



Universitat de Lleida

Valorización de subproductos vegetales del Valle del Ebro mediante microondas y pulsos eléctricos

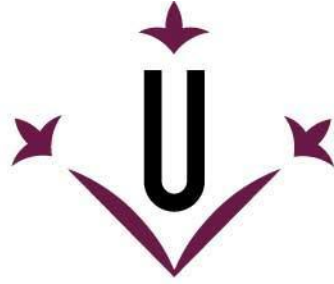
Marta Oliván García

<http://hdl.handle.net/10803/690849>

ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

WARNING. Access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.



Universitat de Lleida

TESI DOCTORAL

**VALORIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS
VEGETALES DEL VALLE DEL EBRO
MEDIANTE MICROONDAS Y PULSOS
ELÉCTRICOS**

Marta Oliván García

Memòria presentada per optar al grau de Doctor per la Universitat de
Lleida

Programa de Doctorat en Ciència i Tecnologia Agrària i Alimentària

Directoras

Olga Martín Belloso i Mónica Mendiola Lanao

Tutora

Olga Martín Belloso

(2024)

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseo expresar mi agradecimiento a mis directoras de tesis, las Doctoras Olga Martín Belloso y Mónica Mendiola Lanao, por el apoyo y paciencia para poder llevar a cabo este trabajo. Gracias por vuestros consejos.

A la Consejería de Desarrollo Económico e Innovación del Gobierno de La Rioja por la financiación de esta tesis.

Asimismo, agradezco a mis compañeros de Ctic Cita por compartir tantas horas y momentos inolvidables, además de resolverme dudas siempre que me han surgido. En especial a mis compañeros de Calahorra que son los que me han tenido que aguantar todos los días, a mis compis del laboratorio de físico químico, y a Miriam por coger el relevo y estar ahí cuando la necesité.

También agradecerle al equipo del CVR, que me acogieron como a una más del quipo y me permitieron aprender de sus conocimientos.

A mis padres por darme todo el apoyo, en mis locuras, para poder llegar hasta aquí y no haberme frenado nunca los pies. Y a mi hermana, Laura, que, aunque discutamos, sé que siempre estará ahí para escucharme en cualquier momento malo que tenga.

También a mi chico, David, que ha vivido más de cerca el estrés del último año junto a mí y siempre ha sabido como hacerme desconectar y volver a cargar las pilas.

Gracias a todos!!!

RESUMEN

Actualmente, se están generando gran cantidad de residuos alimentarios que, en el caso de España, alcanzan más de 7,7 millones de t, lo que está provocando un problema medioambiental grave. La preocupación por el medio ambiente impulsa a la industria alimentaria a ser más eficiente, incluyendo el desechar lo menos posible. Los residuos que actualmente se desechan pueden ser la fuente para la obtención de derivados o sustancias (subproductos) que den un valor añadido a las materias primas y, al mismo tiempo, contribuyen a paliar el problema medioambiental. En el caso particular de las frutas y hortalizas, que son ricas en compuestos bioactivos beneficiosos para la salud, estos pueden extraerse de sus residuos dando lugar a sólidos o líquidos, como subproductos, que pueden incorporarse a una matriz alimentaria, mejorando su biofuncionalidad.

Los objetivos principales de la presente Tesis doctoral fueron: a) la obtención de subproductos vegetales, ricos en compuestos bioactivos, en formato sólido o líquido, mediante la aplicación de microondas (MW) con (MWAE) o sin disolvente (MWD), extracción asistida por pulsos eléctricos (PEFAE), la combinación de MWAE y PEFAE, o por ultrasonidos (USAE), y b) el desarrollo de matrices alimentarias incluyendo esos subproductos para demostrar que pueden volver a ser introducidos en la cadena alimentaria dando lugar a productos alimentarios más saludables y, al mismo tiempo, reducir el desperdicio alimentario.

Estos subproductos, se caracterizaron según su contenido de polifenoles, capacidad antioxidante (DPPH y FRAP), fibra dietética, licopeno, proteínas y beta glucanos, además de la humedad y la actividad de agua (a_w), para evaluar si las tecnologías propuestas son de aplicación para la obtención de subproductos ricos en compuestos bioactivos. Para ello, se comenzó por realizar una vigilancia tecnológica sobre cuáles eran los residuos que se obtenían en mayor cantidad en las industrias alimentarias del Valle del Ebro y se decidió trabajar con los de cardo, alcachofa, champiñón, tomate, fresa y alperujo.

Cada residuo se sometió, a deshidratación mediante microondas (MWD) con potencias entre 1000W y 4000W, o bien utilizando extracción asistida por microondas (MWAE) con potencias entre 1000W y 4000W y tiempos de 3,6 y 9 minutos, o por PEFAE, en los que se utilizaron intensidades entre 0,5 y 2 kV/cm y 10 o 25 pulsos, o por la combinación de los mejores tratamientos PEFAE y MWD seleccionados en los experimentos anteriores. Además, las migas de champiñón se aprovecharon mediante extracción asistida por US (USAE). Finalmente, los subproductos deshidratados se incorporaron en las matrices alimentarias seleccionadas: salsas de tomate, pasta fresca, bizcochos y hamburguesas veganas. Esos productos alimentarios se evaluaron nutricional, fisicoquímica y sensorialmente.

Para la deshidratación mediante MWD, se observó que a medida que aumentó la potencia, aumentó la temperatura y se acortó el tiempo de tratamiento necesario para

lograr productos estables. También se logró reducir la humedad entre un 97% y un 99%, y la a_w hasta valores de 0,45 en todos los subproductos. Además, aunque siempre disminuyó la cantidad de los compuestos de interés con respecto al control, en los diferentes subproductos obtenidos, se conservó entre un 7% y un 40% de la capacidad antioxidante, excepto en el subproducto de tomate que conservó hasta un 50%. Todos los subproductos mantuvieron entre un 75% y un 99% de fibra dietética.

Con respecto a la extracción asistida por las tecnologías propuestas, se observó que los extractos obtenidos mediante MWAE, presentaron el mayor potencial antioxidante cuando se utilizó como disolvente una mezcla de agua con etanol 60:40. En el caso de PEFAE y en todos los casos de subproductos líquidos, se conservó en menor medida la capacidad antioxidante en comparación con la MWAE, observándose que los resultados fueron mayores, para polifenoles entre 19 y 140 mg/kg ácido gálico, para la capacidad antioxidante DPPH entre 0,77 y 2,33 05 μmol trolox inicial /g producto, y para la capacidad antioxidante FRAP entre 20,8 y 47,4 μmol TE/mg producto. Para PEFAE en líneas generales, el aumento de la intensidad del campo eléctrico no provocó un aumento en la extracción de los compuestos, excepto en el tomate que aumentó con la intensidad de campo de 1kV/cm. Mientras que en los residuos de alcachofa se aumentó la capacidad antioxidante al aumentar el número de pulsos de 10 a 25.

En todos los casos se demostró que los polifenoles se conservaron en mayor medida con el uso de MWD, mientras que la capacidad antioxidante se conservó con PEFAE en los sólidos. En el subproducto de cardo se observó la mayor diferencia de capacidad antioxidante DPPH con valores hasta 125 μmol trolox inicial/g producto más elevados, mientras que en su determinación como FRAP, fue el subproducto de alcachofa el que presentó un incremento significativo en una cantidad de hasta 1012 μmol TE/mg producto. Esto ocurrió porque las interacciones estudiadas con el método DPPH y FRAP se vieron afectadas por el aumento de temperatura a 100°C. Además, la tecnología MWD permitió conservar la mayor concentración de licopeno y beta glucanos, en comparación con los contenidos obtenidos en los extractos tras el uso de PEFAE y la combinación de las dos tecnologías.

Mientras que, los US aplicados a 400W fueron eficaces para la extracción de proteína bruta, entre un 30% y un 46%, en los tratamientos con una duración de 10, 20 y 30 minutos.

Las matrices alimentarias desarrolladas en esta tesis doctoral, gracias a la incorporación de entre 1,8% y 14,4% de los subproductos, mejoraron su contenido en polifenoles (contenido entre 58 y 132 mg/kg ácido gálico) y fibra dietética (entre un 2,2 y un 10% mayor), y resultaron sensorialmente aceptables para los catadores. Por la utilización de subproductos sólidos para desarrollar alimentos, se redujo el uso de harina y concentrado de tomate que normalmente se utilizaba en sus formulaciones.

Con este trabajo se ha demostrado que con los tratamientos mediante MWD se pueden aprovechar los residuos obtenidos de 4 tipos de vegetales, para disminuir el consumo de otros ingredientes y reducir así el desperdicio producido en la industria alimentaria. Esto puede dar una solución al problema medioambiental producido por el desperdicio alimentario generado en la industria agroalimentaria de vegetales.

RESUM

Actualment, s'estan generant gran quantitat de residus alimentaris que, en el cas d'Espanya, arriben a més de 7,7 milions de tones, cosa que provoca un problema mediambiental greu. La preocupació pel medi ambient impulsa la indústria alimentària a ser més eficient, incloent el rebutjar el mínim possible. Els residus que actualment es rebutgen poden ser la font per a l'obtenció de derivats o substàncies (subproductes) que donin un valor afegit a les primeres matèries i, alhora, contribueixen a pal·liar el problema mediambiental. En el cas particular de les fruites i hortalisses, que són riques en compostos bioactius beneficiosos per a la salut, aquests es poden extreure dels seus residus donant lloc a sòlids o líquids, com a subproductes, que es poden incorporar a una matriu alimentària, millorant-ne la biofuncionalitat.

