, 2023). El uso de vertederos y la incineración serían los métodos menos adecuados, ya que ambos afectan de manera negativa al medio ambiente, al liberar gases de efecto invernadero y contaminar el aire. Además, los vertederos ocupan grandes superficies que podrían ser utilizadas para otro fin, y las plantas de incineración conllevan grandes costes de equipamiento y mantenimiento, además de que no todos los residuos pueden ser incinerados (Kaur *et al.*, 2023). El compostaje y las digestiones anaerobias son dos formas diferentes de utilizar microorganismos para tratar los desechos generados en la industria alimentaria: el compostaje tiene lugar en condiciones aerobias (presencia de oxígeno) y permite mejorar las propiedades de la tierra de cultivo; las digestiones anaerobias se producen en ausencia de oxígeno y permiten la producción de biogás a partir de biomasa.

En los últimos años, la importancia de promover una economía circular y reducir la linealidad de los sistemas alimentarios, ha ido en aumento. El Parlamento Europeo (2023) define la economía circular como un modelo de producción y consumo que implica compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes todas las veces que sea posible para crear un valor añadido. De esta manera, se consigue reducir los residuos producidos, alargando la vida de los productos, así como optimizar los recursos empleados en su producción. También se consigue proteger el medio ambiente y generar un valor añadido para los productos que, en otras circunstancias, se consideraban residuos. Es por ello, que la industria alimentaria debe encontrar formas de reutilizar estos residuos, como una estrategia para contribuir a la economía circular y la sostenibilidad de los sistemas alimentarios.

Los vegetales cuentan con una gran variedad de compuestos fitoquímicos, siendo los más abundantes ácidos fenólicos y flavonoides, que resultan interesantes por ser compuestos bioactivos que pueden resultar beneficiosos para la salud (Neacsu *et al.*, 2015). Es por ello que la mayoría de las técnicas empleadas para revalorizar estos residuos de plantas, entre ellos residuos de frutas y

hortalizas, tratan de extraer los compuestos bioactivos que siguen formando parte de estos para implementarlos en otros productos, o utilizan los residuos como sustratos para la producción de compuestos de interés mediante el empleo de microorganismos. Entre los compuestos extraídos a partir de estas matrices se encuentran compuestos útiles por tener propiedades antioxidantes, antimicrobianas, o tener beneficios para la salud, como pueden ser compuestos inmunomoduladores, anticoagulantes, anticancerígenos, o incluso antidiabéticos (Kaur *et al.*, 2023). Otros productos útiles que puede extraerse de las matrices vegetales son enzimas, con aplicación en diversas industrias; ácidos orgánicos, utilizados sobre todo como aditivos o conservantes en la industria alimentaria; SCP o *single cell protein*, producida por microorganismos como algas, bacterias, hongos o levaduras, y utilizada como fuente de proteínas; o fibra dietética, formada por carbohidratos no digeribles presentes sobre todo en la pared de células vegetales (Kaur *et al.*, 2023)

La reutilización de estos residuos conlleva diversos beneficios, tanto económicos, como sociales y medio ambientales. En cuanto a los beneficios económicos, se genera un nuevo valor económico al convertir los residuos en nuevos productos con un valor añadido. Su producción puede generar nuevos puestos de trabajo e ingresos, que contribuyen a los beneficios sociales y promueven el crecimiento económico, sobre todo de regiones rurales. También se beneficia a la salud de la población, al generar alimentos con alto valor añadido y al reducir la cantidad de residuos y basura generada, mejorando también el medio ambiente, al hacer un uso más responsable y eficiente de estos desechos. Reduciendo el uso de vertederos e incineradores se reducen los gases de efecto invernadero liberados y la contaminación producida (Sheer *et al.*, 2024).

Una propuesta interesante de valorización de los residuos de frutas y hortalizas es transformarlos en productos o ingredientes en polvo. Esto permite la reutilización tanto de las partes comestibles como de los residuos que se generan en forma de bagazo, semillas, cáscara, hojas y otros subproductos (Kaur *et al.*, 2023) que además siguen siendo ricos en compuestos bioactivos. Por otro lado, los procesos de transformación de los residuos de frutas y hortalizas en productos en polvo suponen un aprovechamiento integral de este material, evitando procesos de extracción con disolventes que pueden resultar perjudiciales y que generan otros residuos (Bas-Bellver *et al.*, 2020). Es por ello, que este trabajo se centra en la obtención de este tipo de productos a partir de residuos de diversas hortalizas, siguiendo la línea de proyectos de investigación realizados por el mismo grupo, en colaboración con la Cooperativa Agrícola de Villena. Concretamente, se trabajará con hortalizas que generan, entre 200 y 3000 toneladas de residuos por hortaliza al año tras su procesado en bandejas o productos de IV gama en dicha cooperativa, entre las que se encuentran el apio, la col repollo, el ajo puerro y la zanahoria. Adicionalmente, se trabajará con tallo de brócoli, como residuo de producción de brócoli IV gama y congelado.

1.2. Obtención de productos en Polvo

Un producto en polvo es un producto sólido compuesto por gran cantidad de partículas discretas cuyo tamaño puede ser del orden de nanómetros a milímetros (Bhandari *et al.*, 2013). Alimentos que se encuentren tanto en estado sólido como en estado líquido pueden ser convertidos en productos en polvo mediante secado, molienda, triturado, atrición, pulverización, precipitación o cristalización (Bhandari *et al.*, 2013). Las características de estos productos van a depender tanto del alimento original y sus propiedades, como de la forma de procesado que se aplique para la obtención de los polvos, por lo que van a variar en gran medida de un producto a otro.

El objetivo principal que se persigue mediante la transformación de frutas y hortalizas en productos en polvo es alargar su vida útil, ya que estos son productos muy perecederos. La obtención de productos en polvo a partir de frutas y verduras conlleva ciertos beneficios como puede ser un almacenamiento y transporte más sencillos o una mayor vida útil (Jiang *et al.*, 2013). Los productos en polvo tienen una mayor duración debido a su baja actividad del agua, parámetro termodinámico

que representa la cantidad de agua disponible o no ligada al producto, y que estaría por lo tanto disponible para participar en reacciones de deterioro (Cardona, 2019). Estas reacciones de deterioro de tipo enzimáticas, químicas, bioquímicas y microbianas, van a determinar la vida útil del alimento.

Además, los polvos de frutas y hortalizas están ganando popularidad con el tiempo, debido a la creciente tendencia de la población a consumir dietas más saludables. Los productos en polvo son estables, versátiles y concentrados en nutrientes. Cada vez es mayor el número de personas que son conscientes de la relación existente entre una buena alimentación y su salud, así como de los beneficios que pueden aportar los alimentos funcionales (Sun-Waterhouse, 2011). Los productos en polvo obtenidos a partir de frutas y verduras pueden utilizarse como ingredientes en la industria de las bebidas, como aditivos alimentarios funcionales que mejoran el valor nutritivo de los alimentos, como agentes aromatizantes o como colorantes alimenticios naturales (Camire *et al.*, 2007). Su uso como alimentos funcionales se debe a que frutas y verduras son ricos en pectina, polifenoles, licopeno, fibra dietética, enzimas, flavonoides, vitaminas, oligosacáridos, etc. (Jiang *et al.*, 2013), siendo todos ellos compuestos bioactivos o con beneficios para la salud.

Para obtener productos en polvo se suelen combinar etapas de disrupción y deshidratación, ya que se ha observado una interdependencia de ambas, y una mayor efectividad al utilizar la disrupción antes y después de la deshidratación (Djantou *et al.*, 2011). La etapa de secado reduce la humedad y la actividad del agua del material de partida, lo que mejora el rendimiento de la etapa de molienda final y, a su vez, la disrupción previa al secado aumenta la proporción de agua libre y la superficie de contacto entre el aire y el material a secar, favoreciendo la evaporación del agua presente en el alimento durante la etapa de secado (Karam *et al.*, 2016).

Las etapas de deshidratación de la materia prima de partida se incluyen con el objetivo de reducir la actividad del agua, hasta valores que permitan el almacenamiento del producto durante largos periodos de tiempo sin que se deteriore ni se contamine por microorganismos. Para ello, se utilizan principalmente dos técnicas diferentes en la industria alimentaria: el secado por aire caliente (SAC) y la liofilización (LIO).

El SAC hace uso de una corriente de aire con baja humedad relativa y alta temperatura (Ratti, 2023) para evaporar el agua presente en los alimentos. Se trata de una evaporación que tiene lugar desde la superficie del alimento o interfase producto-aire, y está determinada tanto por las condiciones del aire empleado en el secado como por la estructura y características del producto que se está deshidratando. Este tipo de secado normalmente ocurre en dos etapas diferenciadas por su cinética de secado. En la primera, conocida como periodo de velocidad de secado constante (PVSC), el agua que se evapora desde la superficie del es reemplazada inmediatamente por el agua procedente del interior del producto, que se transfiere desde las capas internas hasta la superficie. De esta manera, el aire en contacto con el material (interfase aire-producto) se encuentra saturado y el riesgo de deterioro por calentamiento del mismo es mínimo, siendo su temperatura cercana a la temperatura de saturación adiabática del aire o temperatura húmeda. En la segunda etapa, conocida como periodo de velocidad de secado decreciente (PVSD), la migración del agua hacia la superficie del producto se ve dificultada por el menor contenido en agua del mismo y el aumento de la densidad del material, que se contrae por efecto del secado. Como consecuencia, el agua que se evapora desde la superficie no puede ser reemplazada inmediatamente, con lo que la velocidad de secado disminuye y aparecen en la superficie del sólido zonas secas por las que penetra el calor, produciéndose un aumento de la temperatura del producto (Ratti, 2001).

Por su parte, la liofilización (LIO) es el proceso de deshidratación basado en la sublimación del hielo presente en un producto congelado (Ratti, 2023). Esta sublimación ocurre, como se muestra en el diagrama de fases del agua de la figura 1, en condiciones de presión y temperatura por debajo del punto triple del agua, es decir, por debajo de 0,01°C o 273,16 K y 612 Pa o 4580 mTorr (Ratti, 2023).

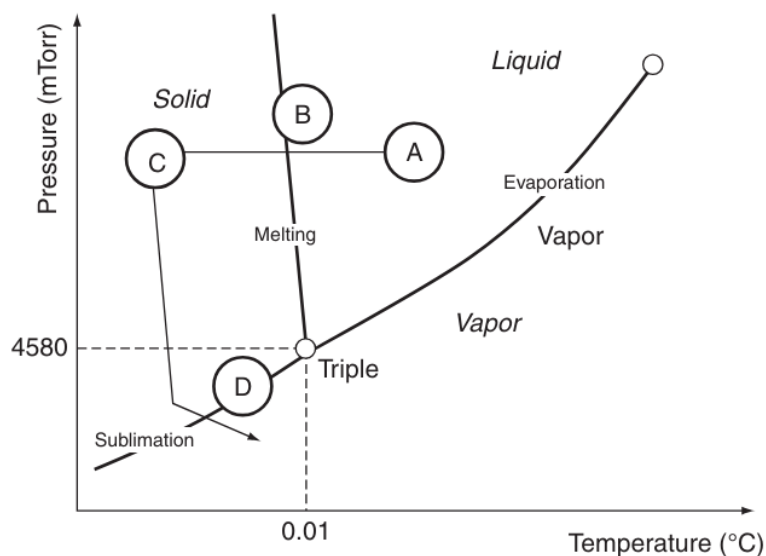


Figura 1. Representación del diagrama de fases del agua. A: condiciones ambientales iniciales. B: congelación del alimento. C: alimento congelado, punto en el que se empieza a bajar la presión para pasar el punto triple. D: sublimación del hielo a vapor de agua. Ratti, C (2023). *Phase diagram of water*. [Figura]. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-98820-9.00001-6>

Para llevar a cabo la liofilización, es necesario congelar el agua presente en el material a deshidratar. Posteriormente, se aplica calor de forma controlada, promoviendo la sublimación del hielo formado por el agua libre y el agua ligeramente ligada que se habrá congelado en la etapa anterior (Karam *et al.*, 2016). Finalmente, el ciclo de liofilización incluye una etapa de desorción a presión de vacío, pero a una temperatura por encima del punto triple del agua. Esta etapa es necesaria para eliminar parte del agua no congelable del producto, y permite llegar a valores de humedad muy bajos (<2-3%).

Además de estos procesos de deshidratación, la obtención de productos en polvo requiere de etapas de molienda o triturado, tanto antes como después del secado. El triturado o troceado previo tiene como objetivo principal reducir el tamaño de partida del alimento para aumentar su superficie e incrementar la eficiencia del secado. Adicionalmente, la desestructuración del tejido vegetal contribuye a la liberación de compuestos bioactivos y enzimas que pueden aumentar el valor nutricional de los productos resultantes. Después del secado, la molienda se aplica con el fin de obtener el producto en polvo con el tamaño de partícula deseado.

Con anterioridad a este trabajo, este mismo grupo de investigación ha desarrollado diversos proyectos en los que se ha abordado la obtención de productos en polvo a partir de residuos de frutas y hortalizas, así como el impacto de las etapas de desestructuración y secado sobre las características del producto final. Del mismo modo, diversos estudios han abordado la respuesta a la digestión *in vitro* de algunos de los productos en polvo obtenidos (Bas-Bellver, 2022; Bas-Bellver, 2020), así como la formulación de productos de bollería con propiedades antioxidantes mejoradas (Bas-Bellver, 2024).

En cuanto al impacto del procesado, los estudios anteriores han permitido comprobar que la desestructuración previa afecta a las cinéticas y la eficiencia del secado, concluyéndose que, en general, si el residuo es triturado en vez de troceado el secado será más rápido, a excepción de la zanahoria (Bas-Bellver *et al.*, 2020) y del brócoli (Bas-Bellver *et al.*, 2022) que muestran comportamientos similares en ambos casos. También se ha relacionado el método de deshidratación

empleado con los tamaños de partícula finales obtenidos en los productos en polvo llegando a la conclusión de que la deshidratación por liofilización da lugar a polvos más finos con tamaños de partícula menores, lo que podría deberse a que la estructura porosa que se forma con ese método permita una mejor molienda (Bas-Bellver *et al.*, 2020). Además, se ha visto que los polvos obtenidos de residuos triturados antes de ser deshidratados presentan partículas de menor tamaño que los que han sido troceados (Bas-Bellver *et al.*, 2022). Los estudios realizados hasta el momento han demostrado también que el tamaño de partícula es un parámetro importante puesto que afecta a las propiedades del producto en polvo obtenido y a su estabilidad durante el almacenamiento (Bas-Bellver, 2023). En otro estudio llevado a cabo por el mismo grupo demuestra que productos en polvo fabricados a partir de bagazo de arándano se mantienen estables y sin cambios significativos en su composición tras 20 semanas de almacenamiento (Calabuig-Jiménez *et al.*, 2022). Del mismo modo, la bioaccesibilidad de los compuestos bioactivos también depende del tamaño de partícula del polvo obtenido (Bas-Bellver, 2022).

1.3. Efecto del procesado sobre las propiedades de los productos en polvo

Las frutas y hortalizas tienen un alto contenido en fibra, vitaminas, minerales y compuestos bioactivos, como son los polifenoles, flavonoides, carotenoides, clorofilas o antocianinas, responsables de su gran capacidad antioxidante y de beneficios para la salud, como reducir el riesgo de padecer enfermedades cardiovasculares, enfermedades degenerativas y metabólicas y ciertos tipos de cáncer (Karam *et al.*, 2016). Además de su composición, cada una tiene características organolépticas, de aroma, color, textura y sabor particulares. Estas se ven afectadas durante el proceso de fabricación de productos en polvo, debido a las condiciones de las etapas de secado y de molienda.

Además de las características organolépticas y otras propiedades, el contenido en compuestos bioactivos tanto en frutas como en hortalizas varía de unas a otras. En concreto, de las hortalizas con las que se va a trabajar, el apio cuenta con grandes concentraciones de fenilpropanoides, flavonoides y ftaluros (Ahmed *et al.*, 2022), más concretamente catequinas y ácido 3,4-dihidroxibenzoico (Salamatullah *et al.*, 2021); en el brócoli destacan los glucosinolatos y sus compuestos de hidrólisis (isotiocianatos), como la glucorafanina y el sulforafano, respectivamente (Raiola *et al.*, 2018) y compuestos fenólicos como los flavonoides y los ácidos hidroxicinámicos (Borja *et al.*, 2019); en la col repollo se encuentran compuestos fenólicos, glucosinolatos e isotiocianatos (Chaisamlitpol *et al.*, 2014); el puerro es rico en ácidos fenólicos y flavonoides como el kaempferol (Strati *et al.*, 2018); y las zanahorias contienen grandes cantidades de flavonoides, fenoles y carotenoides (Anjani *et al.*, 2022), siendo los ácidos fenólicos predominantes el ácido clorogénico, el ácido cafeico, el ácido p-OH-benzoico y el ácido ferúlico entre otros (Sun *et al.*, 2009).

En cuanto a la deshidratación, en comparación con el secado por aire caliente, la liofilización puede producir productos de alta calidad porque la mayoría de las reacciones de deterioro se ralentizan o prácticamente se detienen debido a la ausencia de agua líquida, la ausencia de oxígeno y el empleo de bajas temperaturas, conservando mucho mejor las propiedades de color, forma, aroma y valor nutricional (Ratti, 2001; Karam *et al.*, 2016). Sin embargo, el coste de producción es entre cuatro y ocho veces mayor que cuando se emplea aire caliente (Ratti, 2001). El secado por aire caliente produce un mayor deterioro en el color, debido a las reacciones de Maillard que tienen lugar durante el proceso (Karam *et al.*, 2016). Estas son reacciones no enzimáticas de un grupo amino con un grupo reductor (normalmente un azúcar) que da lugar a la formación de compuestos que acaban polimerizándose para formar pigmentos marrones (Acton y Dawson, 2004). Además, utilizar temperaturas muy altas aumentan el endurecimiento, la ruptura de las estructuras y el cambio de color, aunque estos cambios dependen tanto de la materia de partida, como del procesamiento y de las temperaturas utilizadas (Karam *et al.*, 2016). También se ha visto que utilizar el secado por aire

caliente en lugar de la liofilización como método de deshidratación da lugar a productos en polvo con un mayor contenido en compuestos fenólicos, lo que puede deberse a una inactivación de las enzimas encargadas de la degradación de estos compuestos debido a las altas temperaturas (Bas-Bellver *et al.*, 2023).

Las propiedades de frutas y verduras, y los polvos producidos a partir de estas, también se ven afectadas por las etapas de molienda, aunque estos efectos no han sido muy estudiados, por lo que no existe mucha información al respecto. Estas nuevas características van a depender tanto del material de partida, como del método empleado en la etapa de molienda, afectando a características como el tamaño, la forma, la estructura, la composición y las propiedades funcionales de los polvos producidos (Karan *et al.*, 2016). Lo que se ha observado con anterioridad es que trocear en vez de triturar antes de la etapa de deshidratación mediante secado por aire caliente da lugar a productos en polvo con un mayor tamaño de partícula y un menor contenido en fenoles, lo que podría explicarse teniendo en cuenta que la disrupción del material es menor, llevando a un menor daño del tejido vegetal, lo que mantendría a esos compuestos fenólicos atrapados y no disponibles (Bas-Bellver *et al.*, 2023).

A lo largo de la historia se han utilizado las plantas como remedios medicinales naturales para las enfermedades, o como conservantes de alimentos por su capacidad de preservación (Cetin-Karaca y Newman, 2015). Esto es posible gracias a que, tanto plantas como frutas y hortalizas, son ricos en compuestos antioxidantes. Estos compuestos han sido bastante estudiados y se sabe que tienen propiedades que contribuyen a mejorar nuestra salud y que pueden tener acción contra microorganismos patógenos. Se sabe que los compuestos fenólicos, grupo de metabolitos secundarios muy diversos de plantas, tienen esta acción y son una opción muy interesante para producir conservantes alimenticios naturales (Cetin-Karaca y Newman, 2015). La necesidad de buscar conservantes alimenticios naturales surge del interés por sustituir los antioxidantes sintéticos que se utilizan actualmente como conservantes como el hidroxitolueno butilado (BHT, E321), la tert-butilhidroquinona (TBHQ, E319) o el hidroxianisol butilado (BHA, E320), que se ha visto que pueden tener efectos dañinos en la salud, como promover el crecimiento de tumores o causar toxicidad, siendo rechazados por los consumidores (Abdelbaky *et al.*, 2021).

Los aceites esenciales de las plantas son las sustancias naturales con capacidad antimicrobiana más estudiados y ya han sido utilizados como conservantes y saborizantes (Ayala-Zavala *et al.*, 2011). Teniendo en cuenta que cada vez más se está investigando la forma de reutilizar los residuos de frutas y hortalizas, y que al convertirlos en productos en polvo mantienen grandes cantidades de compuestos fenólicos, que tienen capacidades antimicrobianas, sería interesante destinar estos productos en polvo también a la conservación alimenticia. El formato en polvo es fácil de usar, fácil de añadir a alimentos y preparaciones, y fácil de almacenar, gracias al poco espacio que ocupan y a su estabilidad. Además, de usarse como conservantes, estos polvos podrían ser utilizados también como saborizantes y colorantes, mejorando las características organolépticas de los alimentos, o como ingredientes en la formulación de nuevos alimentos con el fin de mejorar sus características nutricionales, contribuyendo así al desarrollo de dietas más saludables y sostenibles definido, objetivo definido por la FAO junto con la Organización Mundial de la Salud en 2019.

2. OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO

El objetivo principal de este Trabajo Final de Grado fue caracterizar los polvos obtenidos a partir de residuos de la confección en cooperativa de distintas hortalizas (apio, brócoli, col repollo, ajo puerro y zanahoria) mediante secado con aire a 70 °C o liofilización y posterior molienda. Específicamente, se analizarán sus propiedades fisicoquímicas (humedad, actividad del agua, contenido en sólidos solubles y tamaño de partícula) y antioxidantes (contenido en fenoles y flavonoides totales y actividad antioxidante por los métodos de los radicales DPPH y ABTS, además del contenido en compuestos fenólicos específicos mediante HPLC), además de su potencial antimicrobiano frente a distintas bacterias, tanto Gram positivas como Gram negativas.

Para poder alcanzar este objetivo principal se plantearon los siguientes objetivos particulares:

1. Obtener polvos estables a partir de los distintos residuos de confección en cooperativa de hortalizas, mediante secado por aire caliente a 70 °C (SAC 70) y por liofilización (LIO) hasta una actividad del agua inferior a 0,3, y posterior molienda.
2. Estudiar el efecto del tipo de residuo y de la técnica de deshidratación aplicada sobre las propiedades fisicoquímicas de los polvos.
3. Analizar el efecto del tipo de residuo y de la técnica de deshidratación aplicada sobre las propiedades antioxidantes de los polvos, incluida la identificación y cuantificación de compuestos fenólicos específicos mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC).
4. Evaluar la actividad antimicrobiana de los polvos frente a distintas bacterias, tanto Gram positivas como Gram negativas y relacionarla con sus propiedades antioxidantes, incluido el contenido de compuestos fenólicos específicos obtenido mediante HPLC.

Para el cumplimiento tanto del objetivo principal como de los objetivos particulares, se ideó el siguiente plan de trabajo:

1. Selección de los residuos derivados de la confección de hortalizas en cooperativa para su empleo como materia prima: apio, brócoli, col repollo, ajo puerro y zanahoria.
2. Transformación de los residuos en polvos estables con una actividad del agua inferior a 0,3 mediante secado por aire caliente a 70 °C durante 12 h o liofilización durante 48 h y molienda final.
3. Caracterización fisicoquímica de los 10 polvos (2 tipos de polvo por cada tipo de residuo): análisis de la actividad del agua (a_w), contenido en sólidos solubles (x_{ss}), humedad (x_w), y tamaño de partícula.
4. Análisis de las propiedades antioxidantes de los 10 polvos mediante técnicas espectrofotométricas (contenido de fenoles y flavonoides totales, y actividad antioxidante por los métodos ABTS y DPPH) e identificación y cuantificación de compuestos fenólicos específicos por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC).
5. Evaluación de la capacidad antimicrobiana por medio de ensayos de inhibición del crecimiento de bacterias Gram positivas (*Listeria innocua* y *Staphylococcus aureus*) y Gram negativas (*Escherichia coli* y *Salmonella*) y determinación de la concentración mínima inhibitoria (CMI).
6. Análisis estadístico de los resultados obtenidos.
7. Discusión de los resultados obtenidos y relación de los compuestos y las capacidades antioxidantes de los polvos con las capacidades antimicrobianas estudiadas.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Materia prima

Como materia prima se utilizaron residuos de 5 hortalizas diferentes: tallos de apio (A), tallos de brócoli (B), hojas externas de col repollo (C), hojas verdes del ajo puerro (P) y residuos palitos de zanahoria (Z), procedentes de la confección de bandejas y productos de IV gama. Todos los residuos, a excepción del tallo de brócoli, fueron suministrados por la cooperativa Agrícola de Villena S.L. y procesados por separado inmediatamente después de su recepción. El residuo de brócoli se obtuvo directamente a partir de las cabezas florales adquiridas en un supermercado local de la ciudad de Valencia (Mercadona), de las que se separaron manualmente las flores de los tallos con la ayuda de un cuchillo.

3.2. Proceso de obtención de los polvos

Para obtener los polvos se combinaron etapas de disrupción, deshidratación y molienda, tal y como se indica en la figura 2.

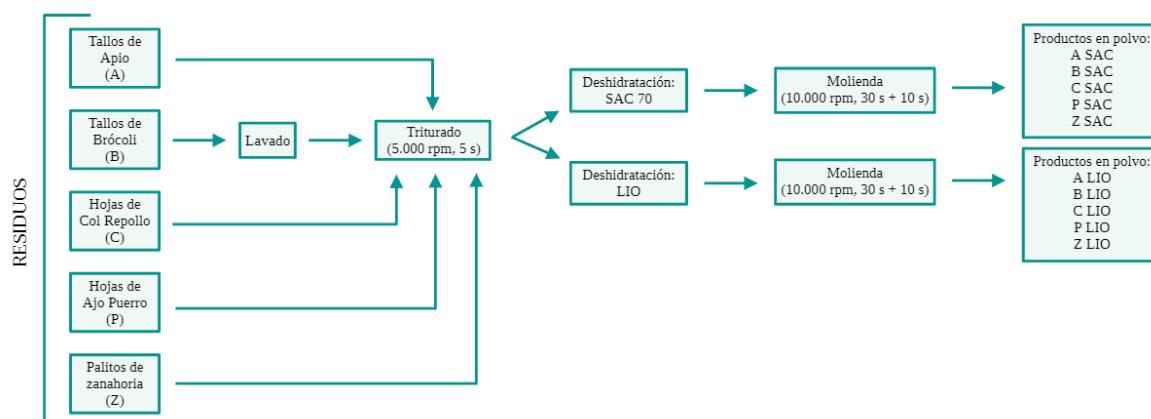


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de obtención de los productos en polvo. SAC 70: secado por aire caliente a 70 °C. LIO: deshidratación por liofilización.

La disrupción inicial se llevó a cabo en un procesador de alimentos Thermomix® TM6 (Vorwerk, España) donde los residuos se trituraron por separado a 5000 rpm durante 5 s. A continuación, una parte del residuo triturado se deshidrató mediante secado por aire caliente a 70 °C durante 12 h (SAC) y el resto se liofilizó durante 48 h (LIO). Las condiciones de triturado y deshidratación fueron establecidas según los resultados de estudios previos (Bas-Bellver *et al.*, 2022), asegurando que el producto resultante alcance valores de actividad del agua inferiores a 0,3, que garanticen su estabilidad. Para el secado por aire caliente se empleó un secador convectivo de flujo transversal de planta piloto (CLW750 TOP+, Pol-ekoAparatura, Katowice, Polonia), con una velocidad de aire de 2 m/s, donde se introdujeron los residuos triturados distribuidos en bandejas perforadas de plástico (200 g/bandeja) formando láminas de aproximadamente 1 cm de espesor, las cuales se colocaron sobre las bandejas del equipo. Para la liofilización, los residuos triturados se distribuyeron en bandejas de aluminio, formando una lámina homogénea de 1 cm de espesor que se congelaron a -40 °C durante al menos 18 h en un ultracongelador (Matek, modelo CVN-40/105). A continuación, se llevaron a cabo las etapas de sublimación y desorción durante 48 h en un liofilizador de planta piloto (modelo TESLAR LIOALFA 6-80), con una temperatura en el condensador de -45 °C y una presión subatmosférica de 0,1 mbar. Tras la deshidratación por cualquiera de las dos

técnicas, los residuos secos se molieron en un procesador de alimentos Thermomix® TM6 (Vorwerk, España) a 10.000 rpm durante 30 s. Tras homogeneizar el contenido del vaso, se volvió a triturar a la misma velocidad durante 10 s para obtener un polvo fino y con un tamaño de partícula uniforme.

A los polvos obtenidos se les asignó la siguiente nomenclatura: ASAC, ALIO, BSAC, BLIO, CSAC, CLIO, PSAC, PLIO, ZSAC y ZLIO. La primera letra corresponde a la hortaliza de la que procede el residuo (A, B, C, P y Z para apio, brócoli, col repollo, ajo puerro y zanahoria, respectivamente), mientras que el resto indica el método de secado empleado (SAC y LIO para secado por aire caliente a 70 °C y liofilización, respectivamente). El aspecto final de estos polvos se muestra en la figura 3. Los polvos generados se reservaron en tarros de cristal y envueltos en papel de aluminio para protegerlos de la luz hasta su uso en los posteriores análisis.



Figura 3. Aspecto de los polvos obtenidos a partir de la confección de hortalizas. ASAC: residuo de apio secado por aire caliente a 70 °C. ALIO: residuo de apio liofilizado. BSAC: residuo de brócoli secado por aire caliente a 70 °C. BLIO: residuo de brócoli liofilizado. CSAC: residuo de col repollo secada por aire caliente a 70 °C. CLIO: residuo de col repollo liofilizada. PSAC: residuo de ajo puerro secado por aire caliente a 70 °C. PLIO: residuo de ajo puerro liofilizado. ZSAC: residuo de zanahoria secada por aire caliente a 70 °C. ZLIO: residuo de zanahoria liofilizada.

3.3. Determinaciones Analíticas

Los polvos obtenidos se caracterizaron fisicoquímicamente, determinando su actividad del agua, contenido en humedad y sólidos solubles y el tamaño de partícula. Posteriormente, se analizaron también las propiedades antioxidantes de cada uno de ellos, determinando la cantidad de fenoles y flavonoides totales, midiendo la actividad antioxidante por los métodos ABTS y DPPH, e identificando compuestos fenólicos específicos mediante HPLC. Finalmente, se estudió su capacidad antimicrobiana mediante ensayos de inhibición en placa y se calculó la concentración mínima inhibitoria (CMI).

3.3.1. Actividad del agua (a_w)

La actividad del agua se midió a 25 °C utilizando un higrómetro de punto de rocío (Aqualab 4TE; Decagondevices Inc., Pullman WA, USA) con una precisión de $\pm 0,003$, previamente calibrado con disoluciones saturadas de referencia. Las medidas se realizaron por triplicado para todas las muestras.

3.3.2. Humedad

La humedad de las muestras se determinó por el método de doble pesada, basado en cuantificar la cantidad de agua eliminada a partir de una cantidad conocida de muestra mediante secado en una estufa a vacío (Vaciotem, J.P. Selecta, Barcelona, España) a 60 °C y 200 mm de Hg hasta alcanzar peso constante. Las medidas se realizaron por triplicado para cada una de las muestras utilizando una balanza de 1 mg de precisión (Mettler Toledo Inc., Barcelona, España). El porcentaje de humedad se calculó aplicando la ecuación 1:

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \times 100 \quad (\text{Ec. 1})$$

donde:

m_0 : masa del crisol vacío, en gramos

m_1 : masa del crisol con el polvo antes de su secado en estufa, en gramos

m_2 : masa del crisol con el polvo después de su secado en estufa, en gramos

3.3.3. Sólidos solubles

El contenido de sólidos solubles totales de los polvos se calculó a partir de la medida de grados Brix tomada con un refractómetro de mesa termostatado a 20 °C (AbbeAtago, 3-T, Japón), teniendo en cuenta la humedad de la muestra y, en su caso, la cantidad de agua utilizada en la extracción de los sólidos solubles. Los grados Brix se midieron en el sobrenadante resultante tras la centrifugación (Eppendor Centrifuge 5804 R) durante 5 min a 10.000 rpm de mezclas de polvos con agua destilada en una relación 1:10 (m/v), excepto para el polvo BSAC, que requirió una relación 1:15 (m/v). Se prepararon 3 extractos por cada polvo y los grados Brix obtenidos se transformaron en la fracción másica de sólidos solubles totales (x_{SS}) aplicando la ecuación 2:

$$^{\circ}\text{Brix} = \frac{x_{SS}}{x_{SS} + (m_W + x_W)} \times 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

donde:

x_{SS} : fracción másica de sólidos solubles ($g_{SS}/g_{\text{muestra}}$)

m_W : cantidad de agua añadida en la disolución (g)

x_W : humedad de la muestra (g_W/g_{muestra})

3.3.4. Tamaño de partícula

El tamaño de partícula de cada uno de los polvos se determinó tanto por vía húmeda como por vía seca, empleando un equipo de difracción láser Mastersizer 2000 (Malvern Instruments Limited, Worcester, Gran Bretaña), que mide tamaños de partícula en el rango entre 0,02 y 200 μm . Para las medidas por vía húmeda, se acopló una unidad Hydro 2000, que utiliza agua desionizada como medio dispersante. Se utilizó un índice de refracción de 1,5 para la muestra y de 1,33 para la fase dispersa, con un índice de absorción de 0,1. Para el análisis por vía seca se acopló una unidad Scirocco 2000, que utiliza aire seco a 2,5 bares de presión y con un 60% de agitación como medio dispersante. Se realizaron 10 medidas para cada polvo por vía húmeda, y 5 medidas por vía seca.

3.3.5. Propiedades Antioxidantes mediante técnicas espectrofotométricas

Antes de medir las propiedades antioxidantes de los polvos se obtuvieron 3 extractos metanólicos de cada uno. Se utilizó una relación de extracción 1:20 (m/v), mezclando 0,5 g de polvo con 10 mL de una disolución 80:20 (v/v) de metanol y agua. Tras 1 hora de agitación horizontal en oscuridad (agitador horizontal COMECTA WY-100) se centrifugaron durante 5 min a 10.000 rpm (Eppendor Centrifuge 5804 R). El sobrenadante resultante se reservó en nevera hasta el momento de su análisis.

Fenoles totales

El contenido en fenoles totales de las muestras se analizó mediante el método espectrofotométrico del reactivo de Folin-Ciocalteu (Singleton *et al.*, 1999) basado en medir la absorbancia de la coloración que se produce por la reacción entre este reactivo y los compuestos fenólicos presentes en las muestras. La reacción se llevó a cabo directamente en la cubeta, a la cual se adicionan 0,125 mL de extracto, 0,5 mL de agua bidestilada y 0,125 mL del reactivo Folin-Ciocalteu. La mezcla se dejó reaccionar durante 6 min en oscuridad, luego se adicionaron 1,25 mL de carbonato sódico (Na_2CO_3) al 7% (m/v) para detener la reacción y 1 mL de agua bidestilada para completar el volumen de 3 mL de la cubeta. La mezcla se dejó en oscuridad durante otros 90 min. Pasado este tiempo se midió la absorbancia a 760 nm en un espectrofotómetro Helios Zeta UV/Vis (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA). Para el blanco, se sustituyeron los 0,125 mL de muestra por el mismo volumen de la disolución de metanol al 80% en agua (v/v) utilizada como disolvente en la preparación de los extractos.

Los resultados se expresan en miligramos de ácido gálico equivalentes por gramo de materia seca (mg EAG/g_{ms}), utilizando la recta de calibrado obtenida para este compuesto de referencia en el intervalo de concentraciones de 0 a 0,3 mg/mL. Para asegurar que las medidas de absorbancia estuvieran dentro del rango de linealidad, los extractos de los polvos BSAC, CSAC, ZSAC, BLIO, CLIO y PLIO se diluyeron en el disolvente en una relación 1:2 (v/v), y los extractos del polvo PSAC se diluyeron en una relación 1:4 (v/v). Los extractos de los polvos ASAC, ALIO y ZLIO se analizaron directamente sin diluir. Se realizaron 2 medidas por extracto.

Flavonoides totales

El contenido en flavonoides totales se determinó según el método colorimétrico del cloruro de aluminio (AlCl_3) (Luximon-Ramma *et al.*, 2002). Para ello, en la cubeta empleada para el análisis espectrofotométrico se mezclaron 1,5 mL de extracto con 1,5 mL del reactivo de AlCl_3 al 2% (m/v) en metanol, dejando reaccionar la mezcla durante 10 min en oscuridad. Las mediciones se realizaron con un espectrofotómetro Helios Zeta UV/Vis (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA), a una longitud de onda de 368 nm. Para el blanco se reemplazó la muestra por el disolvente utilizado en la preparación de los extractos, metanol al 80% (v/v) en agua bidestilada.

Los resultados se expresan en miligramos de quercetina equivalentes por gramo de materia seca (mg EQ/g_{ms}), utilizando la recta de calibrado obtenida para este compuesto de referencia en el intervalo de concentraciones de 0 a 0,3 mg/mL de quercetina. Para asegurar que las medidas de absorbancia estuvieran dentro del rango de linealidad, los extractos de los polvos se diluyeron en el disolvente con la misma relación que se empleó en el análisis de fenoles totales, con la excepción del extracto ZLIO, que requirió una dilución 1:1 (v/v) en metanol al 80% (v/v) en agua bidestilada. Se realizaron 2 medidas por extracto.

Capacidad antioxidante por los métodos ABTS y DPPH

Para evaluar la capacidad antioxidante de los polvos se emplearon dos métodos basados en la inhibición de radicales libres: el ABTS (ácido 2,20-azobis-3-etil benzotiazolin-6-sulfónico) y el DPPH (1,1-diphenyl-2-picryl hydrazyl).

En ambos casos, se realizaron dos medidas por cada extracto y los resultados se expresaron en mg de trólox equivalentes por g de materia seca (mg ET/g_{ms}). Para el método ABTS, se utilizó una recta de calibrado con trólox como compuesto de referencia, abarcando concentraciones de 0 a 0,1 mg/mL. En el método DPPH, la recta de calibración se realizó también con trólox, en concentraciones de 0 a 0,2 mg/mL.

Para medir la capacidad antioxidante por el método del radical ABTS (Re *et al.*, 1999) se liberó inicialmente el radical mezclando ABTS 7 mM con persulfato potásico 2,45 mM y dejándolo en oscuridad durante 16 h. Posteriormente, se ajustó la absorbancia a $0,7 \pm 0,02$ medida a 734 nm mediante dilución con tampón fosfato. Una vez liberado el radical, se combinaron 0,1 mL del extracto con 2,9 mL de la disolución del radical ABTS⁺ en tampón fosfato, y se midió la absorbancia a 734 nm en un espectrofotómetro Helios Zeta UV/Vis (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA) tras 7 min en oscuridad. Para el blanco se reemplazó la muestra por la misma cantidad de metanol al 80% (v/v) en agua bidestilada. Para asegurar que las medidas de absorbancia estuvieran dentro del rango de linealidad, los extractos de los polvos se diluyeron según las siguientes relaciones: ASAC y ALIO en una relación 1:1 (v/v), BLIO, CLIO y PLIO en una relación 1:2 (v/v), CSAC y ZSAC en una relación 1:4 (v/v), PSAC en una relación 1:8 (v/v), BSAC en una relación 1:14 (v/v), y el extracto del polvo ZLIO se midió directamente sin diluir.

Para medir la capacidad antioxidante por el método de DPPH (Brand-Williams *et al.*, 1995) se mezclaron 0,1 mL de cada muestra con 2,9 mL de una disolución 0,1 mM de DPPH en metanol. El método se basa en medir la pérdida de color de la disolución de DPPH que tiene un color morado oscuro. La mezcla se dejó reaccionar durante 90 min en oscuridad y la absorbancia se midió en un espectrofotómetro Helios Zeta UV/Vis (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA) a una longitud de onda de 515 nm. Para el blanco se sustituyó la muestra por metanol al 80% (v/v) en agua bidestilada. Para asegurar que las medidas de absorbancias estuvieran dentro del rango de linealidad, los extractos de los polvos se diluyeron según las siguientes relaciones: BSAC, CSAC, ZSAC, BLIO, CLIO y PLIO en una relación 1:1 (v/v), PSAC en una relación 1:2 (v/v), y los extractos ASAC, ALIO y ZLIO se midieron directamente sin diluir.