Els objectius principals de la present Tesi doctoral van ser: a) l'obtenció de subproductes vegetals, rics en compostos bioactius, en format sòlid o líquid, mitjançant l'aplicació de microones (MW) amb (MWAE) o sense dissolvent (MWD), extracció assistida per polsos elèctrics (PEFAE), la combinació de MWAE i PEFAE, o per ultrasons (USAE), i b) el desenvolupament de matrius alimentàries incloent aquests subproductes per demostrar que poden tornar a ser introduïts a la cadena alimentària donant lloc a productes alimentaris més saludables i, alhora, reduir el malbaratament alimentari.

Aquests subproductes, es van caracteritzar segons el contingut de polifenols, capacitat antioxidant (DPPH i FRAP), fibra dietètica, licopè, proteïnes i beta glucans, a més de la humitat i l'activitat d'aigua (aw), per avaluar si les tecnologies proposades són de aplicació per a l'obtenció de subproductes rics en compostos bioactius. Per fer-ho, es va començar per fer una vigilància tecnològica sobre quins eren els residus que s'obtenien en major quantitat a les indústries alimentàries de la Vall de l'Ebre i es va decidir treballar amb els de card, carxofa, xampinyó, tomàquet, maduixa i alperujo.

Cada residu es va sotmetre, a deshidratació mitjançant microones (MWD) amb potències entre 1000W i 4000W, o bé utilitzant extracció assistida per microones (MWAE) amb potències entre 1000W i 4000W i temps de 3,6 i 9 minuts, o per PEFAE, a els que es van utilitzar intensitats entre 0,5 i 2 kV/cm i 10 o 25 polsos, o per la combinació dels millors tractaments PEFAE i MWD seleccionats als experiments anteriors. A més, les molles de xampinyó es van aprofitar mitjançant extracció assistida per US (USAE). Finalment, els subproductes deshidratats es van incorporar a les matrius alimentàries seleccionades: salses de tomàquet, pasta fresca, bescuits i hamburgueses veganes. Aquests productes alimentaris es van avaluar nutricionalment, fisicoquímicament i sensorialment.

Per a la deshidratació mitjançant MWD, es va observar que a mesura que va augmentar la potència, va augmentar la temperatura i es va escurçar el temps de tractament necessari per aconseguir productes estables. També es va aconseguir reduir la humitat entre un 97% i un 99%, i l'aw fins a valors de 0,45 a tots els subproductes. A més, encara

que sempre va disminuir la quantitat dels compostos d'interès pel que fa al control, als diferents subproductes obtinguts, es va conservar entre un 7% i un 40% de la capacitat antioxidant, excepte en el subproducte de tomàquet que va conservar fins a un 50% . Tots els subproductes van mantenir entre un 75% i un 99% de fibra dietètica.

Pel que fa a l'extracció assistida per les tecnologies proposades, es va observar que els extractes obtinguts mitjançant MWAE van presentar el potencial antioxidant més gran quan es va utilitzar com a dissolvent una barreja d'aigua amb etanol 60:40. En el cas de PEFAE i en tots els casos de subproductes líquids, es va conservar en menor mesura la capacitat antioxidant en comparació amb la MWAE, observant-se que els resultats van ser més grans per a polifenols entre 19 i 140 mg/kg àcid gàlic r, per a la capacitat antioxidant DPPH entre 0,77 i 2,33 05 μmol trolox inicial /g producte, i per a la capacitat antioxidant FRAP entre 20,8 i 47,4 μmol TE/mg producte. Per a PEFAE en línies generals, l'augment de la intensitat del camp elèctric no va provocar un augment en l'extracció dels compostos, excepte en el tomàquet que va augmentar amb la intensitat de camp d'1kV/cm. Mentre que als residus de carxofa es va augmentar la capacitat antioxidant en augmentar el nombre de polsos de 10 a 25.

En tots els casos es va demostrar que els polifenols es van conservar més amb l'ús de MWD, mentre que la capacitat antioxidant es va conservar amb PEFAE als sòlids. Al subproducte de card es va observar la major diferència de capacitat antioxidant DPPH amb valors fins a 125 μmol trolox inicial/g producte més elevats, mentre que en la seva determinació com a FRAP, va ser el subproducte de carxofa el que va presentar un increment significatiu en una quantitat de fins a 1012 μmol TE/mg producte. Això va passar perquè les interaccions estudiades amb el mètode DPPH i FRAP es van veure afectades per l'augment de temperatura a 100°C. A més, la tecnologia MWD va permetre la major concentració de lycopè i beta glucans, en comparació amb els continguts obtinguts en els extractes després de l'ús de pefae i la combinació de les dues tecnologies.

Mentre que els Estats Units aplicats a 400W eren efectius per a l'extracció de proteïnes brutes, entre el 30% i el 46%, en tractaments amb una durada de 10, 20 i 30 minuts.

Les matrius alimentàries desenvolupades en aquesta tesi doctoral, gràcies a la incorporació d'entre 1,8% i 14,4% dels subproductes, van millorar el contingut en antioxidants (contingut entre 58 i 132 mg/kg àcid gàlic) i fibra dietètica (entre un 2,2 i un 10% més gran), i un contingut de 58 a 132, i van resultar sensorialment acceptables per als tastadors. Per la utilització de subproductes sòlids per desenvolupar aliments, es va reduir l'ús de farina i concentrat de tomàquet que normalment es feia servir en les seves formulacions.

Com a conclusió, s'ha demostrat que amb els tractaments mitjançant MWD es poden aprofitar els residus obtinguts de 4 tipus de vegetals, per disminuir el consum d'altres ingredients i reduir així el malbaratament produït a la indústria alimentària. Això pot

donar una solució al problema mediambiental produït pel malbaratament alimentari generat a la indústria agroalimentària de vegetals.

SUMMARY

Currently, a large amount of food waste is being generated and, in the case of Spain, this amounts to more than 7.7 million tonnes, which is causing a serious environmental problem. Concern for the environment is driving the food industry to become more efficient, including discarding as little as possible. Waste that is currently discarded can be the source of derivatives or substances (by-products) that give added value to raw materials and, at the same time, contribute to alleviating the environmental problem. In the particular case of fruit and vegetables, which are rich in bioactive compounds beneficial to health, these can be extracted from their waste, giving rise to solids or liquids, as by-products, which can be incorporated into a food matrix, improving their biofunctionality.

The main objectives of this doctoral thesis were: a) to obtain plant by-products, rich in bioactive compounds, in solid or liquid format, by applying microwaves (MW) with (MWAE) or without solvent (MWD), extraction assisted by electrical pulses (PEFAE), the combination of MWAE and PEFAE, or ultrasonic (USAE), and b) the development of food matrices including these by-products to demonstrate that they can be reintroduced into the food chain resulting in healthier food products and, at the same time, reducing food waste.

These by-products were characterised according to their polyphenol content, antioxidant capacity (DPPH and FRAP), dietary fibre, lycopene, proteins and beta-glucans, as well as moisture and water activity (*aw*), in order to assess whether the proposed technologies can be applied to obtain by-products rich in bioactive compounds. To do this, we began by carrying out a technology watch on which were the wastes that were obtained in greatest quantities in the food industries of the Ebro Valley and it was decided to work with thistle, artichoke, mushroom, tomato, strawberry and alperujo.

Each residue was subjected to dehydration by microwave (MWD) with powers between 1000W and 4000W, or using microwave-assisted extraction (MWAE) with powers between 1000W and 4000W and times of 3, 6 and 9 minutes, or by PEFAE, in which intensities between 0.5 and 2 kV/cm and 10 or 25 pulses were used, or by the combination of the best PEFAE and MWD treatments selected in the previous experiments. In addition, mushroom crumbs were utilised by US-assisted extraction (USAE). Finally, the dehydrated by-products were incorporated into selected food matrices: tomato sauces, fresh pasta, biscuits and vegan burgers. These food products were evaluated nutritionally, physicochemically and sensorially.

For MWD dehydration, it was observed that as the power increased, the temperature increased and the treatment time required to achieve stable products was shortened. It was also possible to reduce moisture by 97-99% and *aw* to values of 0.45 for all by-products. Furthermore, although the quantity of the compounds of interest always

decreased with respect to the control, in the different by-products obtained, between 7% and 40% of the antioxidant capacity was conserved, except in the tomato by-product, which conserved up to 50%. All by-products retained between 75% and 99% of dietary fibre.

With respect to the extraction assisted by the proposed technologies, it was observed that the extracts obtained by MWAE showed the highest antioxidant potential when a 60:40 ethanol-water mixture was used as solvent. In the case of PEFAE and in all cases of liquid by-products, the antioxidant capacity was preserved to a lesser extent compared to MWAE, with higher results for polyphenols between 19 and 140 mg/kg gallic acid r, for DPPH antioxidant capacity between 0.77 and 2.33 05 μmol initial trolox /g product, and for FRAP antioxidant capacity between 20.8 and 47.4 μmol TE/mg product. For PEFAE in general, increasing the electric field strength did not lead to an increase in the extraction of the compounds, except for tomato which increased with the field strength of 1kV/cm. While in artichoke residues the antioxidant capacity was increased by increasing the number of pulses from 10 to 25.