A partir de las medidas de absorbancia, se calculó el porcentaje de inhibición utilizando la ecuación 3:

$$I(\%) = \frac{A_B - A_M}{A_B} \times 100 \quad (\text{Ec. 3})$$

donde:

A_B: absorbancia del blanco

A_M: absorbancia de la muestra

3.3.6. Identificación y cuantificación de compuestos fenólicos mediante HPLC

Se realizó un análisis por HPLC para identificar y cuantificar los compuestos fenólicos presentes en las muestras. Para ello, se prepararon extractos metanólicos utilizando como disolvente una disolución de metanol de grado HPLC al 80% (v/v) en agua bidestilada en una relación de extracción 1:10 (m/v). La mezcla de los polvos con el disolvente se agitó durante 1 h en un agitador horizontal (COMECTA WY-100), manteniéndolos en oscuridad. Posteriormente, se centrifugaron a

10.000 rpm durante 5 min (Eppendor Centrifuge 5804 R) y se recuperaron los sobrenadantes, que se filtraron con filtros de 0,45 µm y se almacenaron en viales ámbar de 1 mL en refrigeración hasta su posterior análisis. Se prepararon 2 extractos por polvo.

Para el análisis se utilizó un equipo HPLC Agilent 1200 Series Rapid Resolution, equipado con un detector de matriz de diodos, Agilent 1260 Infinity II (Agilent, Palo Alto, CA). Las separaciones se llevaron a cabo en una columna Kinetex (250 x 4,6 mm I.D., 5 µm; Phenomenex; Torrance, CA, USA) a 31 °C. Se utilizó una fase móvil bifásica compuesta por una fase A (disolución de ácido fórmico al 1% en agua) y una fase B (acetonitrilo), utilizando un gradiente de elución en a un caudal de 0,5 mL/min. El volumen de inyección de la muestra fue de 10 µL. Los datos espectrales de cada pico se registraron en el intervalo de 190-500 nm, y los fenoles se controlaron a diferentes longitudes de onda: 230, 250, 260, 280, 290, 320, 350 y 380 nm. La adquisición y el procesamiento de los datos analíticos se llevaron a cabo utilizando el software Agilent MassHunter Workstation (versión B.09.00).

3.4. Capacidad Antimicrobiana

Para evaluar las propiedades antimicrobianas de los productos en polvo obtenidos, se prepararon los mismos extractos metanólicos que se prepararon para el análisis de los compuestos fenólicos específicos por HPLC. Se seleccionaron un total de cuatro cepas: dos Gram positivas (*Listeria innocua* CECT 4030 y *Staphylococcus aureus* CECT 240) y dos Gram negativas (*Salmonella* entérica CECT 4266 y *Escherichia coli* CECT 101).

3.4.1. Ensayos de inhibición en placa

Se estudió la capacidad de los extractos de inhibir el crecimiento microbiano mediante el método de difusión o antibiograma disco-placa, basado en el método Bauer-Kirby, recomendado por el NCCLS o National Committee for Clinical Laboratory Standards (Pérez Esteve *et al.*, 2021).

Se prepararon discos autoclavados de papel de filtro de 6 mm de diámetro. Estos discos se impregnaron con 20 µL de los extractos metanólicos de los polvos, en dos etapas de 10 µL cada una, asegurando que absorbieran todo el volumen depositado y que el disolvente se evaporara correctamente.

Para la preparación de las placas de Petri, se utilizó medio sólido Mueller-Hinton (MH), que se sembró con 100 µL de una suspensión microbiana con una concentración en torno a 10^8 y 10^9 UFC/mL, determinada haciendo uso de la escala de McFarland, y distribuida uniformemente con un asa de Digralsky estéril. Una vez secas las placas inoculadas, se dispusieron los discos impregnados sobre el agar, colocando 4 discos por placa y realizando duplicados de cada extracto en placas separadas, lo que resultó en 20 discos por microorganismo ensayado. Todo el procedimiento se llevó a cabo en un ambiente estéril utilizando mecheros Bunsen. A continuación, las placas se incubaron invertidas durante 24 h a 37 °C. Pasado este tiempo se utilizó una regla para medir el diámetro de los halos de inhibición producidos.

3.4.2. Concentración Mínima Inhibitoria (CMI)

La concentración mínima inhibitoria (CMI) es la concentración mínima necesaria de un compuesto antimicrobiano concreto para impedir el crecimiento de un microorganismo en particular. El método escogido para determinar la CMI fue el método de microdilución en caldo. Este se basa en añadir diferentes concentraciones del compuesto antimicrobiano a distintos pocillos en los que

habrá caldo de cultivo. Estos se inocularán con la misma concentración de microorganismo (entre 1 y 5×10^4 UFC/mL).

Para preparar los extractos se procedió a rotaevaporar los extractos metanólicos empleados en los ensayos de inhibición en un evaporador rotativo (Heidolph-VAP-Core, Germany), para eliminar el disolvente y concentrar los extractos. Se rotaevaporaron 4 mL de cada extracto y se resuspendieron en 2 mL de agua estéril. A partir de estos nuevos extractos se realizaron las diluciones seriadas. En el primer pocillo se depositaron 50 μ L de cada extracto junto con los 50 μ L de caldo. A partir de aquí se fueron tomando 50 μ L y pasándolos al siguiente pocillo para llevar a cabo las diluciones. Finalmente, se añadieron 50 μ L de inóculo a cada pocillo.

Puesto que los extractos originales tenían una concentración de 0,1 g de polvo por mL de disolvente, al rotaevaporar se concentraron, obteniendo una concentración de 0,2 g/mL. Estos nuevos extractos se diluyeron al depositar en el pocillo el mismo volumen de caldo que de cultivo, por lo que las concentraciones ensayadas fueron: 0,1 g/mL, 0,05 g/mL, 0,0025 g/mL y 0,0125 g/mL.

Se preparó un control positivo añadiendo 50 μ L de caldo de cultivo y 50 μ L de inóculo, sin extracto, y un control negativo solo con 50 μ L de caldo. Finalmente, se incubaron las placas a 37 °C durante 24 h y se realizó la lectura.

Las absorbancias se midieron antes (0 h) y después de la incubación (24 h) en un lector de microplacas (HALO MPR-96, Dynamica). Se emplearon placas de 96 pocillos con tapa para evitar que se contaminasen los cultivos. Una vez medidas las absorbancias, se calculó el incremento de absorbancia relativo para cada pocillo.

3.5. Análisis estadístico

La significancia estadística de las diferentes variables estudiadas se analizó con el programa Statgraphics Centurion XIX (Statpoint Technologies, Inc.) mediante análisis simple y multifactorial de la varianza (ANOVA simple y multifactorial) con un nivel de confianza del 95% ($p < 0,05$). Para ello, se empleó el método LSD de Fisher, previa comprobación de la normalidad de los datos.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización fisicoquímica de los productos en polvo

4.1.1 Actividad del agua, humedad y contenido en sólidos solubles totales

En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos para la actividad del agua, el porcentaje de humedad (x_w) y la cantidad de sólidos solubles totales (x_{ss}) de los productos en polvo obtenidos mediante secado por aire caliente a 70 °C o liofilización de los residuos procedentes de diferentes hortalizas.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de los productos en polvo obtenidos a partir residuos de apio, brócoli, col, puerro y zanahoria, mediante secado por aire caliente a 70 °C (SAC) o por liofilización (LIO). Media \pm desviación estándar de tres repeticiones. a_w : actividad del agua. x_w : humedad. x_{ss} : fracción másica de sólidos solubles.

RESIDUO	SECADO	a_w	x_w (%)	x_{ss} (gSS/gmuestra)
APIO	SAC	0,260 \pm 0,010 ^c	5,811 \pm 0,004 ^{cd}	0,593 \pm 0,006 ^b
	LIO	0,2642 \pm 0,0006 ^c	4,915 \pm 0,004 ^{bc}	0,668 \pm 0,009 ^{de}
BRÓCOLI	SAC	0,192 \pm 0,009 ^a	4,0524 \pm 0,0013 ^{ab}	0,637 \pm 0,009 ^{cd}
	LIO	0,19 \pm 0,04 ^a	7,584 \pm 0,010 ^e	0,733 \pm 0,009 ^g
COL	SAC	0,265 \pm 0,019 ^c	4,7533 \pm 0,0008 ^b	0,691 \pm 0,008 ^{ef}
	LIO	0,263 \pm 0,006 ^c	6,1118 \pm 0,0004 ^d	0,665 \pm 0,0010 ^{de}
PUERRO	SAC	0,216 \pm 0,002 ^{ab}	5,9665 \pm 0,0008 ^d	0,6232 \pm 0,0014 ^{bc}
	LIO	0,224 \pm 0,009 ^b	4,722 \pm 0,012 ^b	0,5251 \pm 0,0006 ^a
ZANAHORIA	SAC	0,2309 \pm 0,0008 ^b	3,509 \pm 0,004 ^a	0,79 \pm 0,02 ^h
	LIO	0,31047 \pm 0,00006 ^d	7,556 \pm 0,003 ^e	0,716 \pm 0,006 ^{fg}

Letras diferentes (^{a, b, c,...}) en la misma columna indican diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95% (p-valor < 0,05).

Como se puede observar, los valores de la actividad del agua se encuentran alrededor del valor objetivo ($\leq 0,3$), excepto para el caso del residuo de zanahoria liofilizado que presenta un valor ligeramente superior a 0,3, pero todavía dentro del intervalo que asegura la estabilidad de los productos en polvo (0,2-0,4). Los resultados obtenidos indican que existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores de a_w obtenidos para los polvos provenientes de diferentes hortalizas, pero no así entre los polvos de la misma hortaliza obtenidos por las dos técnicas de deshidratación empleadas, a excepción de la zanahoria, cuyo polvo presenta una mayor actividad del agua cuando se aplica la liofilización en comparación con el secado por aire caliente a 70 °C.

Por otro lado, en cuanto a la humedad, también existen diferencias estadísticamente significativas entre polvos de distintas hortalizas. Para la zanahoria, la col y el brócoli se obtienen polvos más húmedos con la deshidratación por liofilización, al contrario de lo que sucede para el apio y el puerro. Tras hacer un ANOVA multifactor, se encuentra que existe una interacción estadísticamente significativa entre el tipo de hortaliza y el método de deshidratación empleado.

Las diferencias encontradas entre residuos de diferentes hortalizas se deberían a variaciones en el comportamiento frente al secado de las distintas matrices vegetales estudiadas. La resistencia del tejido a la transferencia de agua durante el secado, o la incidencia de fenómenos de encostramiento en la superficie del producto que limitan la difusión de agua hacia la superficie durante el SAC, condicionarían la cinética de secado y, en consecuencia, los valores de humedad y a_w alcanzados finalmente (Bas-Bellver *et al.*, 2022). En este punto, cabe destacar que la duración del

proceso de SAC se ha fijado para alcanzar los valores de a_w objetivo, mientras que el protocolo de liofilización no se ha modificado. No obstante, la comparación de los valores de a_w y x_w para los productos obtenidos permite afirmar que la relación entre ambos parámetros es diferente según se hayan obtenido por SAC o por LIO, presentando los productos LIO una mayor humedad para un nivel similar de a_w , en términos generales.

Por último, con respecto a la fracción másica de sólidos solubles totales de cada polvo, también se obtienen diferencias estadísticamente significativas en función del tipo de residuo y/o de la técnica de deshidratación aplicada para su estabilización. Por un lado, los polvos LIO de col, puerro y zanahoria tienen una menor concentración de sólidos solubles que sus respectivos SAC, mientras que la tendencia se invierte en apio y brócoli. Este resultado sería indicativo de la interacción entre el tipo de residuo y la técnica de deshidratación empleada (p -valor interacción < 0.05). Por un lado, el método de secado puede dar lugar a una estructura y tamaño de partícula diferentes en función del tipo de hortaliza, permitiendo una mayor o menor extracción de sólidos solubles. Por otro lado, las características del producto tras la deshidratación modifican su comportamiento frente a la molienda, etapa durante la cual algunas fibras pueden romperse dando lugar a compuestos solubles más simples.

4.1.2. Tamaño de partícula

A continuación, en la figura 4, se encuentran representadas las curvas de distribución de los tamaños de partícula de los distintos productos en polvo obtenidos.

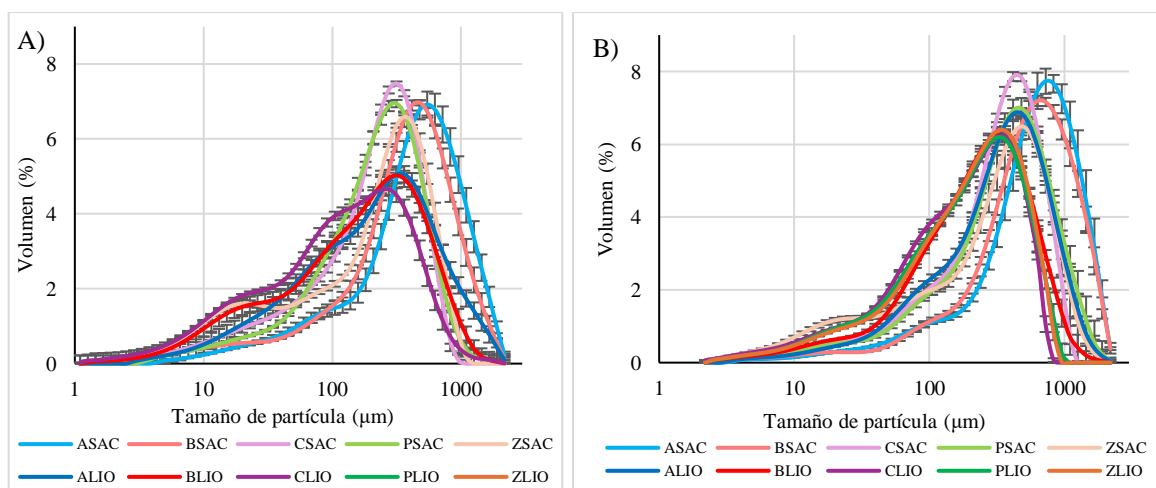


Figura 4. Tamaño de partícula de los polvos obtenidos mediante secado por aire caliente a 70 °C (SAC) o liofilización (LIO): **A)** medido por vía seca y **B)** medido por vía húmeda. A: apio; B: brócoli; C: col repollo; P: ajo puerro; Z: zanahoria.

Como se puede apreciar en la representación gráfica de la distribución del tamaño de partícula, los polvos obtenidos mediante SAC alcanzan valores superiores a los que se registran para los polvos LIO, aunque esto se aprecia mejor en los resultados del análisis por vía seca. Esta diferencia puede justificarse teniendo en cuenta la estructura porosa que se forma al sublimar el hielo de la muestra durante el proceso de liofilización, fenómeno que da lugar a una estructura más frágil y fácil de moler, lo que resulta en polvos más finos (Ahmed *et al.*, 2020). Por el contrario, la deshidratación mediante SAC generalmente provoca la contracción del tejido debido a la eliminación progresiva del agua desde la superficie del producto, además de darse en algunos casos fenómenos de encostramiento que limitan la transferencia de agua a través del tejido, lo que da lugar a una matriz

más gomosa y difícil de moler (Bas-Bellver *et al.*, 2023). Las hortalizas que resultaron en polvos con mayores tamaños de partícula fueron el apio y el brócoli tras el secado por aire caliente.

En todos los casos, la distribución del tamaño de partícula es monomodal, siendo más abundantes unas partículas de un cierto tamaño sobre el resto. En el caso de los polvos obtenidos mediante LIO las distribuciones que se obtienen tienen un mayor *span*, es decir, son más heterogéneas, sobre todo cuando se analizan por vía seca. En el análisis por vía húmeda, los tamaños de partícula más pequeños no se registran y las partículas de mayor tamaño son más abundantes, lo que puede deberse a que las partículas más pequeñas se hayan solubilizado en el agua (Bas-Bellver *et al.*, 2020) y a que se hayan formado agregados o a que las partículas hayan absorbido el agua empleada para la dispersión de las partículas (Bas-Bellver *et al.*, 2023).

A continuación, se presentan los parámetros característicos del tamaño de partícula medidos para todos los productos en polvo (tabla 2), donde D [4, 3] representa es el diámetro medio del volumen equivalente, D [3, 2] es el diámetro medio de la superficie equivalente, y los valores d (0,1), d (0,5) y d (0,9), indican los percentiles de la distribución del tamaño de partícula bajo los que se encuentran el 10%, el 50% y el 90% de las partículas, respectivamente. Estos parámetros permiten definir y caracterizar los tamaños de las partícula que componen los productos en polvo estudiados, y realizar el tratamiento estadístico que permite confirmar si existen o no diferencias estadísticamente significativas entre los mismos.

Tabla 2. Parámetros característicos del tamaño de partícula medidos por vía húmeda y por vía seca. Media \pm desviación estándar de 10 repeticiones en el caso de las medidas en vía húmeda y 5 en el caso de la vía seca de los productos en polvo obtenidos a partir de residuos de apio, brócoli, col repollo, ajo puerro y zanahoria, mediante secado por aire caliente a 70 °C (SAC) o liofilización (LIO).

VÍA HÚMEDA						
RESIDUO	SECADO	D [4, 3]	D [3, 2]	d (0,1)	d (0,5)	d (0,9)
APIO	SAC	637 \pm 39 ^h	173 \pm 11 ^h	107 \pm 7 ^g	570 \pm 41 ^h	1250 \pm 75 ^f
	LIO	380 \pm 21 ^e	112 \pm 3 ^f	60 \pm 2 ^f	318 \pm 12 ^e	782 \pm 50 ^d
BRÓCOLI	SAC	603 \pm 17 ^g	152 \pm 7 ^g	110 \pm 4 ^h	520 \pm 17 ^g	1216 \pm 33 ^f
	LIO	276 \pm 16 ^c	77,8 \pm 1,2 ^c	44,5 \pm 1,0 ^d	220 \pm 5 ^c	583 \pm 41 ^b
COL	SAC	335 \pm 4 ^d	89 \pm 2 ^d	51,4 \pm 0,9 ^e	308 \pm 3 ^{de}	658 \pm 11 ^c
	LIO	212 \pm 3 ^a	56,9 \pm 0,7 ^a	27,8 \pm 0,3 ^b	175 \pm 3 ^a	455 \pm 6 ^a
PUERRO	SAC	405 \pm 32 ^f	97 \pm 4 ^e	59 \pm 3 ^f	340 \pm 16 ^f	837 \pm 86 ^c
	LIO	233 \pm 8 ^b	64,6 \pm 1,1 ^b	30,8 \pm 0,7 ^c	191 \pm 7 ^b	500 \pm 21 ^a
ZANAHORIA	SAC	346 \pm 32 ^d	59 \pm 4 ^a	23 \pm 2 ^a	292 \pm 19 ^d	750 \pm 79 ^d
	LIO	234 \pm 4 ^b	65,7 \pm 0,9 ^b	32,3 \pm 0,5 ^c	196 \pm 4 ^b	496 \pm 10 ^a
VÍA SECA						
RESIDUO	SECADO	D [4, 3]	D [3, 2]	d (0,1)	d (0,5)	d (0,9)
APIO	SAC	506 \pm 30 ^e	136 \pm 9 ^g	68 \pm 8 ^f	424 \pm 33 ^e	1056 \pm 48 ^g
	LIO	308 \pm 64 ^c	66 \pm 10 ^d	29 \pm 5 ^c	206 \pm 62 ^c	730 \pm 142 ^e
BRÓCOLI	SAC	433 \pm 21 ^d	95 \pm 2 ^f	56 \pm 2 ^e	357 \pm 18 ^d	902 \pm 49 ^f
	LIO	235 \pm 17 ^b	43 \pm 5 ^b	17 \pm 2 ^a	164 \pm 19 ^b	551 \pm 35 ^b
COL	SAC	233 \pm 7 ^b	68,7 \pm 0,4 ^d	30,3 \pm 0,3 ^c	209 \pm 6 ^c	468 \pm 14 ^{bc}

	LIO	179 ± 10 ^a	33,1 ± 1,1 ^a	13,8 ± 0,4 ^a	116 ± 6 ^a	418 ± 23 ^{ab}
PUERRO	SAC	253 ± 14 ^b	79 ± 2 ^e	41,2 ± 1,1 ^d	211 ± 7 ^c	512 ± 29 ^{cd}
	LIO	165 ± 4 ^a	37,9 ± 1,0 ^{ab}	16,6 ± 0,7 ^a	132 ± 4 ^a	361 ± 5 ^a
ZANAHORIA	SAC	248 ± 13 ^b	43 ± 4 ^b	15,4 ± 1,1 ^a	214 ± 12 ^c	543 ± 23 ^d
	LIO	224 ± 16 ^b	58,0 ± 1,2 ^c	23,9 ± 0,7 ^b	170 ± 4 ^b	479 ± 24 ^{bcd}

Para un mismo tipo de análisis, letras diferentes (a, b, c...) en la misma columna indican diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95% (p-valor < 0,05).

Los parámetros que definen el tamaño de partícula confirman los resultados observados en las curvas de distribución. Tanto en el análisis por vía seca como por vía húmeda, los parámetros D [4, 3] y D [3, 2] son menores para los polvos LIO, a excepción de la zanahoria, para la que el parámetro D [3, 2] es mayor para el polvo liofilizado en ambos casos y el parámetro D [4, 3] no presenta diferencias estadísticamente significativas en el análisis por vía seca. También se observan valores menores en casi todos los percentiles para los polvos liofilizados, por lo que se puede concluir que al emplear la liofilización se obtienen polvos más finos que con el secado por aire caliente. Según se ha discutido anteriormente, esto se podría explicar debido a la estructura más frágil y porosa de los productos liofilizados.

4.2 Propiedades Antioxidantes

4.2.1 Contenido en fenoles y flavonoides totales

Para las medidas de fenoles y flavonoides totales, representadas en las gráficas de la figura 5, se encontraron diferencias estadísticamente significativas en función de la hortaliza y de la técnica de deshidratación empleadas. En el caso de los fenoles totales, los polvos LIO presentaron menor cantidad de estos compuestos, a excepción de los polvos de apio y de brócoli, para los que no se observaron diferencias entre los polvos obtenidos por una u otra técnica de deshidratación. Los polvos de brócoli son los que cuentan con un mayor contenido en fenoles, seguidos de los de puerro, col, zanahoria, y por último los de apio. La diferencia entre ambas técnicas de secado puede deberse a diversos motivos. Por un lado, las elevadas temperaturas utilizadas durante el SAC podrían ocasionar la degradación de determinados compuestos bioactivos presentes en la materia prima, tales como ciertas vitaminas y antioxidantes, reduciendo el valor nutricional del producto final (Wang *et al.*, 2017; Ratti, 2001). Por otro lado, se ha demostrado que la temperatura también puede promover reacciones bioquímicas que pueden mejorar las propiedades antioxidantes del producto, entre las cuales encontramos las reacciones de Maillard, reacciones enzimáticas, como la hidrólisis de glucosinolatos a isotiocianatos en col y brócoli por la enzima mirosinasa, o bien isomerización a formas más activas, como la isomerización trans-cis que dan lugar a formas de carotenoides más reactivas (Bas-Bellver *et al.*, 2023; Honda *et al.*, 2023). Finalmente, la temperatura también puede inhibir la acción de enzimas pro-oxidantes, dando lugar a productos con propiedades antioxidantes mejoradas.

En cuanto a los flavonoides totales, las tendencias encontradas fueron similares para todos los productos, excepto para los polvos de col, en los que los productos LIO mejoraron su contenido en flavonoides con respecto a los polvos SAC. Conviene señalar que en todos los casos los resultados dieron lugar a una concentración mayor de flavonoides equivalentes que de fenoles equivalentes, lo cual podría resultar un resultado dudoso dado que los flavonoides son un tipo de compuestos fenólicos. Cabe destacar que estos métodos colorimétricos tienen ciertas limitaciones en muestras complejas como los alimentos, en los que pueden existir una gran variedad de compuestos que absorban en diferentes longitudes de onda tras reaccionar. En particular, la determinación

espectrofotométrica de flavonoides está especialmente condicionadas por este hecho (Denni & Mammen, 2013; Seguí et al., 2013). Por ejemplo, al reaccionar con el $AlCl_3$, los flavonoles exhiben su máximo alrededor de 440 nm, mientras que la mayoría de las flavonas absorben por debajo de 400 nm. No obstante, el método colorimétrico del cloruro de aluminio utilizando quercetina como estándar está generalizado para determinar el contenido de flavonoides en alimentos (Luximon-Ramma et al., 2002; Lin & Tang, 2007) sin tener en cuenta estas consideraciones, debido a su sencillez, rapidez y reproducibilidad.

Para los polvos SAC, el puerro es el que tiene más flavonoides, seguido del brócoli, la zanahoria, la col y el apio, y para los polvos LIO, la hortaliza que más flavonoides tiene es la col, seguida del brócoli, el puerro, la zanahoria y el apio. Baharun *et al.* (2004) encuentra que el contenido en fenoles y flavonoides de brócoli sin procesar es mayor que para la col, que a su vez es superior a los valores obtenidos para la zanahoria. En cuanto al puerro, Bernaert *et al.* (2012) estudia varias variedades de esta hortaliza en fresco y determina que los valores de fenoles totales se encuentran entre 5 y 15 mg EGA/g materia seca para todas las variedades, siendo estos valores mayores a los obtenidos para los polvos producidos. Por último, si se comparan los resultados obtenidos en fenoles totales de raíces de apio sin procesar y hervidas del estudio realizado por Salamatullah et al. (2021) se puede apreciar una gran disminución del contenido de estos compuestos en las raíces hervidas en comparación con las control, siendo los valores de las hervidas más parecidos a los obtenidos para los productos en polvo.

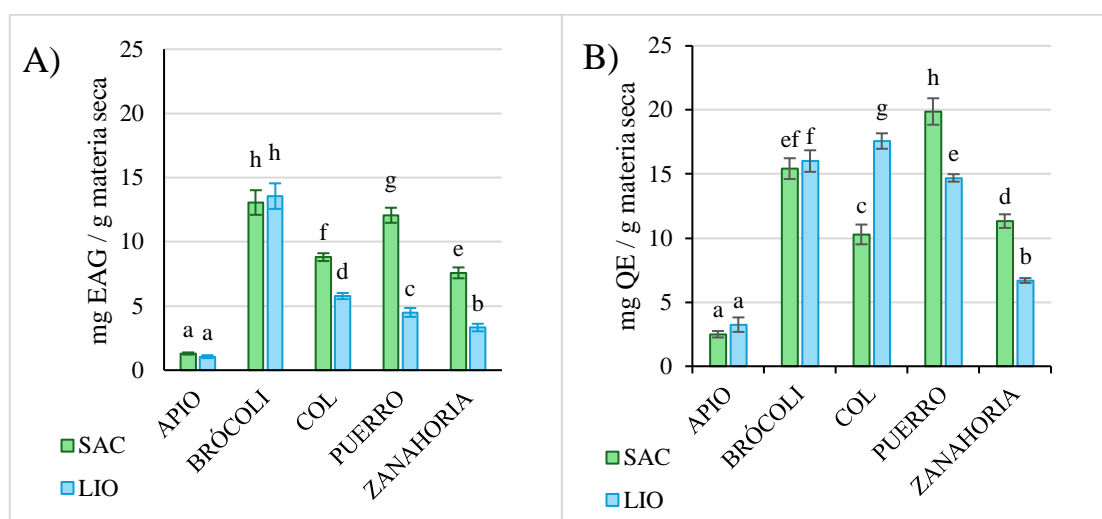


Figura 5. A) Fenoles totales expresados como miligramos de ácido gálico equivalentes (EAG) por gramo de materia seca de los productos en polvo de apio, brócoli, col repollo, ajo puerro y zanahoria, obtenidos mediante secado por aire caliente a 70 °C (SAC) o liofilización (LIO). **B)** Flavonoides totales expresados como miligramos de quercetina equivalentes (QE) por gramo de materia seca de los productos en polvo de apio, brócoli, col repollo, ajo puerro y zanahoria, obtenidos mediante secado por aire caliente a 70 °C (SAC) o liofilización (LIO). Letras diferentes (^{a, b, c,...}) en las distintas columnas de un mismo gráfico indican diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95% (p-valor < 0,05).

4.2.2 Actividad antioxidante: por los métodos ABTS y DPPH

En la figura 6 se representan los gráficos de la actividad antioxidante medida para cada producto en polvo por los métodos de inhibición de los radicales libres ABTS y DPPH. En ambos casos, los polvos obtenidos mediante SAC muestran una mayor actividad antioxidante, aunque esta diferencia es más acusada cuando se emplea el método del radical ABTS. Esto puede deberse

nuevamente a las reacciones de Maillard que se dan durante el proceso de secado por aire caliente, ya que muchos productos de estas reacciones tienen actividad antioxidante (Acton y Dawson, 2004). También pueden ser responsables de la mejora en las propiedades antioxidantes otras reacciones bioquímicas o enzimáticas, como la hidrólisis de glucosinolatos a isotiocianatos en brassicas, como son el brócoli y la col, debida a la liberación de la enzima mirosinasa gracias a la desestructuración de los tejidos, y al aumento de su actividad por las altas temperaturas utilizadas en el SAC.

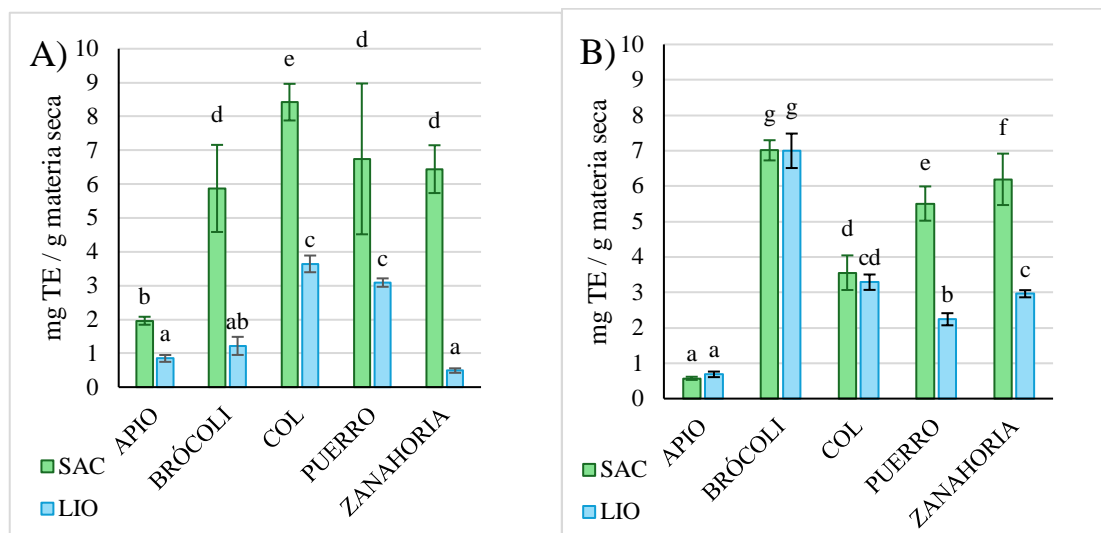


Figura 6. Actividad antioxidante, expresada en miligramos de trólox equivalentes (TE) por gramo de materia seca, de los productos en polvo de apio, brócoli, col repollo, ajo puerro y zanahoria, obtenidos mediante secado por aire caliente a 70 °C (SAC) o liofilización (LIO). **A)** medida por el método del radical ABTS y **B)** medida por el método del radical DPPH. Letras diferentes (a, b, c, ...) en las distintas columnas de un mismo gráfico indican diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95% (p-valor < 0,05).

Cuando se emplea el método del radical ABTS el polvo SAC con mayor poder antioxidante sería el de col, seguido del de puerro, zanahoria, brócoli y apio; y, en el caso de los polvos LIO, el polvo de brócoli y puerro tendrían una actividad antioxidante superior a la del resto de polvos, incluido el de zanahoria. Según el método del radical DPPH, el polvo de brócoli es el que presenta, con independencia de la técnica de deshidratación empleada, un mayor poder antioxidante, seguido de los polvos de zanahoria, puerro, col y apio, en los polvos SAC, y seguida de los polvos de col, zanahoria, puerro y apio para los polvos LIO. Las diferencias encontradas entre los dos métodos utilizados pueden deberse al comportamiento particular que tenga cada radical libre con los distintos compuestos fenólicos que se encuentran en cada polvo. Por ejemplo, el radical DPPH no reacciona con algunas dihidrochalconas, y los ácidos hidroxicinámicos dan valores mayores para los ensayos con el radical ABTS que los ácidos hidroxibenzoicos, cosa que no ocurre con el DPPH (Platzer *et al.*, 2021). Es por ello por lo que se suelen combinar ambos ensayos a la hora de determinar la capacidad antioxidante. El ABTS es un buen método para identificar antioxidantes hidrofílicos y lipofílicos para gran cantidad de alimentos, y es soluble en disolventes acuosos y orgánicos (Cano *et al.*, 2000). Los antioxidantes neutralizan el catión por reducción directa por donación de electrones o por donación de átomos de hidrógeno (Prior *et al.*, 2005). En el caso del DPPH, este reacciona principalmente por donación de electrones (Prior *et al.*, 2005), además de que su interacción con los antioxidantes se encuentra determinada por la conformación estructural de estos, siendo un mecanismo más complejo y lento en la mayoría de los casos (Brand-Williams *et al.*, 1995). Además, una limitación de este método sería la superposición de los espectros de absorción que absorben en

la misma longitud de onda que el DPPH, como por ejemplo los carotenoides (Martínez las Heras *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2007).

Si se comparan estos resultados con los obtenidos para el contenido en fenoles y flavonoides totales, tiene sentido que en los polvos de brócoli y puerro haya una mayor actividad antioxidante, por tener mayor concentración de estos compuestos, así como que los polvos de apio muestren una baja actividad antioxidante, por la baja cantidad de fenoles y flavonoides con las que cuentan. Además, comparando los resultados obtenidos con los de otros estudios en los que se emplean las mismas condiciones para la obtención de los polvos, el brócoli tiene una mayor concentración de estos y una mayor actividad antioxidante que la col (Bas-Bellver *et al.*, 2022), y la col tendría una mayor concentración en fenoles que la zanahoria, aunque la actividad antioxidante sea mayor en uno u otro según el método utilizado, siendo ambos superiores que los valores obtenidos para el apio en todos los casos (Bas-Bellver *et al.*, 2020). En el estudio de Bahorun *et al.* (2004) se estudia la actividad antioxidante de muestras sin procesar de varias hortalizas por los métodos TEAC y FRAP, siendo la de brócoli mayor que la col y mayor que la de zanahoria. Algo a destacar es la mínima variación que existe entre los polvos de apio, brócoli y col al emplear el método del radical DPPH. Esta consistencia en los resultados también se observa para apio y brócoli en el contenido de fenoles y flavonoides totales. Esto podría deberse a que la composición en fenoles y flavonoides no se haya visto prácticamente afectada por el método de deshidratación utilizado y que estos compuestos sean los que tengan una mayor afinidad para reaccionar con el radical DPPH. En el caso del ABTS, los compuestos que formen parte de los polvos LIO no deben tener una alta reactividad frente a este radical y por ello se registran menores valores de actividad antioxidante para esas muestras en ese ensayo. Como se ha mencionado anteriormente, los ácidos hidroxicinámicos muestran una mayor actividad que los hidroxibenzoicos frente al radical ABTS, pero no ante el DPPH (Platzer *et al.*, 2021).

4.2.3 Compuestos fenólicos específicos determinados mediante HPLC

En la tabla 3 se muestran los compuestos fenólicos identificados y cuantificados mediante la técnica de HPLC en extractos metanol-agua al 80% (v/v) de cada producto en polvo producido. Las concentraciones se expresan en mg de compuesto fenólico por cada 100 g de materia seca. Los compuestos fenólicos pinchados en el mix de patrones utilizado fueron los siguientes: ácido sinápico, ácido cafeico, ácido p-cumárico, ácido ferúlico, 4-O-cafeoilquinico, ácido trans-cinámico, ácido gálico, vainillina, ácido 4-hidroxibezoico, epicatequina, 3-glucósido de quercitina, rutina, quercitrina, naringenina, apigenina-7-glucósido, quercetina y kaempferol. De entre estos compuestos incluidos en el mix, se identificaron todos en casi todas las muestras, a excepción de quercetina y kaempferol, que no se identificaron en ninguno de los productos en polvo.

Para el total de compuestos fenólicos identificados, el polvo de zanahoria destacó por presentar una concentración significativamente mayor, siendo la epicatequina el compuesto mayoritario. A la zanahoria le sigue el brócoli, cuyo compuesto mayoritario es la epicatequina también. Los siguientes polvos con mayor concentración de compuestos fenólicos son los de puerro, siendo la apigenina-7-glucósido el más abundante. A continuación, los polvos de residuo de apio, en los que mayormente se encuentra epicatequina. Finalmente, los polvos de col serían los que tendrían una menor concentración de compuestos fenólicos, entre los que se encuentra mayormente la rutina. Como compuesto mayoritario del polvo de col LIO se encuentra el 4-O-cafeoilquinico en el doble de concentración que la rutina, por lo que resulta extraño no haber encontrado nada en el polvo SAC.

En la tabla 3, los compuestos fenólicos identificados se han clasificado en ácidos hidroxicinámicos, ácidos hidroxibenzoicos y flavonoides, siendo los ácidos hidroxicinámicos los compuestos fenólicos más abundantes en plantas (Zhang *et al.*, 2019). De los compuestos identificados, los más abundantes en las muestras analizadas fueron los flavonoides, a excepción de

los polvos de puerro y de los de col LIO. En el caso de los polvos de puerro, en los polvos SAC destacan los ácidos hidroxicinámicos, y en los LIO se encuentran las mismas concentraciones de flavonoides y de ácidos hidroxicinámicos. En los polvos de col LIO los compuestos mayoritarios son ácidos hidroxicinámicos.

La abundancia de unos u otros compuestos fenólicos dentro de un mismo material vegetal puede variar en función del tratamiento postcosecha o el procesado. Por ejemplo, en el caso de la zanahoria, Augõpõle *et al.* (2017) evidenciaron un incremento de más del 87% en el contenido en epicatequina tras 6 meses de almacenamiento, pasando de ser el compuesto menos abundante a ser el compuesto prevalente. Por su parte, Hernández-Ortega *et al.* (2013) comprobaron la presencia de β -caroteno, ácido gálico, epicatequina y catequina en bagazo de zanahoria deshidratado por diferentes métodos, siendo el ácido gálico el compuesto más abundante, y encontrando diferencias significativas entre el bagazo secado por aire caliente y el bagazo secado por microondas. En el caso del brócoli, Vega-Galvez *et al.* (2023) compara muestras de brócoli seco empleando diversos métodos de deshidratación (secado a vacío a baja temperatura, secado convectivo, secado por infrarrojos y liofilización) y encuentra que en el brócoli secado por secado a vacío a baja temperatura es en la única muestra en la que se encuentra ácido cafeico, y en la que mayores concentraciones de ácido clorogénico y ferúlico hay. Pasando al puerro, Radovanović *et al.* (2015) realiza un estudio comparativo entre extractos de hojas y tallos de puerros identificando bastantes compuestos fenólicos, siendo en las hojas el más abundante la quercetina y en los tallos la quercetina y el ácido rosmarínico. En cuanto al apio, en el estudio de Sorour *et al.* (2015) en el que se comparan muestras de apio fresco con muestras de apio secados a 50 °C y 90 °C, el compuesto fenólico mayoritario en todas las muestras es el ácido elálgico, encontrándose este en mayor concentración en la muestra secada a 90 °C, luego en la secada a 50 °C, y siendo la muestra fresca la de menor concentración. Además, se identifican varios flavonoides, siendo la quercetrina el más abundante, encontrándose en mayor cantidad nuevamente en la muestra secada a 90 °C.

Comparando los resultados obtenidos por HPLC con los obtenidos mediante métodos espectrofotométricos (fenoles y flavonoides totales) destaca la gran cantidad de compuestos identificados para los polvos de zanahoria, ya que los polvos con mayor concentración de fenoles totales según Folin-Ciocalteau son los de brócoli y los que tienen mayor cantidad de flavonoides totales son los de puerro SAC. En cuanto a los resultados de capacidad antioxidante, los polvos de brócoli son los que mayor capacidad antioxidante presentan por el método del radical DPPH, mientras que por el método del radical ABTS son los de col SAC. Estos son los polvos en los que menor cantidad de compuestos fenólicos se encuentran. Estas discrepancias entre los resultados entre los distintos métodos pueden deberse a diversos factores. Por un lado, el mix de patrones empleados no contemplaba todos los compuestos que pueden encontrarse en las muestras, por lo que es posible que no se hayan cuantificado una cantidad de compuestos fenólicos que puede resultar relevante para sus propiedades antioxidantes. Según puede apreciarse en los cromatogramas obtenidos (ver ejemplo en Figura 7) existe un número significativo de picos por identificar. Por otro lado, cabe destacar que tanto los métodos de capacidad antioxidante como el método de Folin-Ciocalteau son métodos basados en la transferencia de electrones o donación de átomos de hidrógeno, de modo que miden la reactividad de los compuestos antioxidantes presentes. Además, el resultado de algunas de estas reacciones está significativamente influenciadas por la estructura molecular del compuesto y por el tiempo de reacción, especialmente la reacción con el radical DPPH. Por lo tanto, no son de extrañar las posibles contradicciones entre los métodos espectrofotométricos y la cuantificación por HPLC, de acuerdo con las limitaciones de las técnicas espectrofotométricas. El resto de los cromatogramas de los demás productos en polvo, así como el del mix de patrones se encuentran en el anexo I.