In all cases it was shown that polyphenols were preserved to a higher extent with the use of MWD, whereas the antioxidant capacity was preserved with PEFAE in solids. In the thistle by-product, the greatest difference in DPPH antioxidant capacity was observed with values up to 125 μmol trolox initial/g product, while in its determination as FRAP, it was the artichoke by-product that presented a significant increase in an amount of up to 1012 μmol TE/mg product. This occurred because the interactions studied with the DPPH and FRAP method were affected by the increase in temperature to 100°C. In addition, MWD technology preserved the highest concentration of lycopene and beta-glucans, compared to the contents obtained in the extracts after the use of PEFAE and the combination of the two technologies.

Meanwhile, US applied at 400W was effective for crude protein extraction, between 30% and 46%, in treatments lasting 10, 20 and 30 minutes.

The food matrices developed in this doctoral thesis, thanks to the incorporation of between 1.8% and 14.4% of the by-products, improved their antioxidant content (content between 58 and 132 mg/kg gallic acid) and dietary fibre (between 2.2 and 10% higher), and a content between 58 and 132, and were sensorially acceptable to tasters. By using solid by-products to develop feeds, the use of tomato flour and tomato concentrate normally used in their formulations was reduced.

In conclusion, it has been demonstrated that with MWD treatments, the waste obtained from 4 types of vegetables can be used to reduce the consumption of other ingredients and thus reduce the waste produced in the food industry. This can provide a solution to the environmental problem caused by the food waste generated in the vegetable agri-food industry.

ÍNDICE

ANTECEDENTES	21
1. Introducción	21
1.1. Cardo	23
1.2. Alcachofa	23
1.3. Champiñón	24
1.4. Tomate	24
1.5. Aceituna	25
1.6. Fresa	26
2. Obtención de subproductos	27
2.1. Métodos de extracción convencional	27
2.2. Métodos para mejorar la extracción	28
2.3. Métodos para deshidratar mediante microondas (MWD)	33
3. Diseño de nuevos alimentos incorporando los subproductos	35
OBJETIVOS	36
1. Objetivo general:	36
2. Objetivos específicos:	36
MATERIAL Y MÉTODO DE ESTUDIO	37
1. Obtención de los subproductos	37
1.1. Tratamientos con microondas	40
1.2. Extracción asistida mediante pulsos eléctricos (PEFAE)	42
1.3. Tratamiento combinado de PEFAE y MWD	44
1.4. Extracción asistida mediante ultrasonidos (USAE)	44
2. Desarrollo de los nuevos productos	46
3. Caracterización fisicoquímica de los subproductos	49
3.1. Humedad	49
3.2. Antioxidantes	49
3.3. Determinación de fibra dietética soluble e insoluble:	52
3.4. Determinación de licopeno	55
3.5. Determinación de betaglucanos	55
3.6. Determinación de proteína bruta	57
3.7. Determinación de la Actividad de agua (a_w)	58

3.8.	Color	58
3.9.	Textura	59
4.	Análisis sensorial de los nuevos productos	62
4.1.	Perfil sensorial	63
4.2.	Método sensorial hedónico	64
5.	Análisis estadístico de resultados	65
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		66
1.	Obtención y caracterización de los subproductos	66
1.1.	Subproductos obtenidos de residuos de cardo	66
1.2.	Subproductos obtenidos de residuos de alcachofa	85
1.3.	Subproductos obtenidos de residuos de champiñón	103
1.4.	Subproductos obtenidos de residuos de tomate.....	124
1.5.	Efecto del tratamiento con microondas para la deshidratación (MWD) del alperujo 146	
1.6.	Efecto del tratamiento con microondas para la deshidratación (MWD) de la fresa 149	
2.	Incorporación de los subproductos en alimentos.....	152
2.1.	Tomate y Kétchup	152
2.2.	Hamburguesa vegana.....	156
2.3.	Bizcocho	160
2.4.	Pasta fresca	164
CONCLUSIONES		168
BIBLIOGRAFÍA.....		171
ANEXOS		188
ANEXO 1. Hojas de cata de los diferentes productos		189
ANEXO 2. Artículo colaborativo publicado.....		205
ANEXO 3. Poster con el que se ha asistido a congresos.....		217

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Procedimiento para la declaración de subproducto (MAPAMA, 2016).....	22
Figura 2. Efecto de las ondas microondas en las células (fuente propia realizado mediante Biorender).	29
Figura 3. Microondas doméstico (Plaza González, 2015).....	29
Figura 4. Generador y cámara de tratamiento con PEF (Vivanco D. et al., 2021).....	31
Figura 5. Partes de un equipo de ultrasonidos (Virot et al., 2010).	32
Figura 6. Residuos para valorizar mediante las tecnologías propuestas.	38
Figura 7. Diagrama de flujo realizado para la obtención de los subproductos.....	39
Figura 8. Equipo microondas situado en la Planta Piloto de Ctic Cita.	40
Figura 9. Equipo para tratamiento con pulsos eléctricos de la Universidad de Lleida. A) cámara de tratamiento, B) lanza aislante y C) panel de control.....	43
Figura 10. Equipo de tratamiento por ultrasonidos. A) Prototipo ultrasonidos, B) Pantalla de calibración del equipo, C) Curva de calibración y D) Pantalla de ajuste de los parámetros del proceso.....	45
Figura 11. Esquema de la determinación de Fibra dietética soluble (SDF), insoluble (IDF) y total (TDF).	53
Figura 12. Equipo medida actividad de agua (α_w).....	58
Figura 13. A la izquierda, ejes espaciales para los parámetros "L" "a" "b". A la derecha, medición con el colorímetro Minolta CR400/410.....	59
Figura 14. Análisis de textura de la salsa de tomate y del kétchup.	60
Figura 15. Análisis de textura de la hamburguesa vegana y del bizcocho.	60
Figura 16. Análisis de textura de la pasta fresca.....	61
Figura 17. Foto de una cata de los desarrollos alimenticios	62
Figura 18. Ejemplo de hoja de perfil sensorial.	63
Figura 19. Ejemplo de hoja de método sensorial hedónico.....	64
Figura 20. Perfil de temperatura durante los tratamientos de deshidratado mediante microondas (MWD) de residuos de cardo. Leyenda: Cardo deshidratado (CD) - potencia emitida en W.	67
Figura 21. Evolución de la humedad durante los tratamientos de deshidratado mediante microondas (MWD) de residuos de cardo. Leyenda: Cardo deshidratado (CD) - potencia emitida en W – tiempo en minutos.	68
Figura 22. Aspecto de los subproductos de cardo después de los tratamientos con MWD. Leyenda: Potencia emitida en W - tiempo en minutos.....	69
Figura 23. Perfil de temperatura para cada tratamiento de extracción asistida por microondas (MWAE) de residuos de cardo. A) 1000W, B) 2000W, C) 3000W y D) 4000W. Leyenda: Cardo extracto (CE) – disolvente - potencia emitida en W - tiempo en minutos.....	77
Figura 24. Perfil de temperatura durante los tratamientos de deshidratación mediante microondas (MWD) de residuos de alcachofa. Leyenda: Alcachofa deshidratada (AD) - potencia emitida en W.....	86
Figura 25. Evolución de la humedad para cada tratamiento de deshidratado mediante microondas (MWD) de los residuos de alcachofa. Leyenda: Alcachofa deshidratada (AD) - potencia emitida en W - tiempo en minutos.	87