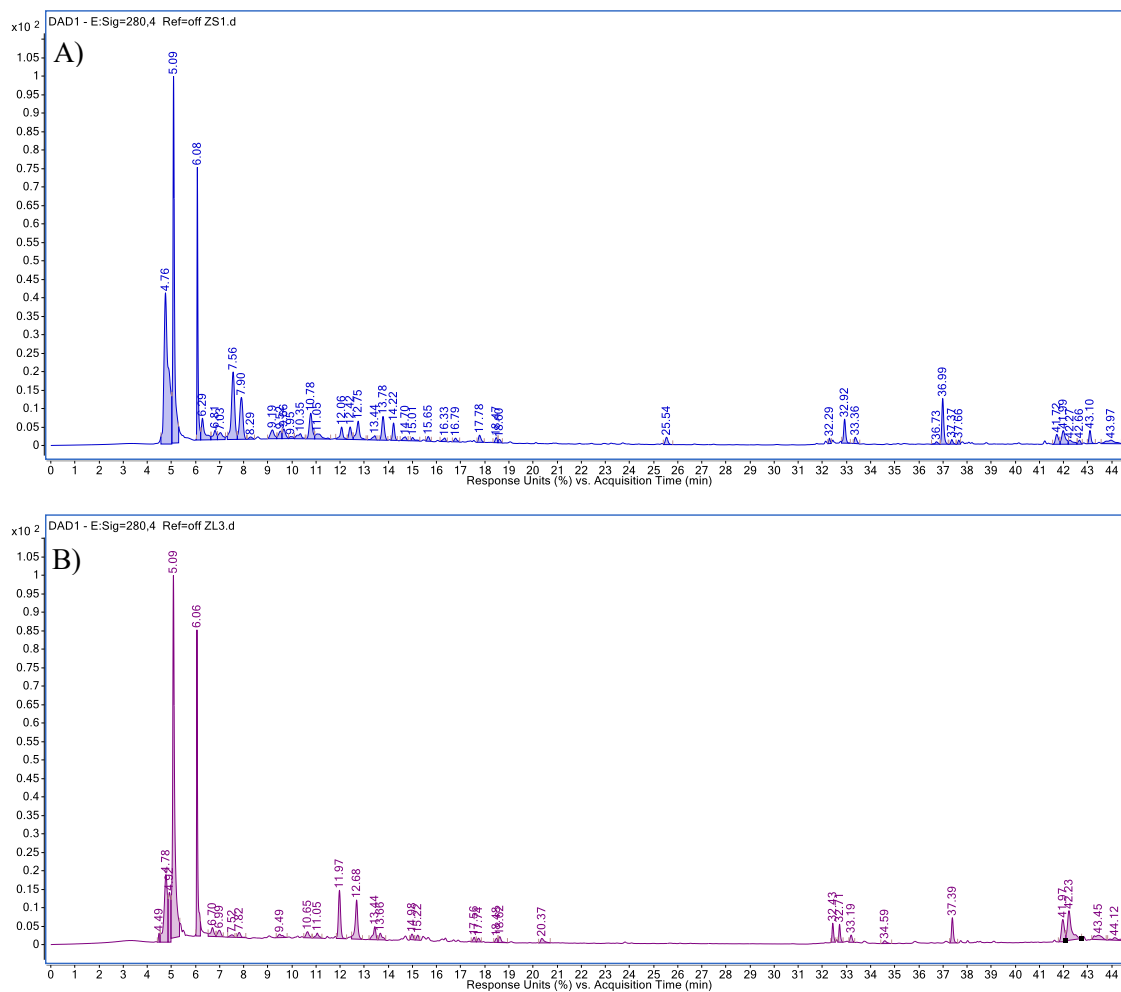


Figura 7. Cromatogramas para la identificación de compuestos fenólicos por HPLC de los extractos de zanahoria **A)** SAC y **B)** LIO.

Tabla 3. Compuestos fenólicos identificados mediante HPLC expresados en mg por cada 100 g de masa seca (ms) de los productos en polvo de apio, brócoli, col repollo, ajo puerro y zanahoria, obtenidos por secado por aire caliente a 70 °C (SAC) o por liofilización (LIO). Media \pm desviación estándar de 2 repeticiones.

		Compuestos Fenólicos (mg / 100 g ms)																		
		Ácidos hidroxicinámicos							Ácidos hidroxibenzoicos				Flavonoides							
RESIDUO	SECADO	Ácido sinápico	Ácido cafeico	Ácido p-cumárico	Ácido ferúlico	4-O-Cafeoil quínico	Ácido trans-cinámico	Total	Ácido gálico	Vainillina	Ácido 4-hidroxibenzoico	Total	Epicat equina	3-glucósido de quercitina	Rutina	Quercitrina	Naringenina	Apigenina-7-glucósido	Total	Total
APIO	SAC	0,72 \pm 0,05 ^{ab}	0,437 \pm 0,013 ^a	0,56 \pm 0,05 ^{abc}	0,787 \pm 0,014 ^a	0,716 \pm 0,010 ^b	0,37 \pm 0,03 ^a	3,61 \pm 0,04 ^a	1,27 \pm 0,12 ^b	0,92 \pm 0,013 ^a	0,76 \pm 0,02 ^b	3,02 \pm 0,04 ^b	22,4 \pm 0,3 ^a	0,66 \pm 0,05 ^a	0,67 \pm 0,12 ^a	0,4919 \pm 0,0012 ^{ab}	nd	1,662 \pm 0,006 ^{ab}	26,1 \pm 0,7 ^c	31,8 \pm 0,2 ^b
	LIO	0,59 \pm 0,04 ^a	0,95 \pm 0,09 ^{ab}	0,424 \pm 0,013 ^{ab}	0,89 \pm 0,08 ^a	1,60 \pm 0,04 ^d	nd	4,46 \pm 0,10 ^{ab}	0,488 \pm 0,005 ^a	0,886 \pm 0,007 ^a	0,3671 \pm 0,0005 ^a	1,7413 \pm 0,0017 ^a	25,5 \pm 0,5 ^a	0,72 \pm 0,05 ^{ab}	0,64 \pm 0,18 ^a	0,609 \pm 0,005 ^{bc}	nd	0,74 \pm 0,02 ^a	28,2 \pm 0,3 ^c	32,8 \pm 0,3 ^b
BRÓCOLI	SAC	1,959 \pm 0,004 ^c	1,60 \pm 0,11 ^c	0,531 \pm 0,006 ^{abc}	0,695 \pm 0,009 ^a	0,47 \pm 0,03 ^a	0,342 \pm 0,015 ^a	5,55 \pm 0,06 ^{bc}	8,74 \pm 0,13 ^c	1,7989 \pm 0,0013 ^{ab}	nd	10,54 \pm 0,13 ^f	34 \pm 3 ^b	0,95 \pm 0,17 ^c	3,7 \pm 0,6 ^{cd}	0,77 \pm 0,19 ^c	2,25 \pm 0,05 ^c	1,36 \pm 0,07 ^{ab}	41,41 \pm 0,09 ^e	57,0 \pm 0,2 ^c
	LIO	1,4 \pm 0,2 ^{bc}	2,49 \pm 0,13 ^d	0,58 \pm 0,05 ^{bc}	1,63 \pm 0,04 ^b	0,42 \pm 0,04 ^a	nd	6,6 \pm 0,4 ^c	1,79 \pm 0,15 ^c	1,36 \pm 0,08 ^a	nd	3,1 \pm 0,2 ^{bc}	25,6 \pm 1,0 ^a	1,13 \pm 0,11 ^d	3,4 \pm 0,4 ^c	0,69 \pm 0,05 ^c	1,488 \pm 0,011 ^b	2,19 \pm 0,05 ^b	34,8 \pm 1,8 ^d	44,1 \pm 1,2 ^d
COL	SAC	1,0 \pm 0,2 ^{ab}	0,77 \pm 0,05 ^a	1,41 \pm 0,08 ^d	1,06 \pm 0,13 ^a	nd	nd	4,19 \pm 0,03 ^{ab}	nd	2,91 \pm 0,14 ^b	1,13 \pm 0,17 ^c	4,04 \pm 0,03 ^c	nd	0,914 \pm 0,012 ^c	4,9 \pm 0,3 ^{ef}	nd	nd	nd	5,8 \pm 0,3 ^a	14,0 \pm 0,3 ^a
	LIO	0,77 \pm 0,06 ^{ab}	1,41 \pm 0,15 ^{bc}	0,62 \pm 0,05 ^c	0,925 \pm 0,012 ^a	12,64 \pm 0,10 ^f	nd	16,27 \pm 0,18 ^e	0,53 \pm 0,05 ^a	2,5 \pm 0,2 ^b	2,65 \pm 0,06 ^f	5,51 \pm 0,04 ^d	nd	0,96 \pm 0,06 ^{cd}	6,4 \pm 0,3 ^g	nd	0,4 \pm 0,06 ^a	nd	7,8 \pm 0,3 ^a	17,0 \pm 0,3 ^a
PUERRO	SAC	8,49 \pm 0,09 ^e	0,68 \pm 0,14 ^a	3,3 \pm 0,2 ^f	7,2 \pm 0,5 ^d	nd	nd	19,6 \pm 0,6 ^f	nd	5,0 \pm 0,8 ^c	2,27 \pm 0,17 ^e	7,28 \pm 1,01 ^e	nd	0,9 \pm 0,21 ^{bc}	4,4 \pm 0,5 ^{de}	nd	nd	9,16 \pm 1,36 ^d	14,42 \pm 1,08 ^b	41,3 \pm 1,4 ^{cd}
	LIO	6,9 \pm 1,1 ^d	1,36 \pm 0,21 ^{bc}	1,63 \pm 0,10 ^e	6,17 \pm 0,34 ^c	nd	nd	16,2 \pm 1,6 ^e	nd	5,94 \pm 1,18 ^{cd}	1,53 \pm 0,22 ^d	7,5 \pm 0,9 ^e	nd	nd	5,55 \pm 1,05 ^{fg}	nd	nd	10,53 \pm 0,87 ^e	16,08 \pm 0,18 ^b	39,7 \pm 2,7 ^c
ZANAHORIA	SAC	0,8 \pm 0,2 ^{ab}	0,49 \pm 0,08 ^a	0,58 \pm 0,18 ^{bc}	1,6 \pm 0,16 ^b	0,967 \pm 0,013 ^c	nd	4,6 \pm 0,3 ^{ab}	2,82 \pm 0,18 ^d	6,1 \pm 0,7 ^d	1,410 \pm 0,015 ^d	9,87 \pm 0,13 ^f	97,4 \pm 1,6 ^d	0,99 \pm 0,08 ^{cd}	1,27 \pm 0,18 ^{ab}	0,98 \pm 0,04 ^d	nd	4,01 \pm 0,02 ^c	104,8 \pm 1,5 ^g	118,3 \pm 1,7 ^g
	LIO	0,93 \pm 0,18 ^{ab}	5,7 \pm 0,9 ^e	0,397 \pm 0,008 ^a	1,01 \pm 0,03 ^a	2,01 \pm 0,02 ^e	nd	10,1 \pm 1,1 ^d	nd	11,5 \pm 0,4 ^e	1,42 \pm 0,02 ^d	12,69 \pm 0,15 ^g	91 \pm 3 ^c	0,60 \pm 0,013 ^a	1,68 \pm 0,05 ^b	0,40 \pm 0,07 ^a	nd	1,404 \pm 0,002 ^{ab}	93,9 \pm 1,5 ^f	115 \pm 3 ^f

Letras diferentes (a, b, c...) en la misma fila indican diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95% (p-valor < 0,05).

4.3 Propiedades Antimicrobianas

4.3.1 Ensayos de inhibición en placa

En la tabla 4 se muestran los diámetros de los halos de inhibición producidos por los discos empleados con extractos de cada producto en polvo al enfrentarlos a cultivos de *Listeria*, *S. aureus*, *Salmonella* y *E. coli*.

Tabla 4. Diámetros medidos (cm) de los halos de inhibición producidos por discos con extractos de los productos en polvo de apio, brócoli, col repollo, ajo puerro y zanahoria, obtenidos por secado por aire caliente (SAC) o por liofilización (LIO).

RESIDUO	SECADO	DIAMETRO HALOS DE INHIBICIÓN (cm)			
		<i>Listeria</i>	<i>S. aureus</i>	<i>Salmonella</i>	<i>E. coli</i>
APIO	SAC	1,55 ± 0,14 ^{bcd}	1,93 ± 0,12 ^{cd}	0,62 ± 0,04 ^a	-
	LIO	1,7 ± 0,3 ^{cde}	1,48 ± 0,04 ^{ef}	0,62 ± 0,04 ^a	-
BRÓCOLI	SAC	1,7 ± 0,4 ^{cde}	1,05 ± 0,16 ^{cde}	0,98 ± 0,12 ^b	-
	LIO	1,8 ± 0,5 ^e	0,88 ± 0,15 ^{cd}	1,03 ± 0,08 ^b	-
COL	SAC	1,4 ± 0,2 ^{bc}	0,4 ± 0,4 ^{ab}	0,72 ± 0,08 ^a	-
	LIO	1,7 ± 0,2 ^{de}	0,65 ± 0,05 ^{bc}	1,2 ± 0,10 ^a	-
PUERRO	SAC	1,07 ± 0,05 ^a	1,30 ± 0,09 ^{def}	0,67 ± 0,08 ^a	-
	LIO	1,6 ± 0,2 ^{cde}	1,47 ± 0,14 ^{ef}	0,80 ± 0,06 ^{ab}	-
ZANAHORIA	SAC	1,45 ± 0,10 ^{bcd}	-	0,70 ± 0,10 ^a	-
	LIO	1,3 ± 0,14 ^{ab}	1,73 ± 0,06 ^f	0,62 ± 0,04	-

Letras diferentes (^a, ^b, ^c,...) en la misma columna indican diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95% (p-valor < 0,05).

En los ensayos realizados en las placas de *E. coli* no se apreció la formación de halos de inhibición. De forma general, los halos producidos en las placas de *Listeria* son mayores que los que se producen frente a las otras bacterias, a pesar de que el mayor halo registrado lo producen los extractos de apio secado por aire caliente frente a *S. aureus*, esto resulta curioso, ya que los polvos de apio eran los que tenían una menor concentración de fenoles y flavonoides totales, así como la actividad antioxidante más baja. De los halos que se producen en las placas de *Listeria*, los de mayor tamaño son los de brócoli liofilizado. El polvo de brócoli LIO es el que cuenta con mayores concentraciones de fenoles y flavonoides totales y actividad antioxidante. Los halos producidos se pueden observar en la figura 8.

Listeria es un patógeno responsable de causar listeriosis, enfermedad que cursa como una gastroenteritis o un resfriado leve en pacientes sanos, pero que puede llegar a ser mortal en pacientes inmunodeprimidos causando meningitis y septicemias, además de que puede causar abortos en embarazadas (Thakur *et al.*, 2018; Grigore-Gurgu *et al.*, 2022). Esta enfermedad se contrae por ingerir alimentos que contengan esta bacteria, entre los que se encuentran la carne de cerdo y derivados, el pescado y los productos a base de pescado, verduras, zumos y productos lácteos distintos del queso (Grigore-Gurgu *et al.*, 2022). Teniendo en cuenta que los extractos de estos productos en polvo han sido capaces de generar halos de inhibición contra esta bacteria, sería interesante seguir estudiando su potencial como antimicrobianos, ya que podrían complementar a los antimicrobianos químicos o de síntesis como conservantes de alimentos.

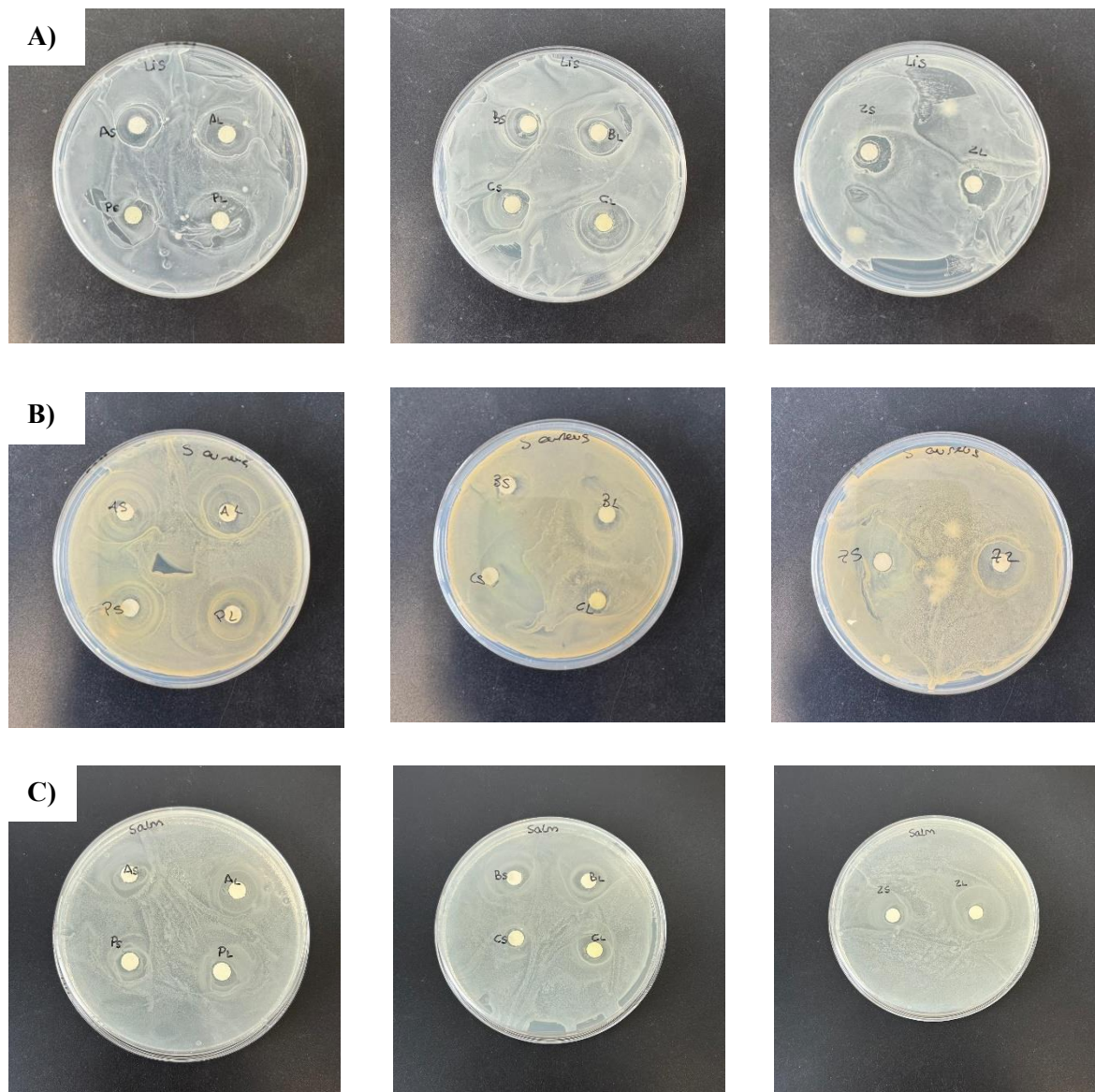


Figura 8. A) Resultado del ensayo de inhibición en placa en *Listeria innocua*. **B)** Resultado del ensayo de inhibición en placa en *Staphylococcus aureus*. **C)** Resultado del ensayo de inhibición en placa de *Salmonella* entérica. Se enfrentan los microorganismos a extractos metanol-agua al 80% (v/v) de los distintos productos en polvo producidos, siendo estos apio (A), brócoli (B), col repollo (C), ajo puerro (P) y zanahoria (Z), secados por aire caliente a 70°C (S) o liofilizados (L).

4.3.2 Concentración mínima inhibitoria (CMI)

Después de realizar los ensayos de inhibición se trató de determinar la concentración mínima inhibitoria. Para ello se utilizó el método de microdilución en caldo y se registraron las absorbancias a tiempo 0 y a las 24 h de los cultivos en caldo a los que se les había añadido distintas concentraciones de extracto acuoso de los productos en polvo. Estas absorbancias se recogen en las tablas 5, 6, 7 y 8. Además de las absorbancias, se incluyen los incrementos absolutos y relativos de estas pasadas las 24 h de incubación a 37 °C de las placas.

Como se puede observar en las tablas, en todas las concentraciones de todos los extractos hay un incremento positivo de las absorbancias a las 24 h, lo que indica que habría habido crecimiento de los cultivos, a excepción de dos extractos de apio LIO frente a *S. aureus*, en los

que el incremento es negativo. En algunos casos hay un mayor aumento de absorbancia en los extractos más concentrados, contrariamente a lo esperable, como es el caso del apio liofilizado frente a *Listeria*. En otros casos, los extractos más concentrados tienen incrementos menores que los que se dan en los menos concentrados, como es el caso de los extractos de col y brócoli SAC frente a *S. aureus*, siendo estos dos los que tienen el menor incremento positivo de absorbancia en los extractos más concentrados. Además de estos, hay muchos casos en los que no se ve clara una tendencia, pero, aun así, en todos los pocillos hubo crecimiento microbiano.

Conviene destacar que los extractos de los productos en polvo son compuestos coloreados, por lo que las medidas de absorbancias se ven afectadas por ellos también, no dependiendo únicamente del crecimiento microbiano. Además, los extractos acuosos empleados para este ensayo provenían de otros extractos en metanol-agua al 80% (v/v) que fueron rotaevaporados para eliminar el disolvente, y reconstituídos en agua destilada estéril. La temperatura empleada para evaporar el disolvente inicial se incrementó para conseguir evaporar la totalidad del disolvente (hasta 40 °C), por lo que podrían haberse degradado compuestos importantes para la acción antimicrobiana de los polvos, afectando así a los resultados del CMI. Sería interesante repetir esta parte del experimental, teniendo en cuenta las limitaciones asociadas al color de los extractos, y evitando la degradación de compuestos durante la rotaevaporación.

Tabla 5. Medidas de absorbancia e incrementos de absorbancia absolutos y relativos de los ensayos de concentración mínima inhibitoria por el método de microdilución en caldo de los extractos acuosos de los polvos de apio, brócoli, col, puerro y zanahoria obtenidos mediante secado por aire caliente (SAC) o liofilización (LIO) frente a *Listeria*. Extractos ordenados del 1 al 4 del más concentrado al menos concentrado: 0,1 g/mL, 0,05 g/mL, 0,0025 g/mL y 0,0125 g/mL.

<i>LISTERIA</i>																	
APIO																	
620 nm				492 nm					620 nm				492 nm				
EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto
LIO 1	0,08	0,64	700%	0,56	0,095	0,832	776%	0,74	SAC 1	0,086	0,454	428%	0,37	0,099	0,634	540%	0,54
LIO 2	0,084	0,625	644%	0,54	0,097	0,863	790%	0,77	SAC 2	0,093	0,562	504%	0,47	0,107	0,804	651%	0,70
LIO 3	0,085	0,381	348%	0,30	0,095	0,561	491%	0,47	SAC 3	0,088	0,4	355%	0,31	0,1	0,573	473%	0,47
LIO 4	0,091	0,417	358%	0,33	0,108	0,59	446%	0,48	SAC 4	0,088	0,412	368%	0,32	0,104	0,591	468%	0,49
Control +	0,094	0,279	197%	0,19	0,104	0,386	271%	0,28	Control +	0,082	0,261	218%	0,18	0,093	0,353	280%	0,26
Control -	0,101	0,094	-7%	-0,01	0,105	0,096	-9%	-0,01	Control -	0,092	0,093	1%	0,00	0,096	0,095	-1%	0,00
BRÓCOLI																	
620 nm				492 nm					620 nm				492 nm				
EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto
LIO 1	0,08	0,861	976%	0,78	0,125	1,105	784%	0,98	SAC 1	0,093	0,563	505%	0,47	0,151	0,759	403%	0,61
LIO 2	0,082	1,038	1166%	0,96	0,11	1,292	1075%	1,18	SAC 2	0,095	0,437	360%	0,34	0,137	0,624	355%	0,49
LIO 3	0,078	0,873	1019%	0,80	0,097	1,153	1089%	1,06	SAC 3	0,091	0,447	391%	0,36	0,112	0,622	455%	0,51
LIO 4	0,081	1,036	1179%	0,96	0,106	1,293	1120%	1,19	SAC 4	0,08	0,496	520%	0,42	0,107	0,707	561%	0,60
Control +	0,083	0,567	583%	0,48	0,095	0,792	734%	0,70	Control +	0,081	0,309	281%	0,23	0,09	0,427	374%	0,34
Control -	0,093	0,087	-6%	-0,01	0,095	0,087	-8%	-0,01	Control -	0,083	0,086	4%	0,00	0,086	0,086	0%	0,00

COL																	
620 nm				492 nm						620 nm				492 nm			
EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto
LIO 1	0,1	0,389	289%	0,29	0,133	0,522	292%	0,39	SAC 1	0,139	0,498	258%	0,36	0,18	0,661	267%	0,48
LIO 2	0,096	0,478	398%	0,38	0,12	0,664	453%	0,54	SAC 2	0,121	0,719	494%	0,60	0,156	0,975	525%	0,82
LIO 3	0,088	0,341	288%	0,25	0,105	0,478	355%	0,37	SAC 3	0,096	0,459	378%	0,36	0,116	0,631	444%	0,52
LIO 4	0,09	0,524	482%	0,43	0,112	0,755	574%	0,64	SAC 4	0,091	0,497	446%	0,41	0,116	0,7	503%	0,58
Control +	0,093	0,241	159%	0,15	0,102	0,329	223%	0,23	Control +	0,079	0,256	224%	0,18	0,087	0,345	297%	0,26
Control -	0,098	0,391	299%	0,29	0,101	0,533	428%	0,43	Control -	0,092	0,091	-1%	0,00	0,095	0,091	-4%	0,00
PUERRO																	
620 nm				492 nm						620 nm				492 nm			
EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto
LIO 1	0,135	0,412	205%	0,28	0,189	0,546	189%	0,36	SAC 1	0,107	0,447	318%	0,34	0,164	0,633	286%	0,47
LIO 2	0,099	1,142	1054%	1,04	0,133	1,386	942%	1,25	SAC 2	0,096	0,535	457%	0,44	0,133	0,759	471%	0,63
LIO 3	0,088	0,456	418%	0,37	0,112	0,628	461%	0,52	SAC 3	0,087	0,474	445%	0,39	0,11	0,65	491%	0,54
LIO 4	0,079	0,382	384%	0,30	0,099	0,524	429%	0,43	SAC 4	0,081	0,485	499%	0,40	0,109	0,674	518%	0,57
Control +	0,078	0,275	253%	0,20	0,086	0,398	363%	0,31	Control +	0,068	0,294	332%	0,23	0,077	0,403	423%	0,33
Control -	0,086	0,097	13%	0,01	0,089	0,099	11%	0,01	Control -	0,074	0,084	14%	0,01	0,077	0,084	9%	0,01
ZANAHORIA																	
620 nm				492 nm						620 nm				492 nm			
EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto
LIO 1	0,119	0,659	454%	0,54	0,168	0,79	370%	0,62	SAC 1	0,115	0,411	257%	0,30	0,195	0,565	190%	0,37
LIO 2	0,104	0,764	635%	0,66	0,139	0,991	613%	0,85	SAC 2	0,108	0,792	633%	0,68	0,16	1,085	578%	0,93
LIO 3	0,095	0,746	685%	0,65	0,118	0,984	734%	0,87	SAC 3	0,093	0,864	829%	0,77	0,119	1,076	804%	0,96
LIO 4	0,094	0,78	730%	0,69	0,12	1,05	775%	0,93	SAC 4	0,097	0,974	904%	0,88	0,131	1,223	834%	1,09
Control +	0,095	0,488	414%	0,39	0,109	0,642	489%	0,53	Control +	0,079	0,392	396%	0,31	0,089	0,543	510%	0,45
Control -	0,104	0,126	21%	0,02	0,107	0,137	28%	0,03	Control -	0,102	0,036	-65%	-0,07	0,104	0,037	-64%	-0,07

Tabla 6. Medidas de absorbancia e incrementos de absorbancia absolutos y relativos de los ensayos de concentración mínima inhibitoria por el método de microdilución en caldo de los extractos acuosos de los polvos de apio, brócoli, col, puerro y zanahoria obtenidos mediante secado por aire caliente (SAC) o liofilización (LIO) frente a *S. aureus*. Extractos ordenados del 1 al 4 del más concentrado al menos concentrado: 0,1 g/mL, 0,05 g/mL, 0,0025 g/mL y 0,0125 g/mL.

<i>S AUREUS</i>																	
APIO																	
620 nm				492 nm						620 nm				492 nm			
EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto
LIO 1	0,099	0,497	402%	0,40	0,11	0,57	418%	0,46	SAC 1	0,121	0,394	226%	0,27	0,132	0,544	312%	0,41
LIO 2	0,108	0,594	450%	0,49	1,12	0,809	-28%	-0,31	SAC 2	0,112	0,651	481%	0,54	0,13	0,87	569%	0,74
LIO 3	0,109	0,707	549%	0,60	1,118	1,003	-10%	-0,12	SAC 3	0,118	0,809	586%	0,69	0,13	1,058	714%	0,93
LIO 4	0,103	0,841	717%	0,74	0,119	1,169	882%	1,05	SAC 4	0,112	0,95	748%	0,84	0,128	1,212	847%	1,08
Control +	0,11	0,604	449%	0,49	0,118	0,88	646%	0,76	Control +	0,106	0,556	425%	0,45	0,115	0,771	570%	0,66
Control -	0,122	0,158	30%	0,04	0,125	0,208	66%	0,08	Control -	0,121	0,049	-60%	-0,07	0,125	0,05	-60%	-0,08
BRÓCOLI																	
620 nm				492 nm						620 nm				492 nm			
EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto
LIO 1	0,079	0,85	976%	0,77	0,118	1,08	815%	0,96	SAC 1	0,089	0,258	190%	0,17	0,144	0,345	140%	0,20
LIO 2	0,078	0,234	200%	0,16	0,108	0,317	194%	0,21	SAC 2	0,087	0,267	207%	0,18	0,128	0,353	176%	0,23
LIO 3	0,078	0,648	731%	0,57	0,095	0,881	827%	0,79	SAC 3	0,081	0,423	422%	0,34	0,101	0,628	522%	0,53
LIO 4	0,071	1,078	1418%	1,01	0,095	1,35	1321%	1,26	SAC 4	0,074	0,585	691%	0,51	0,101	0,872	763%	0,77
Control +	0,069	0,367	432%	0,30	0,077	0,534	594%	0,46	Control +	0,068	0,418	515%	0,35	0,076	0,591	678%	0,52
Control -	0,077	0,088	14%	0,01	0,08	0,091	14%	0,01	Control -	0,078	0,085	9%	0,01	0,08	0,086	7%	0,01

COL																	
620 nm				492 nm					620 nm				492 nm				
EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto
LIO 1	0,095	0,338	256%	0,24	0,129	0,45	249%	0,32	SAC 1	0,192	0,272	42%	0,08	0,232	0,332	43%	0,10
LIO 2	0,086	0,412	379%	0,33	0,104	0,532	412%	0,43	SAC 2	0,117	0,322	175%	0,21	0,149	0,382	156%	0,23
LIO 3	0,082	0,329	301%	0,25	0,095	0,428	351%	0,33	SAC 3	0,097	0,32	230%	0,22	0,116	0,376	224%	0,26
LIO 4	0,072	0,534	642%	0,46	0,095	0,761	701%	0,67	SAC 4	0,082	0,594	624%	0,51	0,106	0,785	641%	0,68
Control +	0,075	0,408	444%	0,33	0,082	0,6	632%	0,52	Control +	0,067	0,413	516%	0,35	0,075	0,587	683%	0,51
Control -	0,074	0,269	264%	0,20	0,076	0,365	380%	0,29	Control -	0,08	0,285	256%	0,21	0,082	0,326	298%	0,24

PUERRO																	
620 nm				492 nm					620 nm				492 nm				
EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto
LIO 1	0,125	0,378	202%	0,25	0,163	0,439	169%	0,28	SAC 1	0,131	0,254	94%	0,12	0,177	0,249	41%	0,07
LIO 2	0,108	0,389	260%	0,28	0,134	0,428	219%	0,29	SAC 2	0,107	0,633	492%	0,53	0,139	0,844	507%	0,71
LIO 3	0,094	0,399	324%	0,31	0,113	0,488	332%	0,38	SAC 3	0,098	0,4	308%	0,30	0,118	0,478	305%	0,36
LIO 4	0,081	0,372	359%	0,29	0,1	0,463	363%	0,36	SAC 4	0,081	0,847	946%	0,77	0,105	1,186	1030%	1,08
Control +	0,071	0,375	428%	0,30	0,079	0,541	585%	0,46	Control +	0,071	0,412	480%	0,34	0,079	0,58	634%	0,50
Control -	0,078	0,084	8%	0,01	0,08	0,085	6%	0,01	Control -	0,09	0,099	10%	0,01	0,092	0,1	9%	0,01

ZANAHORIA																	
620 nm				492 nm					620 nm				492 nm				
EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto
LIO 1	0,126	0,415	229%	0,29	0,177	0,501	183%	0,32	SAC 1	0,139	0,276	99%	0,14	0,207	0,355	71%	0,15
LIO 2	0,102	0,44	331%	0,34	0,132	0,562	326%	0,43	SAC 2	0,116	0,431	272%	0,32	0,162	0,534	230%	0,37
LIO 3	0,094	0,389	314%	0,30	0,112	0,507	353%	0,40	SAC 3	0,101	0,486	381%	0,39	0,125	0,598	378%	0,47
LIO 4	0,089	0,454	410%	0,37	0,114	0,604	430%	0,49	SAC 4	0,094	0,673	616%	0,58	0,125	0,877	602%	0,75
Control +	0,086	0,436	407%	0,35	0,095	0,622	555%	0,53	Control +	0,08	0,477	496%	0,40	0,089	0,655	636%	0,57
Control -	0,091	0,092	1%	0,00	0,095	0,095	0%	0,00	Control -	0,089	0,141	58%	0,05	0,092	0,197	114%	0,11

Tabla 7. Medidas de absorbancia e incrementos de absorbancia absolutos y relativos de los ensayos de concentración mínima inhibitoria por el método de microdilución en caldo de los extractos acuosos de los polvos de apio, brócoli, col, puerro y zanahoria obtenidos mediante secado por aire caliente (SAC) o liofilización (LIO) frente a *Salmonella*. Extractos ordenados del 1 al 4 del más concentrado al menos concentrado: 0,1 g/mL, 0,05 g/mL, 0,0025 g/mL y 0,0125 g/mL.

SALMONELLA																	
APIO																	
620 nm				492 nm				620 nm				492 nm					
EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto
LIO 1	0,101	0,319	216%	0,22	0,117	0,383	227%	0,27	SAC 1	0,113	0,837	641%	0,72	0,124	0,952	668%	0,83
LIO 2	0,1	0,503	403%	0,40	0,114	0,603	429%	0,49	SAC 2	0,115	0,294	156%	0,18	0,127	0,357	181%	0,23
LIO 3	0,108	0,714	561%	0,61	0,121	0,897	641%	0,78	SAC 3	0,117	0,798	582%	0,68	0,125	0,962	670%	0,84
LIO 4	0,114	0,691	506%	0,58	0,132	0,9	582%	0,77	SAC 4	0,115	0,636	453%	0,52	0,129	0,829	543%	0,70
Control +	0,102	0,38	273%	0,28	0,115	0,514	347%	0,40	Control +	0,127	0,456	259%	0,33	0,134	0,593	343%	0,46
Control -	0,136	0,13	-4%	-0,01	0,143	0,133	-7%	-0,01	Control -	0,137	0,035	-74%	-0,10	0,14	0,036	-74%	-0,10
BRÓCOLI																	
620 nm				492 nm				620 nm				492 nm					
EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto
LIO 1	0,079	1,054	1234%	0,98	0,13	1,286	889%	1,16	SAC 1	0,105	0,254	142%	0,15	0,192	0,382	99%	0,19
LIO 2	0,078	0,915	1073%	0,84	0,104	1,191	1045%	1,09	SAC 2	0,082	0,633	672%	0,55	0,116	0,81	598%	0,69
LIO 3	0,075	0,803	971%	0,73	0,094	1,082	1051%	0,99	SAC 3	0,08	0,39	388%	0,31	0,087	0,541	522%	0,45
LIO 4	0,069	0,822	1091%	0,75	0,089	1,106	1143%	1,02	SAC 4	0,072	0,38	428%	0,31	0,094	0,545	480%	0,45
Control +	0,08	0,26	225%	0,18	0,087	0,368	323%	0,28	Control +	0,075	0,305	307%	0,23	0,083	0,428	416%	0,35
Control -	0,105	0,076	-28%	-0,03	0,077	0,078	1%	0,00	Control -	0,082	0,086	5%	0,00	0,082	0,087	6%	0,00

COL																	
620 nm				492 nm					620 nm				492 nm				
EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto
LIO 1	0,1	0,357	257%	0,26	0,135	0,469	247%	0,33	SAC 1	0,162	0,315	94%	0,15	0,202	0,435	115%	0,23
LIO 2	0,086	0,254	195%	0,17	0,108	0,344	219%	0,24	SAC 2	0,121	0,323	167%	0,20	0,15	0,442	195%	0,29
LIO 3	0,073	0,292	300%	0,22	0,094	0,409	335%	0,32	SAC 3	0,103	0,371	260%	0,27	0,134	0,514	284%	0,38
LIO 4	0,07	0,322	360%	0,25	0,076	0,467	514%	0,39	SAC 4	0,08	0,355	344%	0,28	0,095	0,507	434%	0,41
Control +	0,066	0,261	295%	0,20	0,072	0,373	418%	0,30	Control +	0,075	0,284	279%	0,21	0,081	0,398	391%	0,32
Control -	0,083	0,082	-1%	0,00	0,086	0,085	-1%	0,00	Control -	0,091	0,093	2%	0,00	0,093	0,094	1%	0,00
PUERRO																	
620 nm				492 nm					620 nm				492 nm				
EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto
LIO 1	0,151	0,446	195%	0,30	0,196	0,564	188%	0,37	SAC 1	0,112	0,292	161%	0,18	0,166	0,403	143%	0,24
LIO 2	0,097	0,338	248%	0,24	0,122	0,44	261%	0,32	SAC 2	0,095	0,266	180%	0,17	0,125	0,365	192%	0,24
LIO 3	0,089	0,267	200%	0,18	0,105	0,359	242%	0,25	SAC 3	0,091	0,31	241%	0,22	0,11	0,419	281%	0,31
LIO 4	0,073	0,39	434%	0,32	0,093	0,547	488%	0,45	SAC 4	0,09	0,09	0%	0,00	0,108	0,11	2%	0,00
Control +	0,082	0,32	290%	0,24	0,091	0,451	396%	0,36	Control +	0,088	0,342	289%	0,25	0,095	0,472	397%	0,38
Control -	0,085	0,085	0%	0,00	0,087	0,087	0%	0,00	Control -	0,092	0,1	9%	0,01	0,094	0,102	9%	0,01
ZANAHORIA																	
620 nm				492 nm					620 nm				492 nm				
EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto
LIO 1	0,134	0,298	122%	0,16	0,183	0,393	115%	0,21	SAC 1	0,142	0,244	72%	0,10	0,216	0,338	56%	0,12
LIO 2	0,107	0,316	195%	0,21	0,138	0,417	202%	0,28	SAC 2	0,12	0,284	137%	0,16	0,161	0,388	141%	0,23
LIO 3	0,089	0,323	263%	0,23	0,11	0,464	322%	0,35	SAC 3	0,103	0,383	272%	0,28	0,123	0,536	336%	0,41
LIO 4	0,087	0,318	266%	0,23	0,109	0,456	318%	0,35	SAC 4	0,08	0,404	405%	0,32	0,121	0,578	378%	0,46
Control +	0,086	0,257	199%	0,17	0,094	0,357	280%	0,26	Control +	0,075	0,298	297%	0,22	0,085	0,414	387%	0,33
Control -	0,105	0,102	-3%	0,00	0,108	0,106	-2%	0,00	Control -	0,082	0,089	9%	0,01	0,091	0,091	0%	0,00

Tabla 8. Medidas de absorbancia e incrementos de absorbancia absolutos y relativos de los ensayos de concentración mínima inhibitoria por el método de microdilución en caldo de los extractos acuosos de los polvos de apio, brócoli, col, puerro y zanahoria obtenidos mediante secado por aire caliente (SAC) o liofilización (LIO) frente a *E. coli*. Extractos ordenados del 1 al 4 del más concentrado al menos concentrado: 0,1 g/mL, 0,05 g/mL, 0,0025 g/mL y 0,0125 g/mL.