Figura 26. Aspecto de los subproductos de alcachofa después de los tratamientos de deshidratado mediante microondas (MWD). Leyenda: Potencia emitida en W - tiempo en minutos.	88
Figura 27. Perfil de temperatura para cada tratamiento de extracción asistida por microondas (MWAE) de residuos de alcachofa. A) 1000W, B) 2000W, C) 3000W y D) 4000W. Leyenda: Alcachofa extracto (AE) – disolvente - potencia emitida en W - tiempo en minutos.....	95
Figura 28. Perfil de temperatura durante los tratamientos de deshidratado mediante microondas (MWD) de residuos champiñón. Leyenda: Champiñón deshidratado (ChD) - potencia emitida en W.....	104
Figura 29. Evolución de la humedad para cada tratamiento de deshidratado mediante microondas (MWD) de las migas de champiñón. Leyenda: Champiñón deshidratado (ChD) - potencia emitida en W - tiempo en minutos.	105
Figura 30. Aspecto de los subproductos de champiñón después de los tratamientos de deshidratado mediante microondas (MWD). Leyenda: Potencia emitida en W - tiempo en minutos.	107
Figura 31. Perfil de temperatura para cada tratamiento de extracción asistida por microondas (MWAE) de residuos de champiñón. A) 1000W, B) 2000W, C) 3000W y D) 4000W. Leyenda: Champiñón extracto (ChE) - disolvente - potencia emitida en W - tiempo en minutos.....	114
Figura 32. Perfil de temperatura durante los tratamientos de deshidratado mediante microondas (MWD) de residuos de tomate. Leyenda: Tomate deshidratado (TD) - potencia emitida en W.....	124
Figura 33. Evolución de la humedad para cada tratamiento de deshidratado mediante microondas (MWD) de los subproductos de tomate. Leyenda: Tomate deshidratado (TD) - potencia emitida en W - tiempo en minutos.	126
Figura 34. Aspecto de los subproductos de tomate después de los tratamientos de deshidratado mediante microondas (MWD). Leyenda: Potencia emitida en W - tiempo en minutos.	127
Figura 35. Perfil de temperatura para cada tratamiento de extracción asistida mediante microondas (MWAE) a 4000W de residuos de tomate. Leyenda: Tomate extracto (TE) – disolvente - potencia emitida en W - tiempo en minutos.	135
Figura 36. Perfil de temperatura durante los tratamientos de deshidratado mediante microondas (MWD) de alperujo. Leyenda: Alperujo deshidratado (AID) - potencia emitida en W.....	146
Figura 37. Evolución de la humedad para cada tratamiento de deshidratado mediante microondas (MWD) en el Alperujo. Leyenda: Alperujo deshidratado (AID) - potencia emitida en W - tiempo en minutos.	147
Figura 38. Aspecto de los subproductos del alperujo después del tratamiento de deshidratado mediante microondas (MWD). Leyenda: Potencia emitida en W - tiempo en minutos.....	148
Figura 39. Perfil de temperatura durante los tratamientos de deshidratado mediante microondas (MWD) de residuos de fresa. Leyenda: Fresa deshidratada (FD) - potencia emitida en W.....	149
Figura 40. Evolución de la humedad para cada tratamiento de deshidratado mediante microondas (MWD) en los residuos de fresa. Leyenda: Fresa deshidratada (FD) - potencia emitida en W - tiempo en minutos.	150

Figura 41. Aspecto de los subproductos de fresa después del tratamiento de deshidratado mediante microondas (MWD). Leyenda: Potencia emitida en W - tiempo en minutos.....	151
Figura 42. Subproducto de tomate utilizado (A) y salsas obtenidas (B): kétchup (izquierda) y salsa de tomate (derecha).....	152
Figura 43. Perfil sensorial de la salsa de tomate y del kétchup	155
Figura 44. Subproducto de cardo utilizado (A) y hamburguesa vegana obtenida: hamburguesa vegana sin cocinar (B) y hamburguesa vegana cocinada (C).	156
Figura 45. Perfil sensorial de la hamburguesa.	158
Figura 46. Subproducto de alcachofa utilizado (A) y bizcocho obtenido: parte exterior (B) y parte interior (C).....	160
Figura 47. Perfil sensorial del bizcocho.	163
Figura 48. Subproducto de champiñón utilizado (A) y pasta fresca obtenida (B).....	164
Figura 49. Perfil sensorial de la pasta fresca.	166

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ejemplos de productos enriquecidos con subproductos.	35
Tabla 2. Productos, residuos y compuestos bioactivos utilizados en la presente tesis doctoral.	37
Tabla 3. Intensidad y número de pulsos aplicados durante los tratamientos con PEFAE.	43
Tabla 4. Condiciones de tratamientos para la combinación de PEFAE y MWD.	44
Tabla 5. Ingredientes y proporciones en los alimentos desarrollados.....	47
Tabla 6. Condiciones de tratamiento y densidad energética aplicada en los diferentes tratamientos con microondas para deshidratar (MWD) los residuos de cardo.	67
Tabla 7. Parámetros de color de los subproductos de cardo deshidratados.....	70
Tabla 8. Actividad de agua en los subproductos de cardo deshidratados.....	71
Tabla 9. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los subproductos de cardo deshidratados.....	72
Tabla 10. Fibra dietética soluble (SDF), insoluble (IDF) y total (TDF) en los subproductos de cardo deshidratados.....	75
Tabla 11. Condiciones de tratamiento y densidad energética aplicada en los diferentes tratamientos mediante extracción asistida por microondas (MWAE) de los residuos de cardo.	78
Tabla 12. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los extractos de cardo. .	79
Tabla 13. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los subproductos líquidos de cardo obtenidos mediante extracción asistida por pulsos eléctricos (PEFAE).....	81
Tabla 14. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los subproductos sólidos de cardo obtenidos mediante extracción asistida por pulsos eléctricos (PEFAE).....	82
Tabla 15. Condiciones de tratamiento y densidad energética aplicada en los diferentes tratamientos de deshidratación mediante microondas (MWD) para deshidratar los residuos de alcachofa.	86
Tabla 16. Parámetros de color de los subproductos de alcachofa deshidratados.	89
Tabla 17. Actividad de agua en los subproductos de alcachofa deshidratados.....	90
Tabla 18. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los subproductos de alcachofa deshidratados.	91
Tabla 19. Fibra dietética soluble (SDF), insoluble (IDF) y total (TDF) en los subproductos de alcachofa deshidratados.	92
Tabla 20. Condiciones de tratamiento y densidad energética aplicada en los diferentes tratamientos mediante extracción asistida por microondas (MWAE) de los residuos de alcachofa.	96
Tabla 21. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los extractos de alcachofa.	97
Tabla 22. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los subproductos líquidos de alcachofa obtenidos mediante extracción asistida por pulsos eléctricos (PEFAE).	99
Tabla 23. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los subproductos de alcachofa obtenidos mediante extracción asistida por pulsos eléctricos (PEFAE).	100
Tabla 24. Condiciones de tratamiento y densidad energética aplicada en los diferentes tratamientos de deshidratado mediante microondas (MWD) para deshidratar los residuos de champiñón.....	104
Tabla 25. Parámetros de color de los subproductos de champiñón deshidratados.....	107

Tabla 26 . Actividad de agua en los subproductos de champiñón deshidratados.....	108
Tabla 27. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los subproductos de champiñón deshidratados.....	109
Tabla 28. Beta glucanos en los subproductos de champiñón deshidratados.	110
Tabla 29. Proteínas en los subproductos de champiñón deshidratados.	111
Tabla 30. Fibra dietética soluble (SDF), insoluble (IDF) y total (TDF) en los subproductos de champiñón deshidratados.....	112
Tabla 31. Condiciones de tratamiento y densidad energética aplicada en los diferentes tratamientos de extracción asistida por microondas (MWAE) de los residuos de Champiñón.	116
Tabla 32. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los extractos de champiñón.....	117
Tabla 33. Beta glucanos en los extractos de champiñón.	119
Tabla 34. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los subproductos de champiñón obtenidos mediante extracción asistida por pulsos eléctricos (PEFAE).....	120
Tabla 35. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los subproductos de champiñón obtenidos mediante extracción asistida por pulsos eléctricos (PEFAE).....	121
Tabla 36. Proteínas en los subproductos de champiñón tratados mediante extracción asistida por ultrasonidos (USAE).	123
Tabla 37. Condiciones de tratamiento y densidad energética aplicada en los diferentes tratamientos con microondas para deshidratar (MWD) los residuos de tomate.....	125
Tabla 38. Parámetros de color de los subproductos de tomate deshidratados.	127
Tabla 39. Actividad de agua de los subproductos de tomate deshidratados.	129
Tabla 40. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los subproductos de tomate deshidratados.	129
Tabla 41. Licopeno en los subproductos de tomate deshidratados.	131
Tabla 42. Fibra dietética soluble (SDF), insoluble (IDF) y total (TDF) en los subproductos de tomate deshidratados.	132
Tabla 43. Condiciones de tratamiento y densidad energética aplicada en los diferentes tratamientos de extracción asistida mediante microondas (MWAE) de los residuos de Tomate.	136
Tabla 44. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los extractos de tomate.	137
Tabla 45. Licopeno en los extractos de tomate.	139
Tabla 46. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los subproductos de tomate obtenidos mediante extracción asistida por pulsos eléctricos (PEFAE).	140
Tabla 47. Licopeno en los subproductos de tomate obtenidos mediante extracción asistida por pulsos eléctricos (PEFAE).....	141
Tabla 48. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los subproductos de tomate obtenidos mediante extracción asistida por pulsos eléctricos (PEFAE).	142
Tabla 49. Licopeno en los subproductos de tomate obtenidos mediante extracción asistida por pulsos eléctricos (PEFAE).....	143
Tabla 50. Composición nutricional de la salsa de tomate y Kétchup.....	153
Tabla 51. Parámetros de color y textura de la salsa de tomate y del kétchup.	154
Tabla 52. Test hedónico de la salsa de tomate y del kétchup.....	155

Tabla 53. Composición nutricional de la hamburguesa vegana.....	157
Tabla 54. Parámetros de color y textura de la hamburguesa vegana.....	157
Tabla 55. Test hedónico de la hamburguesa.	159
Tabla 56. Composición nutricional del bizcocho.....	161
Tabla 57. Parámetros de color y textura de los bizcochos.....	161
Tabla 58. Test hedónico del bizcocho.	163
Tabla 59. Composición nutricional de la pasta fresca.....	164
Tabla 60. Parámetros de color y textura de la pasta fresca.....	165
Tabla 61. Test hedónico de la pasta fresca.	166

ANTECEDENTES

1. Introducción

En la actualidad, se están generando una gran cantidad de residuos agroalimentarios, que son los materiales u objetos que resultan de un proceso de producción, provocando un problema medioambiental grave (MAPAMA, 2017).