<i>E COLI</i>																	
APIO																	
620 nm				492 nm				620 nm				492 nm					
EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto
LIO 1	0,087	0,37	325%	0,28	0,099	0,485	390%	0,39	SAC 1	0,093	0,432	365%	0,34	0,104	0,552	431%	0,45
LIO 2	0,085	0,41	382%	0,33	0,093	0,549	490%	0,46	SAC 2	0,093	0,498	435%	0,41	0,102	0,648	535%	0,55
LIO 3	0,089	0,273	207%	0,18	0,088	0,376	327%	0,29	SAC 3	0,089	0,39	338%	0,3	0,098	0,521	432%	0,42
LIO 4	0,081	0,294	263%	0,21	0,093	0,42	352%	0,33	SAC 4	0,074	0,358	384%	0,28	0,087	0,503	478%	0,42
Control +	0,085	0,221	160%	0,14	0,089	0,299	236%	0,21	Control +	0,074	0,27	265%	0,2	0,082	0,376	359%	0,29
Control -	0,099	0,097	-2%	0	0,098	0,099	1%	0	Control -	0,079	0,096	22%	0,02	0,079	0,099	25%	0,02
BRÓCOLI																	
620 nm				492 nm				620 nm				492 nm					
EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto
LIO 1	0,099	0,437	341%	0,34	0,139	0,579	317%	0,44	SAC 1	0,118	0,363	208%	0,25	0,177	0,503	184%	0,33
LIO 2	0,109	0,379	248%	0,27	0,131	0,506	286%	0,38	SAC 2	0,117	0,426	264%	0,31	0,155	0,579	274%	0,42
LIO 3	0,106	0,311	193%	0,21	0,123	0,936	661%	0,81	SAC 3	0,117	0,412	252%	0,3	0,138	0,585	324%	0,45
LIO 4	0,107	0,341	219%	0,23	0,131	1,042	695%	0,91	SAC 4	0,11	0,452	311%	0,34	0,138	0,654	374%	0,52
Control +	0,105	0,263	150%	0,16	0,113	0,355	214%	0,24	Control +	0,103	0,278	170%	0,18	0,109	0,376	245%	0,27
Control -	0,11	0,118	7%	0,01	0,113	0,119	5%	0,01	Control -	0,125	0,07	-44%	-0,06	0,128	0,071	-45%	-0,06

COL																	
620 nm				492 nm					620 nm				492 nm				
EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto
LIO 1	0,111	0,509	359%	0,40	0,142	0,643	353%	0,50	SAC 1	0,178	0,497	179%	0,32	0,222	0,653	194%	0,43
LIO 2	0,094	0,5	432%	0,41	0,114	0,67	488%	0,56	SAC 2	0,132	0,54	309%	0,41	0,163	0,712	337%	0,55
LIO 3	0,092	0,606	559%	0,51	0,119	0,794	567%	0,68	SAC 3	0,104	0,46	342%	0,36	0,123	0,619	403%	0,50
LIO 4	0,084	0,36	329%	0,28	0,092	0,501	445%	0,41	SAC 4	0,092	0,514	459%	0,42	0,117	0,709	506%	0,59
Control +	0,082	0,38	363%	0,30	0,092	0,532	478%	0,44	Control +	0,067	0,384	473%	0,32	0,077	0,541	603%	0,46
Control -	0,09	0,089	-1%	0,00	0,092	0,091	-1%	0,00	Control -	0,066	0,031	-53%	-0,04	0,069	0,032	-54%	-0,04

PUERRO																	
620 nm				492 nm					620 nm				492 nm				
EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto
LIO 1	0,12	0,561	368%	0,44	0,148	0,742	401%	0,59	SAC 1	0,118	0,552	368%	0,43	0,172	0,757	340%	0,59
LIO 2	0,107	0,503	370%	0,40	0,133	0,669	403%	0,54	SAC 2	0,098	0,527	438%	0,43	0,125	0,713	470%	0,59
LIO 3	0,076	0,395	420%	0,32	0,089	0,541	508%	0,45	SAC 3	0,088	0,422	380%	0,33	0,107	0,58	442%	0,47
LIO 4	0,079	0,462	485%	0,38	0,098	0,64	553%	0,54	SAC 4	0,08	0,443	454%	0,36	0,106	0,626	491%	0,52
Control +	0,08	0,225	181%	0,15	0,088	0,308	250%	0,22	Control +	0,079	0,259	228%	0,18	0,088	0,36	309%	0,27
Control -	0,095	0,089	-6%	-0,01	0,097	0,094	-3%	0,00	Control -	0,083	0,082	-1%	0,00	0,084	0,082	-2%	0,00

ZANAHORIA																	
620 nm				492 nm					620 nm				492 nm				
EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	EXTRACTOS	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto	0 h	24 h	Δ relativo	Δ absoluto
LIO 1	0,115	0,521	353%	0,41	0,164	0,683	316%	0,52	SAC 1	0,141	0,454	222%	0,31	0,212	0,633	199%	0,42
LIO 2	0,097	0,391	303%	0,29	0,125	0,533	326%	0,41	SAC 2	0,107	0,474	343%	0,37	0,156	0,657	321%	0,50
LIO 3	0,087	0,311	257%	0,22	0,104	0,438	321%	0,33	SAC 3	0,091	0,371	308%	0,28	0,116	0,516	345%	0,40
LIO 4	0,086	0,341	297%	0,26	0,109	0,489	349%	0,38	SAC 4	0,088	0,406	361%	0,32	0,12	0,579	383%	0,46
Control +	0,069	0,213	209%	0,14	0,076	0,287	278%	0,21	Control +	0,09	0,263	192%	0,17	0,098	0,353	260%	0,26
Control -	0,078	0,082	5%	0,00	0,08	0,082	3%	0,00	Control -	0,098	0,103	5%	0,00	0,102	0,104	2%	0,00

5. CONCLUSIONES

La obtención de productos en polvo a partir de los residuos de confección de hortalizas se presenta como una oportunidad de valorización integral de este material de desecho, lo que permitiría reducir los costes de gestión de estos residuos además de contribuir a la circularidad de los sistemas alimentarios y su sostenibilidad. En este trabajo, se ha profundizado en el estudio del efecto del procesado, fundamentalmente la técnica de deshidratación, en el contenido en compuestos bioactivos de los productos y su potencial capacidad antimicrobiana.

Por un lado, las dos técnicas de deshidratación empleadas (SAC 70 °C y LIO) han permitido obtener polvos con una a_w suficientemente baja como para asegurar su estabilidad. Se ha comprobado que el método de deshidratación empleado condiciona el tamaño de partícula de los polvos, siendo los liofilizados más finos por la estructura porosa que se genera tras la sublimación del agua, lo que facilita la etapa de molienda posterior.

Además, la deshidratación influye también en el contenido en fenoles y flavonoides totales, así como en la actividad antioxidante de los productos en polvo, siendo los polvos SAC los que presentaron mejores propiedades antioxidantes de acuerdo con los métodos espectrofotométricos, lo cual ha sido atribuido a diferentes reacciones bioquímicas o enzimáticas que pueden tener lugar durante el SAC, así como a la posible inhibición de enzimas pro-oxidantes. En todo caso, el efecto de la técnica de deshidratación varía de un residuo a otro.

La técnica de HPLC ha permitido identificar un número considerable de compuestos fenólicos específicos, aunque han quedado otros por identificar. Esto puede explicar las discrepancias encontradas entre los resultados de HPLC y los de los ensayos espectrofotométricos de fenoles y flavonoides totales, así como los de actividad antioxidante.

En cuanto a los ensayos de capacidad antimicrobiana de los polvos, los ensayos de inhibición en placa sugieren que los productos en polvo obtenidos pueden inhibir en parte el crecimiento bacteriano de determinados microorganismos, a pesar de que los resultados de la concentración mínima inhibitoria no hayan sido los esperados. Esto podría deberse a que algunos compuestos responsables de esta actividad antimicrobiana se hayan degradado durante la preparación de los extractos, además de a que las concentraciones ensayadas no fuesen lo suficientemente elevadas.

Para finalizar, se puede concluir que la obtención de productos en polvo es una alternativa muy interesante para la reutilización de residuos de frutas y hortalizas. Su uso como ingrediente funcional en la formulación de alimentos podría mejorar su perfil nutricional, contribuyendo así al desarrollo de dietas más saludables y sostenibles. Adicionalmente, en caso de confirmarse su capacidad antimicrobiana, su empleo como ingrediente podría contribuir a la conservación de los productos formulados, actuando como conservantes naturales, complementando el empleo de los conservantes artificiales. No obstante, sería necesario realizar nuevos ensayos de actividad antimicrobiana para confirmar dicha actividad.

Todo lo anterior, sumado a la reducción del desperdicio alimentario como consecuencia de la valorización de estos residuos, contribuyendo así a una economía circular y a una producción más sostenible.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Abdelbaky, A. S., Mohamed, A. M. H. A., & Alharthi, S. S. (2021). Antioxidant and antimicrobial evaluation and chemical investigation of rosa gallica var. Aegyptiaca leaf extracts. *Molecules*, 26(21). <https://doi.org/10.3390/molecules26216498>
- Acton, J. C., & Dawson, P. L. (2004). Impact of proteins on food colour. *Proteins in Food Processing*, 631–668. <https://doi.org/10.1533/9781855738379.3.631>
- Ahmed, J., Thomas, L., & Khashawi, R. (2020). Influence of hot-air drying and freeze-drying on functional, rheological, structural and dielectric properties of green banana flour and dispersions. *Food Hydrocolloids*, 99. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105331>
- Ahmed, S. S. T., Fahim, J. R., Youssif, K. A., Amin, M. N., Abdel-Aziz, H. M. H., Khadra, I. A., Rateb, M. E., Abdelmohsen, U. R., & Hamed, A. N. E. (2022). Comparative study of the chemical composition and anti-proliferative activities of the aerial parts and roots of *Apium graveolens* L. (celery) and their biogenic nanoparticles. *South African Journal of Botany*, 151, 34–45. <https://doi.org/10.1016/J.SAJB.2021.11.002>
- Anjani, G., Ayustaningwarno, F., & Eviana, R. (2022). Critical review on the immunomodulatory activities of carrot's β -carotene and other bioactive compounds. *Journal of Functional Foods*, 99, 105303. <https://doi.org/10.1016/J.JFF.2022.105303>
- Augšpole, I., Kince, T., & Cinkmanis, I. (2017). Changes of polyphenol compound concentrations in hybrids of nante type carrots during storage. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences, Section B: Natural, Exact, and Applied Sciences*, 71(6), 492–495. <https://doi.org/10.1515/prolas-2017-0085>
- Ayala-Zavala, J. F., Vega-Vega, V., Rosas-Domínguez, C., Palafox-Carlos, H., Villa-Rodríguez, J. A., Siddiqui, M. W., Dávila-Aviña, J. E., & González-Aguilar, G. A. (2011). Agro-industrial potential of exotic fruit byproducts as a source of food additives. In *Food Research International* (Vol. 44, Issue 7, pp. 1866–1874). <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.02.021>
- Bahorun, T., Luximon-Ramma, A., Crozier, A., & Aruoma, O. I. (2004). Total phenol, flavonoid, proanthocyanidin and vitamin C levels and antioxidant activities of Mauritian vegetables. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84(12), 1553–1561. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1820>
- Bas-Bellver, C., Barrera, C., Betoret, N., & Seguí, L. (2020). Turning Agri-Food Cooperative Vegetable Residues into Functional Powdered Ingredients for the Food Industry. *Sustainability*, 12(4), 1284. <https://doi.org/10.3390/su12041284>
- Bas-Bellver, C., Barrera, C., Betoret, N., & Seguí, L. (2022). Impact of Disruption and Drying Conditions on Physicochemical, Functional and Antioxidant Properties of Powdered Ingredients Obtained from Brassica Vegetable By-Products. *Foods*, 11(22), 3663. <https://doi.org/10.3390/foods11223663>
- Bas-Bellver, C., Barrera, C., Betoret, N., & Seguí, L. (2023). Effect of Processing and In Vitro Digestion on Bioactive Constituents of Powdered IV Range Carrot (*Daucus carota*, L.) Wastes. *Foods*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/foods12040731>
- Bas-Bellver, C., Barrera, C., Betoret, N., & Seguí, L. (2023). Physicochemical, Technological and Functional Properties of Upcycled Vegetable Waste Ingredients as Affected by Processing and Storage. *Plant Foods for Human Nutrition*, 78(4), 710–719. <https://doi.org/10.1007/s11130-023-01114-1>
- Bas-Bellver, C., Barrera, C., Betoret, N., Seguí, L., & Harasym, J. (2024). IV-Range Carrot Waste Flour Enhances Nutritional and Functional Properties of Rice-Based Gluten-Free Muffins †. *Foods*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/foods13091312>

- Bernaert, N., de Paepe, D., Bouten, C., de Clercq, H., Stewart, D., van Bockstaele, E., de Loose, M., & van Droogenbroeck, B. (2012). Antioxidant capacity, total phenolic and ascorbate content as a function of the genetic diversity of leek (*Allium ampeloprasum* var. *porrum*). *Food Chemistry*, 134(2), 669–677. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.02.159>
- Bhandari, B., Bansal, N., Zhang, M., & Schuck, P. (2013). Handbook of food powders. En Woodhead Publishing Limited eBooks. <https://doi.org/10.1533/9780857098672>
- Borja, M., Sánchez, P., García, M. A. P., & Jara, A. B. S. (2019). IV Jornadas Doctorales Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad de Murcia (EIDUM): Caracterización de compuestos bioactivos en los subproductos de la industria del brócoli (pp. 138-143). <https://doi.org/10.6018/editum.2736>
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995b). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, 28(1), 25–30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Calabuig-Jiménez, L., Hinestroza-Córdoba, L. I., Barrera, C., Seguí, L., & Betoret, N. (2022). Effects of Processing and Storage Conditions on Functional Properties of Powdered Blueberry Pomace. *Sustainability (Switzerland)*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/su14031839>
- Camire, M. E., Dougherty, M. P., & Briggs, J. L. (2007). Functionality of fruit powders in extruded corn breakfast cereals. *Food Chemistry*, 101(2), 765–770. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2006.02.031>
- Cano, A., Acosta, M., & Arnao, M. B. (2000). A method to measure antioxidant activity in organic media: Application to lipophilic vitamins. *Redox Report*, 5(6), 365–370. <https://doi.org/10.1179/13510000101535933>
- Cardona, F. (2019). Actividad del agua en alimentos: concepto, medida y aplicaciones. Departamento de tecnología de Alimentos, Universidad Politécnica de Valencia. <https://riUNET.upv.es:443/handle/10251/121948>
- Cetin-Karaca, H., & Newman, M. C. (2015). Antimicrobial efficacy of plant phenolic compounds against *Salmonella* and *Escherichia Coli*. *Food Bioscience*, 11, 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2015.03.002>
- Chaisamlitpol, S., Hiranvarachat, B., Srichumpoung, J., Devahastin, S., & Chiewchan, N. (2014). Bioactive compositions of extracts from cabbage outer leaves as affected by drying pretreatment prior to microwave-assisted extraction. *Separation and Purification Technology*, 136, 177–183. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2014.09.002>
- Chen, X. N., Fan, J. F., Yue, X., Wu, X. R., & Li, L. T. (2008). Radical scavenging activity and phenolic compounds in persimmon (*Diospyros kaki* L. cv. Mopan). *Journal of Food Science*, 73(1). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00587.x>
- Djantou, E. B., Mbofung, C. M. F., Scher, J., Phambu, N., & Morael, J. D. (2011). Alternation drying and grinding (ADG) technique: A novel approach for producing ripe mango powder. *LWT - Food Science and Technology*, 44(7), 1585–1590. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2011.01.022>
- Economía circular: definición, importancia y beneficios | Temas | Parlamento Europeo. (s. f.). Temas | Parlamento Europeo. <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios#:~:text=La%20econom%C3%ADa%20circular%20es%20un,de%20los%20productos%20se%20extiende.>

- Grigore-Gurgu, L., Bucur, F. I., Mihalache, O. A., & Nicolau, A. I. (2024). Comprehensive Review on the Biocontrol of *Listeria monocytogenes* in Food Products. In *Foods* (Vol. 13, Issue 5). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/foods13050734>
- Hernández-Ortega, M., Kissangou, G., Necochea-Mondragón, H., Sánchez-Pardo, M. E., & Ortiz-Moreno, A. (2013). Microwave Dried Carrot Pomace as a Source of Fiber and Carotenoids. *Food and Nutrition Sciences*, 04(10), 1037–1046. <https://doi.org/10.4236/fns.2013.410135>
- Honda, M., Kageyama, H., Hibino, T., Ichihashi, K., Takada, W., & Goto, M. (2020). Isomerization of Commercially Important Carotenoids (Lycopene, β -Carotene, and Astaxanthin) by Natural Catalysts: Isothiocyanates and Polysulfides. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(10), 3228–3237. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c00316>
- Jiang, H., Zhang, M., & Adhikari, B. (2013). Fruit and vegetable powders. *Handbook of Food Powders: Processes and Properties*, 532–552. <https://doi.org/10.1533/9780857098672.3.532>
- Karam, M. C., Petit, J., Zimmer, D., Baudelaire Djantou, E., & Scher, J. (2016). Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: A review. *Journal of Food Engineering*, 188, 32–49. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2016.05.001>
- Kaur, M., Singh, A. K., & Singh, A. (2023). Bioconversion of food industry waste to value added products: Current technological trends and prospects. *Food Bioscience*, 55, 102935. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102935>
- Luximon-Ramma, A., Bahorun, T., Soobrattee, M.A., Aruoma, O.I. (2002). Antioxidant activities of phenolic, proanthocyanidin, and flavonoid components in extracts of *Cassia fistula*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50, pp. 5042–5047.
- Martínez-Las Heras, R., Landines, E. F., Heredia, A., Castelló, M. L., & Andrés, A. (2017). Influence of drying process and particle size of persimmon fibre on its physicochemical, antioxidant, hydration and emulsifying properties. *Journal of Food Science and Technology*, 54(9), 2902–2912. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2728-z>
- Martínez-Las Heras, R., Pinazo, A., Heredia, A., & Andrés, A. (2017). Evaluation studies of persimmon plant (*Diospyros kaki*) for physiological benefits and bioaccessibility of antioxidants by in vitro simulated gastrointestinal digestion. *Food Chemistry*, 214, 478–485. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.104>
- Neacsu, M., Vaughan, N., Raikos, V., Multari, S., Duncan, G. J., Duthie, G. G., & Russell, W. R. (2015). Phytochemical profile of commercially available food plant powders: Their potential role in healthier food reformulations. *Food Chemistry*, 179, 159–169. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.01.128>
- Pérdida y desperdicio de alimentos | Portal de apoyo a las políticas y la gobernanza | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura | Policy
- Pérez Esteve, E., & Rivas Soler, A. (2021). Determinación de la sensibilidad de los microorganismos frente a antimicrobianos de origen natural y la concentración mínima inhibitoria por métodos fenotípicos. <http://hdl.handle.net/10251/167611>
- Platzer, M., Kiese, S., Herfellner, T., Schweiggert-Weisz, U., Miesbauer, O., & Eisner, P. (2021). Common trends and differences in antioxidant activity analysis of phenolic substances using single electron transfer based assays. *Molecules*, 26(5). <https://doi.org/10.3390/molecules26051244>
- Prior, R. L., Wu, X., & Schaich, K. (2005). Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements. In *Journal of Agricultural and Food Chemistry* (Vol. 53, Issue 10, pp. 4290–4302). <https://doi.org/10.1021/jf0502698>