En la Unión Europea, la industria de procesamiento de alimentos genera alrededor de 100 millones de toneladas (t) de residuos. La mayor cantidad de residuos se origina en las industrias de bebidas (26%) incluidos los zumos, de lácteos y helados (21.3%), y de producción y conservación de frutas y verduras (14.8%) (Marić et al., 2018; Okolie Chigozie et al., 2019).

Dentro de Europa, España ocupa el séptimo puesto en la generación de residuos, produciéndose más de 7,7 millones de t de residuos alimentarios. Según los datos del Ministerio de Agricultura, alrededor del 39% del desperdicio total proviene de la industria alimentaria, mientras que el 42% proviene de los hogares, el 14% de la restauración y catering, y el 5% de la distribución y venta (MAPAMA, 2016).

Actualmente la preocupación por el medio ambiente impulsa a la industria alimentaria a ser más eficiente, y a desechar lo menos posible, tal como se pretende en la denominada economía circular (MAPAMA, 2017). El Parlamento Europeo fijó el objetivo que las industrias de los diferentes países reduzcan los residuos un 30% en 2020, y un 50% en 2030 (MAPAMA, 2016). Según la Plataforma de la UE (plataforma creada en 2016) sobre pérdidas y desperdicio de alimentos, los objetivos anteriormente mencionados no se han cumplido y se ha impuesto un nuevo objetivo, reducir a la mitad el desperdicio de alimentos de aquí a 2030. En España, el Ministerio de Consumo plantea reducir la generación de residuos de alimentos en toda cadena alimentaria: un 50% de reducción per cápita a nivel de hogar y consumo minorista y un 20% en las cadenas de producción y suministro a partir del año 2020 (Ministerio de Consumo, 2020).

Los residuos agroalimentarios que actualmente se desechan pueden ser la fuente para la obtención de nuevos ingredientes alimentarios ricos en múltiples sustancias, compuestos puros, fibras, etc, denominadas subproductos, que den un valor añadido a las materias primas, además de paliar el problema medioambiental. Los subproductos se definen como las sustancias resultantes de un proceso de producción cuya finalidad no es la obtención de estas. Según el artículo 4 del capítulo 1 de la Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular, para que una sustancia pueda considerarse subproducto debe cumplir estas cuatro condiciones:

- a) Que la sustancia vaya a ser utilizada posteriormente,
- b) Que la sustancia pueda utilizarse sin someterse a una transformación posterior distinta de la práctica industrial habitual,

- c) Que la sustancia se produzca como parte integrante de un proceso de producción, y
- d) Que el uso posterior cumpla todos los requisitos pertinentes relativos a los productos, así como a la protección de la salud humana y del medio ambiente, sin que produzca impactos generales adversos para ellos.

En la figura 1 se puede observar el procedimiento para la declaración de subproducto.

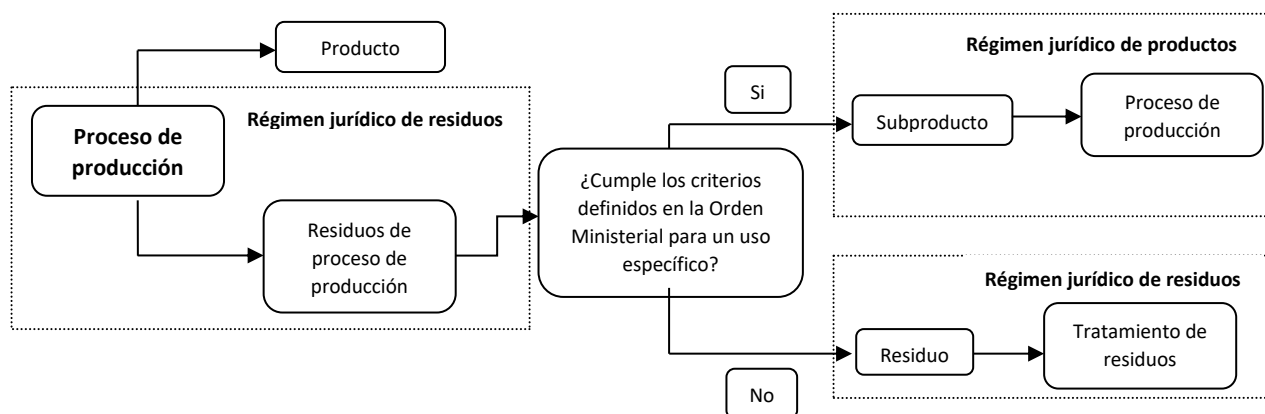


Figura 1. Procedimiento para la declaración de subproducto (MAPAMA, 2016).

Los subproductos obtenidos de los residuos de frutas y hortalizas son ricos en compuestos bioactivos, como polisacáridos, polifenoles, aceites esenciales, pigmentos, proteínas, saborizantes, enzimas, y fibras dietéticas (Marić et al., 2018). Estos compuestos son beneficiosos para la salud por la prevención de enfermedades, por sus propiedades antioxidantes, antidiabéticas, antihipertensivas, inmunomoduladoras, antiinflamatorias y anticancerosas (Moreira et al., 2019; Villanueva-Suárez et al., 2019).

Algunos ejemplos de compuestos que se encuentran en los subproductos de hortalizas son los compuestos fenólicos, comúnmente utilizados en la industria alimentaria porque evitan la oxidación y el enranciamiento de los lípidos. Estos compuestos también tienen una función tecnológica como aditivos (El Kantar et al., 2018) contribuyendo a mantener el color y la calidad sensorial de los productos frescos y procesados (Mannozi et al., 2018).

Otros compuestos que se pueden encontrar en los subproductos de hortalizas son las fibras dietéticas, carbohidratos no digeribles y lignina. Estas fibras tienen tanto función fisiológica por su poder hipoglucémico, como función tecnológica por su capacidad de cambiar la textura de los alimentos. (Okolie Chigozie et al., 2019; Villanueva-Suárez et al., 2019).

Una vez extraídos, estos compuestos se pueden incorporar a una matriz alimentaria, mejorando su biofuncionalidad (Okolie Chigozie et al.; 2019). A continuación, se

describen diferentes frutas y hortalizas que son fuente de residuos de gran importancia tanto por la cantidad generada como por su riqueza en compuestos bioactivos.

1.1. Cardo

El cardo (*Cynara cardunculus* L.) es nativo de la cuenca mediterránea (Zayed et al., 2020; Mandim et al., 2021), pero sobre todo es típico de la zona del valle del Ebro.

En España se cultivan unas 1.350 hectáreas de cardo, en las que se obtiene una producción aproximada de 31.500 t. Las mayores extensiones dedicadas a este cultivo se ubican en el Valle del Ebro (18.300 t), Levante (5.950 t) y Andalucía (5.050 t). Desde España, se exporta a los países europeos unas 1.300 t anuales de cardo (MAPA, 2016).

Sus partes internas (la parte tierna de la penca) son las que comúnmente se consumen, mientras que sus brácteas o pencas externas son las partes que se desechan (un 65%). Estas partes vegetales se consideran fuentes de compuestos bioactivos, fibras dietéticas, polifenoles, lípidos, flavonoides, cumarinas y terpenoides (Chihoub et al., 2019; Mandim et al., 2021).

Entre las propiedades que se les atribuyen a los compuestos bioactivos que contiene el cardo, se encuentran su capacidad para reducir la inflamación, y sus efectos antioxidantes, antimicrobianos, hepatoprotectores, anticancerígenos y expectorantes. Además, tiene diversas aplicaciones industriales como coagulantes para la producción de productos lácteos como los quesos, para la producción de pasta de papel debido a su alto contenido en celulosa y para la producción de biomasa y bioenergía (Zayed et al., 2020; Mandim et al., 2021).

1.2. Alcachofa

La alcachofa se consume tanto fresca como en conserva o congelada. Europa tiene el 85% de la producción mundial de alcachofa (Mabeau et al., 2007), siendo España el segundo mayor productor después de Italia con 215.000 t al año (Villanueva-Suárez et al., 2019). El 50% de la producción de alcachofa se destina a la industria conservera y congeladora (Falleh et al., 2008). En estas industrias, se generan más de 150.000 t de desechos de alcachofa al año, los cuales se usan normalmente para alimentación animal. Estos residuos consisten en tallos, brácteas y restos del receptáculo, lo que supone un 70-80% del total de la alcachofa (Villanueva-Suárez et al., 2019). De estos residuos, se obtienen subproductos con altas concentraciones de compuestos fenólicos como los flavonoides y el ácido cafeoilquímico (Lombardo et al., 2010), que disminuyen la oxidación de las lipoproteínas de baja densidad y presentan funciones antibacterianas, y hepatoprotectoras (Villanueva-Suárez et al., 2019).

Los subproductos obtenidos de los residuos de la alcachofa también contienen fibra dietética, sobre todo inulina, que muestran efectos fisiológicos beneficiosos en humanos. Pueden actuar como prebióticos, aumentando la cantidad de bacterias beneficiosas en el colon, y también tienen un efecto hipoglucémico (Díaz et al., 2019). Además, esta fibra contribuye al tratamiento de la disfunción hepatobiliar, los síndromes dispépticos, las enfermedades gástricas, y la reducción del colesterol (Villanueva-Suárez et al., 2019).

1.3. Champiñón

La producción mundial de hongos comestibles cultivados ha crecido desde finales de la década de los 90, aumentando hasta 10,3 millones t en 2016. China es el principal productor mundial de hongos comestibles con un 85% de la producción.

El champiñón; *Agaricus bisporus* (*A. bisporus*), representa el 15% de la producción mundial total de hongos (Yanan et al., 2019). Este hongo se cultiva extensamente en toda Europa y América del Norte, contribuyendo del 35 al 45% en la producción mundial total de hongos comestibles (Ramos et al., 2019). En España la producción anual es de 120.000 t (10% de la producción europea), siendo La Rioja una de las mayores zonas productoras con un 3,5 % de la producción mundial y un 55% de la producción nacional (Francia Verde y Pérez-Matute, 2013). Sin embargo, en todos los países se genera una gran cantidad de desechos de hongos durante la producción industrial, que se compone principalmente de migas de champiñón (escaldadas y no escaldadas), tallos y cuerpos deformados o que no cumplen con las especificaciones establecidas por los minoristas, y representa entre el 5 y el 20% de los cuerpos fructíferos desechados (Aguiló-Aguayo et al., 2017; Ramos et al., 2019).

Esos residuos de champiñón tienen propiedades anticancerígenas, antivirales, inmunomoduladoras, antimicrobianas, anticoagulantes, antidiabéticas, antioxidantes y antitumorales, porque contiene sustancias bioactivas tales como los polisacáridos (fibras, quitina, β -glucano), (Chakraborty et al., 2019) y proteínas (Aguiló-Aguayo et al., 2017; Yanan et al.; 2019).

Además, se han identificado metabolitos secundarios, como los compuestos fenólicos y el ergosterol con capacidad antioxidante (Ramos et al., 2019).

1.4. Tomate

El tomate se transforma mayoritariamente en conserva, siendo su presentación como tomate triturado concentrado la más frecuente, pues es un producto intermedio del que luego se obtendrán derivados como ketchup y salsas entre otros (Ho et al., 2015). A nivel mundial, se procesan aproximadamente 164 millones de t de tomate al año (Szabo et al., 2018). De estos, en Estados Unidos se procesan más de 13 millones de t, y en Europa

10 millones de t (Ho et al., 2015). España ocupa el octavo lugar entre los países productores de tomate, con un volumen de 4,8 millones de t (MAPAMA, 2016). Durante los procesos para obtener tomate triturado, se generan residuos como la piel y las semillas, que representan un 12% del total de tomate procesado. Estos residuos son ricos en carotenoides, entre otras sustancias de interés (Szabo et al., 2018).

El licopeno es el carotenoide que se encuentra mayoritariamente en la piel del tomate. Este antioxidante se encuentra en una concentración cinco veces mayor en la piel que en la pulpa. El consumo de licopeno de los tomates se ha asociado con la protección contra el daño oxidativo del ADN y las propiedades anticancerosas, lo que lo convierte en un compuesto de interés a nivel farmacológico y nutricional. Además, desde el punto de vista tecnológico, es un pigmento natural con el que se puede sustituir los colorantes alimentarios sintéticos (Ho et al., 2015).

1.5. Aceituna

Las aceitunas son los frutos del olivo con los que se elabora aceite. Los olivos se cultivan mayoritariamente en los países mediterráneos. Siendo España el principal productor de aceitunas con una producción de 500 mil toneladas al año (De los Santos et al., 2019), lo cual genera residuos como pulpa de oliva y alperujo, representando 35- 40% del peso total de las olivas. La cantidad de residuos que se obtienen son 2,9 millones de t al año (Nunes et al., 2016).

De estos residuos, se pueden obtener subproductos que contienen, pigmentos, compuestos fenólicos, y fibras dietéticas como pectina y polisacáridos (Nunes et al., 2016). Sólo el 2% de los compuestos fenólicos se encuentran en el aceite de oliva, mientras que en el alperujo está el 98% de esos compuestos (Lama-Muñoz et al., 2019). Además, estos residuos son ricos en otros compuestos con capacidad antioxidante como carotenoides y ácidos grasos (Sataria et al., 2018).

Abu Tayeh et al. (2020) encontraron que los restos sólidos que generan las almazaras al producir aceite son un residuo agrícola abundante del que no se conocía ninguna vía de revalorización. Por ese motivo, estudiaron el secado mediante microondas, tecnología que puede ayudar a la revalorización de estos residuos, pero observaron que al alcanzar temperaturas mayores de 140°C se formaron compuestos perjudiciales como el ácido acético o el furfural.

1.6. Fresa

La fresa es una de las frutas más consumidas tanto fresca como procesada. A nivel mundial se produjeron 11 millones de t de fresas en 2014. Estados Unidos es el principal productor con el 12,2% de la producción, seguido de México, Turquía y España (Rodríguez-Gutiérrez et al., 2019). En España se produjeron 292.101 t de fresas en el año 2016 (MAPAMA, 2016).

La mayor parte se destina al consumo en fresco, pero un 21% de las fresas se usan para la producción de mermelada o zumo, o la mezcla con yogures. En la etapa de producción de estos productos se generan residuos, las pepitas y restos de piel de la fresa (Rodríguez-Gutiérrez et al., 2019).

Estas pepitas y restos de piel de la fresa representan el 7% del peso de las fresas procesadas. Estos residuos contienen gran cantidad de compuestos bioactivos, como minerales esenciales, vitamina C, ácidos grasos, azúcares, carotenoides y compuestos fenólicos, principalmente antocianos, y flavonoides. También se encuentran ácidos urónicos y pectinas. Otros compuestos presentes son fibras, vitaminas del grupo B, vitamina E, potasio, ácido fólico, con propiedades antiinflamatorias, antioxidantes, anticancerígenas y hepatoprotectoras (Trujillo-Reyes et al., 2019).

2. Obtención de subproductos

Para la obtención de subproductos es necesario realizar tratamientos físicos, químicos, enzimáticos o sus combinaciones, que permiten extraerlos y disponer de ellos. Mediante las técnicas de extracción convencionales se rompen las paredes celulares y se obtienen los compuestos de interés, pero son métodos muy costosos y contaminantes del medio ambiente (Okolie et al., 2019). Por ello, se han buscado otros métodos que mejoren la extracción como microondas, pulsos eléctricos y ultrasonidos.

A continuación, se exponen muy brevemente tanto los métodos convencionales de extracción como las técnicas novedosas que se pueden utilizar para mejorar el proceso.

2.1. Métodos de extracción convencional

Los métodos de extracción convencional como extracción sólido/líquido, Soxhlet, entre otros, son simples y baratos. En ellos, se emplea gran cantidad de disolventes y/o la aplicación de calor y agitación, y dependen de la polaridad del disolvente (Peanparkdeea and Iwamoto, 2019). Mediante estas técnicas, se rompe la pared celular lo que permite la liberación de polisacáridos, lípidos, ácidos nucleicos y fitoquímicos, pero mezclados con contaminantes, por lo que es necesario purificarlos (Okolie et al., 2019).

Las técnicas convencionales de extracción utilizan altas temperaturas (próximas al punto de ebullición, 100°C) que pueden degradar a los compuestos, los tiempos de extracción que requieren son largos (60 min), lo que disminuye su eficiencia, implicando un alto consumo de solventes y energía y, además provocan contaminación ambiental (El Kantar et al., 2018; Seixas et al., 2014).

Para elegir el solvente adecuado, hay que tener en cuenta la solubilidad del compuesto a extraer, la penetración del solvente, la interacción que tienen con la matriz a utilizar y la cinética de transferencia de masa del proceso (Kaderides et al.; 2019, Ribeiro et al., 2019).

Si aumenta la polaridad del disolvente y disminuye la viscosidad, aumenta el rendimiento de extracción y, cuanto mayor es el peso del disolvente, menor es la polaridad (Kaderides et al., 2019).

Por tanto, para una correcta obtención de los subproductos, hay que tener en cuenta factores como la temperatura, la presión y el tiempo de extracción, además del tamaño de las partículas, el pH y las características del solvente, porque pueden provocar la degradación de los compuestos de interés (Okolie Chigozie et al., 2019; Sataria et al., 2018; Marić et al., 2018). En la industria agroalimentaria, el agua se utiliza como solvente de extracción ya que no perjudica al medio ambiente, no deja residuos y es económico (Sataria et al., 2018). Hay otros compuestos que no se solubilizan en agua y se extraen

mediante otros disolventes como el etanol o mezclas etanol:agua (Kaderides et al., 2019).

2.2. Métodos para mejorar la extracción

Debido a las desventajas de los métodos convencionales descritas en 2.1., se están buscando métodos que ayuden a la extracción para la revalorización de subproductos de diferentes residuos como la extracción asistida por microondas (MAE), la extracción asistida por Pulsos eléctricos (PEAE), y la extracción asistida por ultrasonidos (UAE). Para poder aplicarlos en la industria alimentaria, se necesita estudiar la viabilidad de los procesos de extracción asistida mediante MAE, PEAE y UAE, su optimización y determinar sus efectos sobre los compuestos de interés (Seixas et al., 2014, Moreira et al., 2019).