- Radovanović, B., Mladenović, J., Radovanović, A., Pavlović, R., & Nikolić, V. (2015b). (Serbia) Extracts. *Journal of Food and Nutrition Research*, 3(9), 564–569. <https://doi.org/10.12691/jfnr-3-9-1>
- Raiola, A., Errico, A., Petruk, G., Monti, D. M., Barone, A., & Rigano, M. M. (2018). Bioactive compounds in brassicaceae vegetables with a role in the prevention of chronic diseases. In *Molecules* (Vol. 23, Issue 1). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/molecules23010015>
- Ratti, C. (2023). Freeze drying for food powder production. In *Handbook of Food Powders: Chemistry and Technology*, Second Edition (pp. 37–56). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-98820-9.00001-6>
- Ratti, C. (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. *Journal of Food Engineering*, 49(4), 311–319. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00228-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00228-4)
- Re, R.; Pellegrini, N.; Proteggente, A.; Pannala, A.; Yang, M.; Rice-Evans, C. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radic. Biol. Med.* 1999, 26, 1231–1237.
- Salamatullah, A. M., Özcan, M. M., Alkaltham, M. S., Uslu, N., & Hayat, K. (2021). Influence of boiling on total phenol, antioxidant activity, and phenolic compounds of celery (*Apium graveolens* L) root. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(2). <https://doi.org/10.1111/jfpp.15171>
- Sheer, A., Sardar, M. F., Younas, F., Zhu, P., Noreen, S., Mehmood, T., Farooqi, Z. U. R., Fatima, S., & Guo, W. (2024). Trends and social aspects in the management and conversion of agricultural residues into valuable resources: A comprehensive approach to counter environmental degradation, food security, and climate change. *Bioresource Technology*, 394, 130258. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130258>
- Singleton, V. L., Orthofer, R., Lamuela-Raventós, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *Methods in enzymology*, 299, 152-178.
- Sorour, M. (2015). Natural Antioxidant Changes in Fresh and Dried celery (*Apium graveolens*). *American Journal of Energy Engineering*, 3(2), 12. <https://doi.org/10.11648/j.ajee.s.2015030201.13>
- Strati, I. F., Kostomitsopoulos, G., Lytras, F., Zoumpoulakis, P., Proestos, C., & Sinanoglou, V. J. (2018). Optimization of polyphenol extraction from *Allium ampeloprasum* var. *porrum* through response surface methodology. *Foods*, 7(10). <https://doi.org/10.3390/foods7100162>
- Sun, T., Simon, P. W., & Tanumihardjo, S. A. (2009). Antioxidant phytochemicals and antioxidant capacity of biofortified carrots (*Daucus carota* L.) of various colors. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(10), 4142–4147. <https://doi.org/10.1021/jf9001044>
- Sun-Waterhouse, D. (2011), The development of fruit-based functional foods targeting the health and wellness market: a review. *International Journal of Food Science & Technology*, 46: 899-920. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02499.x>
- Support and Governance | Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s. f.). <https://www.fao.org/policy-support/policy-themes/food-loss-food-waste/es/>
- Thakur, M., Asrani, R. K., & Patial, V. (2018). *Listeria monocytogenes*: A Food-Borne Pathogen. In *Foodborne Diseases* (pp. 157–192). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811444-5.00006-3>
- Vega-Galvez, A., Uribe, E., Pasten, A., Camus, J., Rojas, M., Garcia, V., Araya, M., Valenzuela-Barra, G., Zambrano, A., & Goñi, M. G. (2023). Low-Temperature Vacuum Drying on Broccoli: Enhanced Anti-Inflammatory and Anti-Proliferative Properties Regarding Other Drying Methods. *Foods*, 12(17). <https://doi.org/10.3390/foods12173311>

Zhang, L., Li, Y., Liang, Y., Liang, K., Zhang, F., Xu, T., Wang, M., Song, H., Liu, X., & Lu, B. (2019). Determination of phenolic acid profiles by HPLC-MS in vegetables commonly consumed in China. *Food Chemistry*, 276, 538–546. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2018.10.074>

7 ANEXOS

7.1 Anexo I: Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2030

Tabla 1. Grado de relación del trabajo realizado con los distintos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Objetivos de Desarrollo Sostenible		Alto	Medio	Bajo	No procede
ODS 1.	Fin de la pobreza				X
ODS 2.	Hambre cero	X			
ODS 3.	Salud y bien estar		X		
ODS 4.	Educación de calidad				X
ODS 5.	Igualdad de género				X
ODS 6.	Agua limpia y saneamiento				X
ODS 7.	Energía asequible y no contaminante				X
ODS 8.	Trabajo decente y crecimiento económico				X
ODS 9.	Industria, innovación e infraestructura				X
ODS 10.	Reducción de las desigualdades				X
ODS 11.	Ciudades y comunidades sostenibles				X
ODS 12.	Producción y consumo responsables	X			
ODS 13.	Acción por el clima				X
ODS 14.	Vida submarina				X
ODS 15.	Vida de ecosistemas terrestres				X
ODS 16.	Paz, justicia e instituciones sólidas				X
ODS 17.	Alianzas para lograr objetivos				X

El objetivo de este trabajo es la valorización de residuos de frutas y hortalizas mediante la reutilización integral de estos residuos en forma de ingredientes en polvo que podrían utilizarse para mejorar nutricionalmente nuevos alimentos formulados. Es por ello por lo que tiene una alta relación con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) 2, 3 y 12, los cuales son hambre cero, salud y bienestar, y producción y consumo responsables.

En cuanto al ODS 2, este trabajo pretende evitar que se desperdicien frutas y hortalizas generando productos en polvo de sus desperdicios, de tal manera que estos pueden emplearse en la formulación de otros alimentos, mejorando sus características nutricionales. Esto lucha contra el hambre y la malnutrición, al evitar que se desperdicien alimentos y al poder mejorar otros, contribuyendo a dietas más sanas y saludables, ricas en nutrientes y compuestos antioxidantes y bioactivos (ODS 3).

En cuanto al ODS 12, la reutilización integral de residuos frutas y hortalizas evita que estos se pierdan al darles un nuevo valor añadido y reintroducirlos en la cadena de producción y comercio, aportando así al mantenimiento de una economía circular y sostenible, alargando la vida de los productos y optimizando los recursos que se utilizan en su transformación y producción.

7.2 Anexo II: Cromatogramas

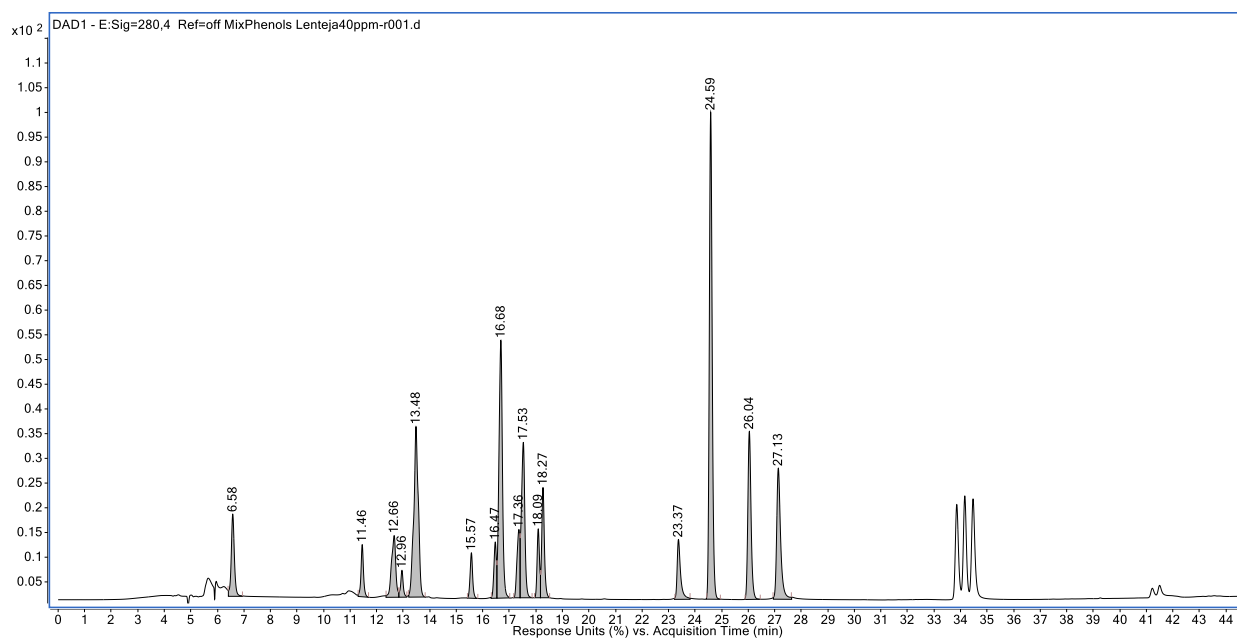


Figura 1. Cromatograma de patrón para la identificación de compuestos fenólicos. Tiempos de retención de los compuestos identificados: ácido gálico 6,79, 4-O-cafeolínico 11,66, 4-hidroxibenzoico 12,79, epicatequina 13,14, ácido cafeico 13,63, vanilina 13,75, rutina 15,8, quercetin-3-glucósido 16,67, ácido p-cumárico 16,81, ácido sináptico 17,5, ácido ferúlico 17,7, quercitrina 18,29, apigenina-7-glucósido 18,49, quercetina 23,49, ácido trans-cinámico 24,71, narigenina 26,1, kaempferol 27,2.

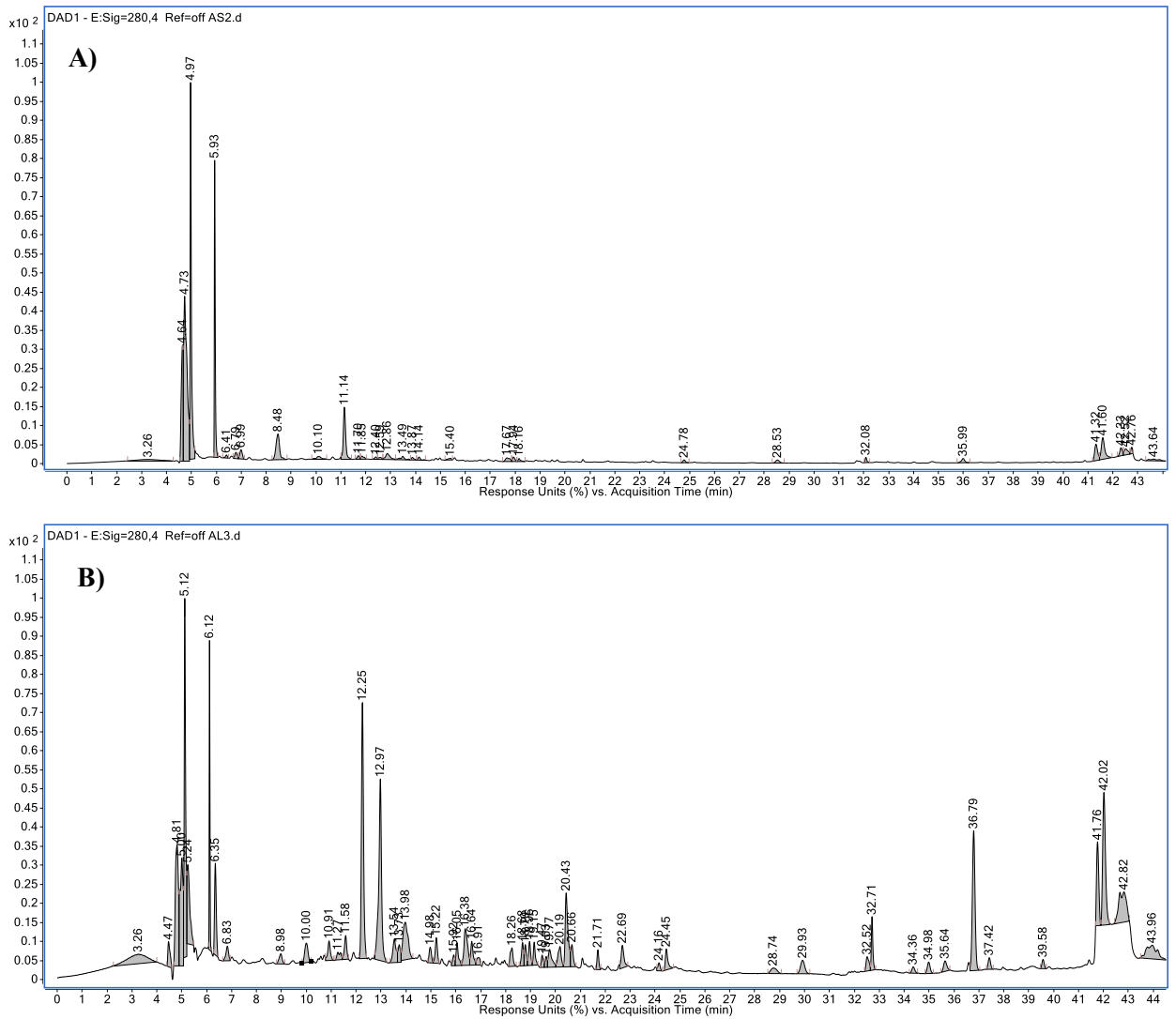


Figura 2. Cromatogramas para la identificación de compuestos fenólicos por HPLC de los extractos de apio **A)** SAC y **B)** LIO.

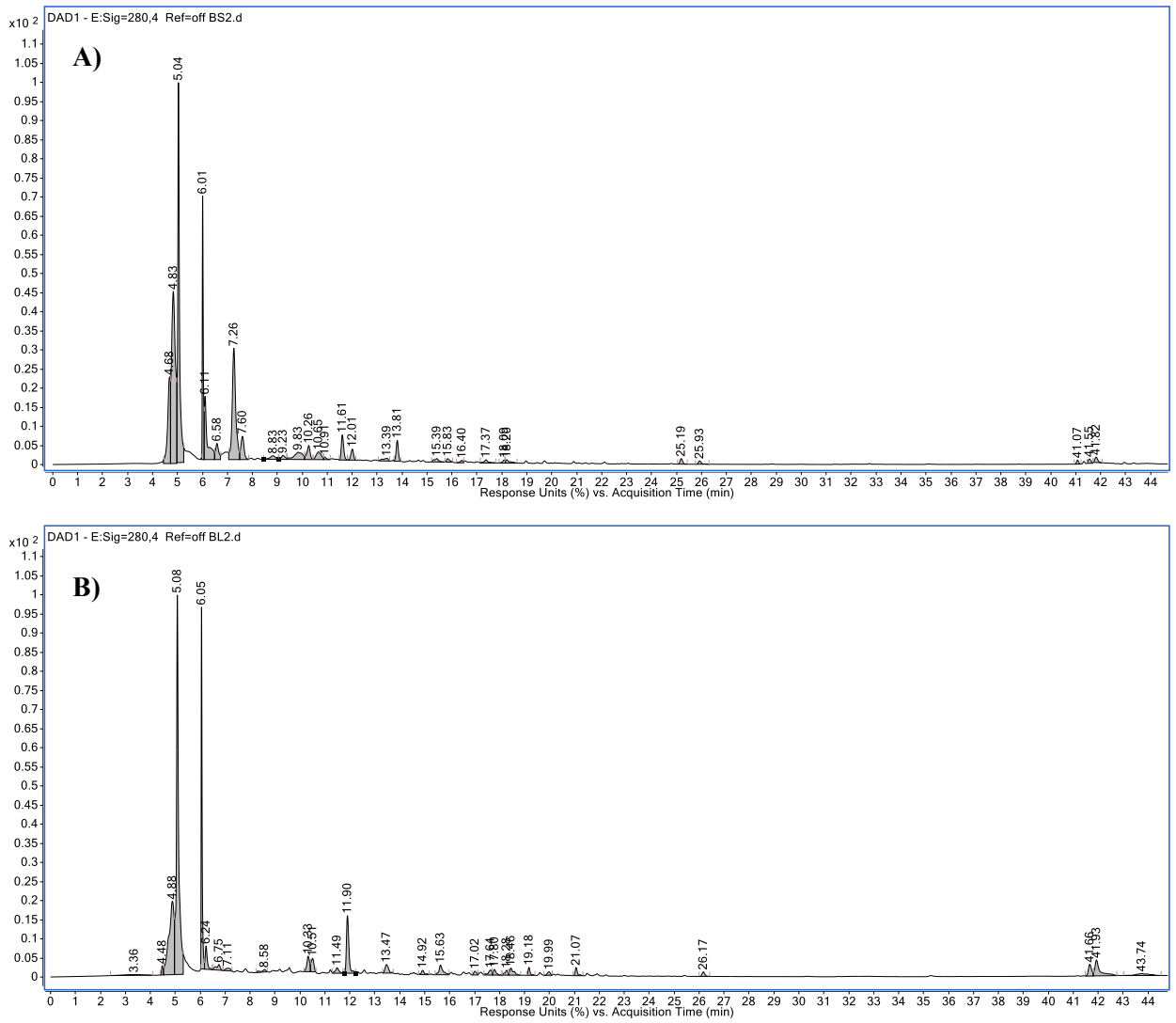


Figura 3. Cromatogramas para la identificación de compuestos fenólicos por HPLC de los extractos de brócoli **A)** SAC y **B)** LIO.

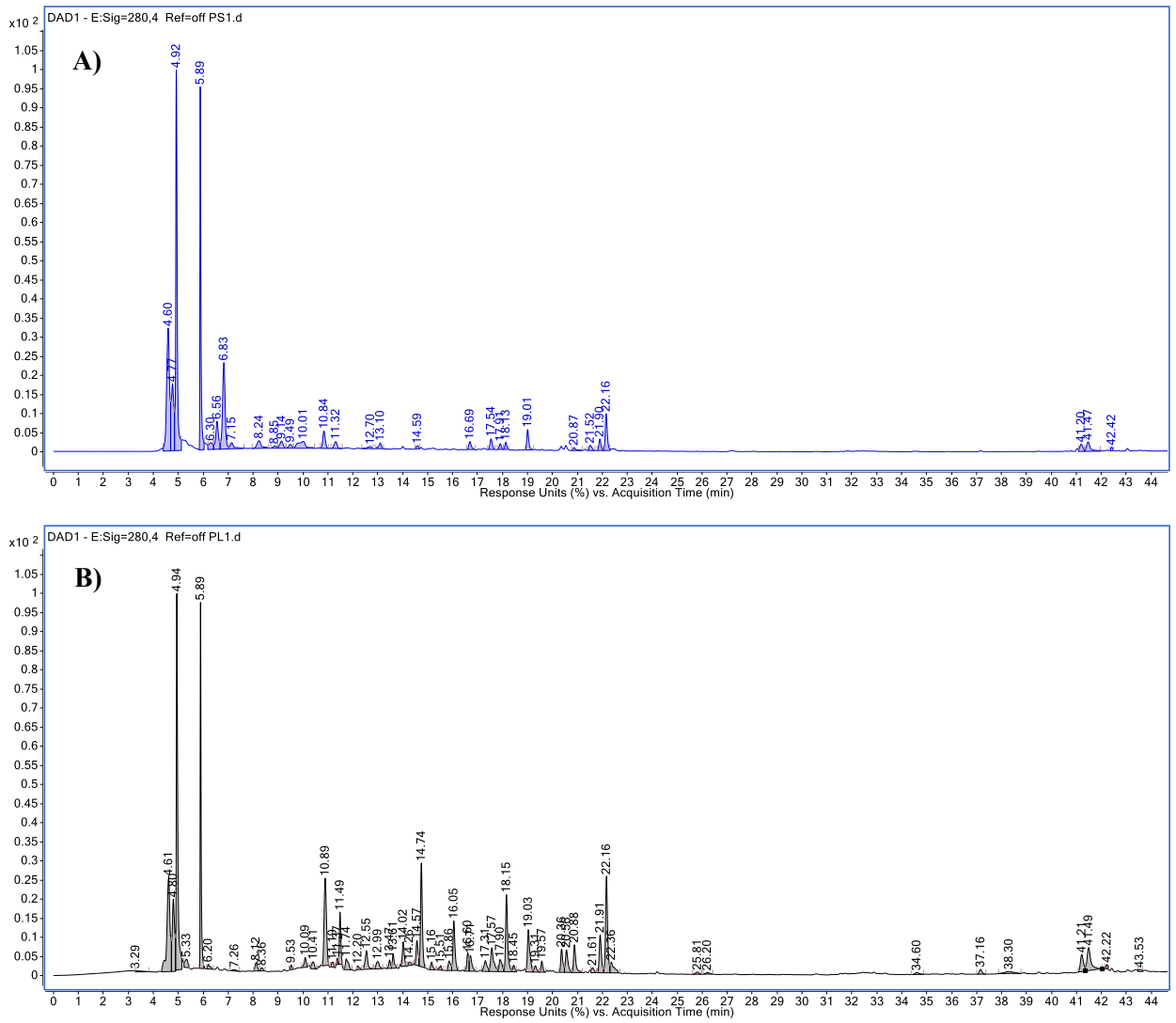


Figura 5. Cromatogramas para la identificación de compuestos fenólicos por HPLC de los extractos de puerro **A)** SAC y **B)** LIO.