2.2.1. Extracción asistida mediante microondas (MWAE)

La tecnología de microondas (MW) utiliza la energía electromagnética (radiaciones no ionizantes) con frecuencia de 300 MHz a 300 GHz y una longitud de onda entre 0.001 a 1 m. Cuando la radiación pasa al medio, esta energía es absorbida y convertida en energía térmica. Ese calor genera en las moléculas la conducción iónica y la rotación de los dipolos (Marić et al., 2018).

Para que se produzca la conducción iónica, la energía de las MW inicia una transferencia electroforética de iones y electrones, generando el campo eléctrico que causa el movimiento de las partículas. Mientras que la rotación de los dipolos es el desplazamiento alternativo de las moléculas polares, que empieza cuando las moléculas se esfuerzan por alinearse con el campo eléctrico existente. Estos dos fenómenos hacen que se libere energía que provoca un calentamiento rápido, y la rotura de las células por tanto la difusión de los compuestos en un solvente (Marić et al., 2018).

Como se puede observar en la figura 2, al entrar en contacto las microondas con la célula se provoca la rotura de esta liberándose los compuestos en el disolvente.

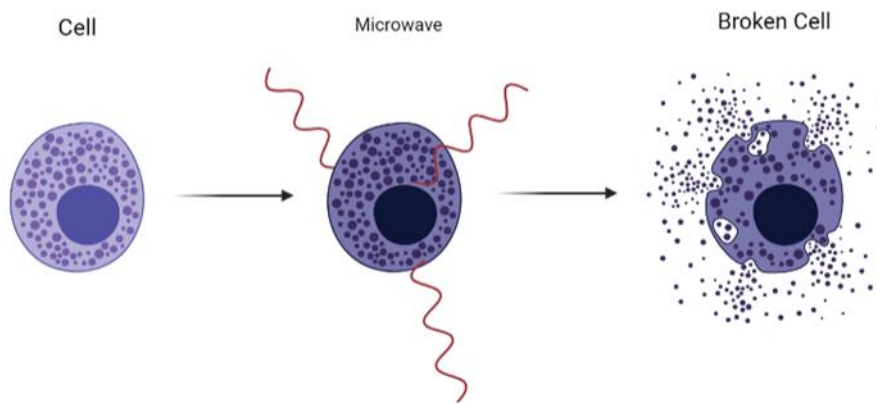


FIGURA 2. Efecto de las ondas microondas en las células (fuente propia realizado mediante Biorender).

El equipo de tratamiento por MW está compuesto por: la cavidad del tratamiento, los magnetrones que generan la radiación y una cinta que mueve el producto por la cavidad. Todo esto se representa en la figura 3.

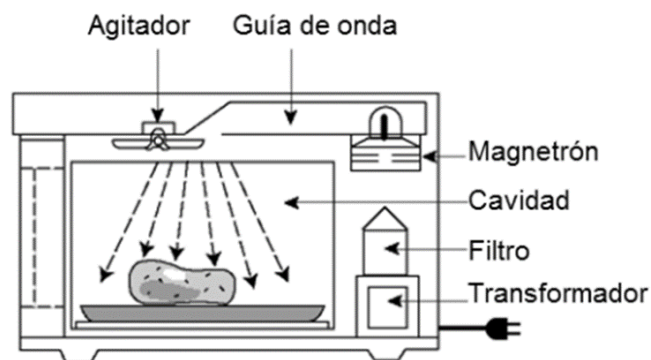


FIGURA 3. Microondas doméstico (Plaza González, 2015).

MW se utiliza en la industria alimentaria como complemento a algunos métodos convencionales de extracción para el procesamiento de subproductos (Marić et al., 2018). Esta tecnología alternativa a los métodos convencionales tiene ventajas como: la facilidad de uso, la posibilidad de controlar el proceso para que no haya grandes aumentos de temperatura, menor tiempo del proceso de extracción y menor uso de solvente, es respetuosa con el medio ambiente, y consume menos energía (Ho et al., 2015; Sataria et al., 2018; Kaderides et al., 2019; Razzaghi Seyed et al., 2019).

Debido al calentamiento rápido provocado por las MW, es necesario controlar el tiempo de exposición para evitar la degradación de los compuestos fenólicos (Kaderides et al.,

2019). Además, controlar las temperaturas permite obtener moléculas funcionales, degradando menos los antioxidantes y fenoles que las técnicas convencionales (Sataria et al., 2018).

El mejor solvente para la MWAE es el etanol, que cambia la constante dieléctrica por su mayor capacidad para absorber las microondas y convertirlas en calor, provocando la ruptura de las células y así produciendo la difusión de los compuestos (Kaderides et al., 2019). Hoy en día se tiende a buscar disolventes que sean más respetuosos con el medio ambiente, como el agua porque es un solvente que nos permite extraer compuesto sin necesidad de purificarlos con los cual ahorra en tiempo y gasto de solventes. Además las mezclas de agua:etanol se pueden utilizar para MWAE porque aumenta la extracción de compuestos en comparación con la utilización de agua sólo, y evita explosiones dentro de la cavidad del microondas.

A la hora de obtener los subproductos, hay que limitar la temperatura porque, aunque el aumento de las temperaturas se corresponde con una solubilidad mejorada y la rotura de la membrana del orgánulo, todos los compuestos excepto la fibra, son termolábiles y se degradan. En este caso MAE puede proporcionar una solución, al inducir un calentamiento rápido principalmente en los constituyentes polares (Ho et al., 2015).

Para poder calcular el rendimiento del proceso se tiene en cuenta el tiempo de tratamiento y la potencia del MW (Marić et al., 2018). Los otros parámetros que pueden influir de forma indirecta son la cantidad de muestra tratada, el ph y la temperatura. El rendimiento del proceso se calculó mediante la ecuación que se describe en el apartado 1.1. de Materiales y Métodos.

2.2.2. Extracción asistida por Pulsos Eléctricos (PEFAE)

La tecnología de pulsos eléctricos, PEF, consiste en la aplicación, de forma intermitente, de campos eléctricos durante periodos de tiempo del orden de microsegundos a un material colocado entre dos electrodos, sin apenas incrementar la temperatura del producto tratado y, por lo tanto, sin alterar sustancialmente sus propiedades sensoriales y nutricionales. Dependiendo del tipo de células y de su geometría, se utiliza una intensidad u otra, que puede estar en el rango de 0,1-1 kV/cm para producir una permeabilización reversible para la inducción de estrés en células vegetales, de 0,5 a 3 kV/cm para una permeabilización irreversible de tejido vegetal y animal y, por tanto, facilitar la extracción de solutos, y entre 10 y 40 kV/cm para la permeabilización irreversible de las células microbianas que pueden llevar a la pasteurización del producto (Puértolas et al., 2013).

El equipo para la PEFAE está formado por las siguientes partes: un generador de pulsos de alto voltaje, una cámara de tratamiento (estática o continua) y un sistema de

monitoreo y control (Moreira et al., 2019). En la figura 4 se muestra una representación muy esquemática de un generador y una cámara de tratamiento con PEFAE.

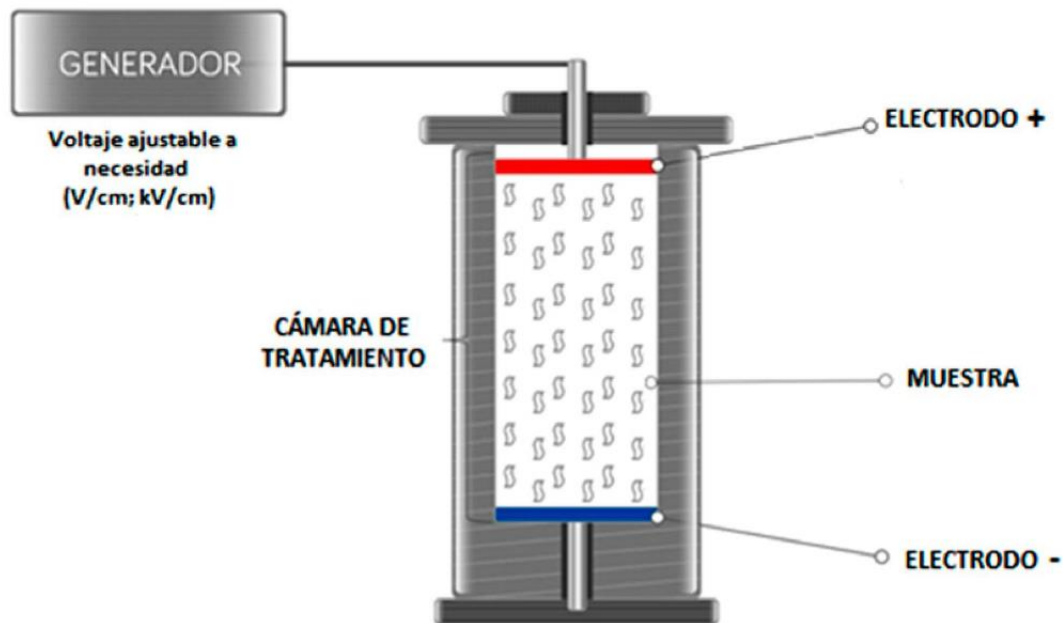


FIGURA 4. Generador y cámara de tratamiento con PEF (Vivanco D. et al., 2021).

Los PEF son una tecnología no térmica, que tiene menos gasto energético, menos aumento de temperatura, menor uso de solventes, y tiempos más cortos de proceso respecto a los métodos de extracción convencional. Esta técnica ayuda a mejorar la extracción y el secado, sin tener las desventajas de los métodos convencionales, como la contaminación ambiental y las altas temperaturas (Moreira et al., 2019).

Las variables a tener en cuenta al aplicar esta tecnología son la intensidad de campo, la polaridad, la anchura y el número de pulsos, así como la frecuencia de repetición de pulsos y la distancia entre los electrodos. Además, influyen la cantidad de muestra y de disolvente, el tipo de disolvente y la temperatura de extracción.

El uso de PEFAE para favorecer la extracción de los compuestos bioactivos altera la permeabilidad de la célula al inducir electroporación (formación de poros en la membrana celular) y así se liberan los compuestos bioactivos que contiene la célula en el disolvente (Mannozi et al., 2018; El Kantar et al., 2018).

La PEFAE permite mejorar la extracción de compuestos como inulina, proteínas, polisacáridos, polifenoles, pigmentos, aromas, fitoquímicos y otros, como subproductos de frutas y vegetales (Moreira et al., 2019).

2.2.3. Extracción asistida por Ultrasonidos (USAE)

Los ultrasonidos (US) son ondas electromagnéticas que se encuentran en frecuencias por encima de los niveles de audición del ser humano que van de 20 kHz a 10 MHz. Los US se clasifican según varios criterios: la cantidad de energía generada, caracterizada por la potencia acústica (W), la intensidad acústica (W/m^2) o la densidad de potencia acústica (W/m^3). Además, en lo relativo a la intensidad, se pueden dividir en dos tipos: de alta intensidad y de baja intensidad (Ivanovs y Blumberga, 2017).

Los US de baja intensidad tienen una frecuencia alta (de 100 kHz a 1 MHz), y una potencia baja ($< 1 W/cm^2$); se utilizan en análisis no destructivos y como método analítico de evaluación de la calidad para proporcionar información sobre las propiedades físicas y químicas de los productos alimenticios como la firmeza, la disposición de compuestos, el contenido de azúcar o la acidez. Sin embargo, los US de alta intensidad tienen una frecuencia baja (100 kHz -16 kHz) y una potencia alta ($10-1000 W/cm^2$) y se utilizan para acelerar y mejorar la eficacia de la preparación de muestras (Ivanovs y Blumberga, 2017).

El equipo de US está formado por un tanque, una camisa de agua y unos transductores que generan los US y un sistema de monitoreo y control (Figura 5).

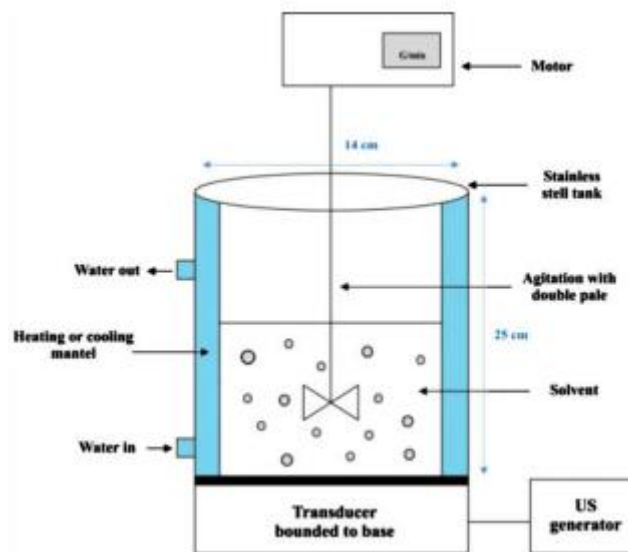


FIGURA 5. Partes de un equipo de ultrasonidos (Virot et al., 2010).

En el uso de los US, hay que tener en cuenta tres variables que podrían afectar a la eficacia de la extracción de compuestos: la potencia ultrasónica, la temperatura y la duración de la sonicación (Virot et al., 2010).

Estudios recientes han demostrado que la USAE mediante cavitación acústica e impacto mecánico puede mejorar la eficacia de la extracción respecto a las técnicas convencionales (Viroto et al., 2010; Bachtler y Bart, 2021).

La cavitación acústica puede alterar la pared celular facilitando la penetración del disolvente en el material vegetal y permitiendo que la célula libere el producto. El impacto mecánico ultrasónico ofrece una mayor penetración de los disolventes en la matriz de la muestra porque aumenta la superficie de contacto entre el disolvente y los compuestos extraíbles (Renard, 2018).

La USAE requiere menos tiempo de extracción y menor consumo de disolvente y puede realizarse a bajas temperaturas, lo que puede reducir el daño causado por la temperatura y minimizar la pérdida de sustancias bioactivas (Viroto et al., 2010; Ivanovs y Blumberga, 2017).

Hay estudios que demuestran la viabilidad de la extracción asistida por USAE. Viroto et al. (2010), utilizaron la USAE de polifenoles de orujo de manzana, un subproducto de la producción de sidra, demostrando que la concentración de polifenoles era un 20% mayor que con la extracción convencional.

Li et al. (2013) diseñaron un método ecológico, barato y fácil de usar para la extracción de carotenoides de zanahorias frescas asistida por US con aceite de girasol como solvente, obteniendo 334,75 mg/l en 20 min mientras que con el método convencional con hexano obtuvieron 321,35 mg/l en 60 min, demostrando la conveniencia de utilizar el método diseñado.

Además, Vernés et al. (2019) en su estudio para la extracción de proteínas con y sin US, obtuvieron un 229% más de proteínas de espirulina que el proceso convencional sin US.

2.3. Métodos para deshidratar mediante microondas (MWD)

Durante los últimos años, se pretende obtener subproductos con el mínimo procesado (Upcycling) como puede ser la deshidratación mediante MW.

Al igual que en la MWAE, se utiliza la energía electromagnética que abarca frecuencias entre 300 MHz y 300 GHz, tal y como está explicado en el apartado 2.2.1.

Para la estabilización de los materiales vegetales es necesaria la inhibición de los microorganismos. Las frutas y hortalizas son deshidratadas, generalmente por aire caliente, a una temperatura de 60-74°C, y las hortalizas a 57-93°C. Estos rangos cubren los puntos de muerte térmica de algunos mohos como, por ejemplo, 60°C para *Rhizopus nigricans*, 52°C para *Monilinia fructicola*, 58°C para *Penicillium digitatum*. Si el calentamiento no es uniforme, algunas piezas del material vegetal deshidratado pueden

tener mayor contenido de humedad que otras, permitiendo el desarrollo microbiano si no se reduce la humedad rápidamente (Downes FP, Ito K, eds., 2001).

Por ello, las harinas presentan humedades cercanas al 14-14,5%, siendo el límite legal en España el 15% (Innograim, 2023) y los alimentos de muy baja humedad o secos (escasamente perecederos) presentan un valor menor al 5%. Se considera que el contenido de humedad más adecuado de las frutas y hortalizas deshidratadas está por debajo del 7% ya que, con menor humedad, el crecimiento microbiano no es posible, evitando el deterioro y podredumbre en los productos (Gascón et al., 2013). En esta tesis doctoral como se utilizaron residuos que pueden tener una alta carga microbiana, se deshidrataron hasta el porcentaje de humedad establecido para alimentos secos y así inactivar el crecimiento microbiano.

Además, otros autores como Ohaco y De Michelis (2015) y de Alur y Venugopal (1999), también tienen en cuenta la actividad de agua (α_w) que se define como la disponibilidad de agua en los alimentos para el crecimiento microbiano. Estos autores sugieren para los alimentos secos una α_w inferior a 0,65, ya que inhibe el crecimiento microbiano, siempre que las condiciones de envasado y almacenamiento impidan la captación de humedad por parte del producto.

Por lo tanto, las MW además de utilizarse para el secado de alimentos inhiben e inactivan enzimas y microorganismos (Marić et al., 2018).

3. Diseño de nuevos alimentos incorporando los subproductos

Para demostrar que los subproductos ricos en compuestos bioactivos, obtenidos mediante secado por MW, pueden ser utilizados como ingredientes en alimentos formulados, se han incorporado los subproductos a diferentes matrices alimentarias. Con ello, se pretende mejorar su biofuncionalidad gracias a los compuestos que contienen mejorando el perfil nutricional del alimento (Okolie Chigozie et al.; 2019), confiriendo también propiedades tecnológicas y organolépticas al alimento. Además, gracias al uso de estos subproductos se logra disminuir el desperdicio alimentario.

En la tabla 1, se muestran algunos ejemplos de alimentos que se han desarrollado con subproductos deshidratados y se han utilizado como sustitutos de harinas o de aditivos y como ingredientes adicionales que aportan un valor al alimento.

TABLA 1. Ejemplos de productos enriquecidos con subproductos.

Producto	Enriquecimiento	Residuo	Referencia
Galletas	Fibra	Hojas y tallos de alcachofa	Díaz A. et al.; 2019
Extruidos, cárnicos, aceite pescado, mermeladas, conservas, productos lácteos y alimentos dietéticos	Fibra (pectina), polifenoles	Pieles de manzana	Rabetafika et al.; 2014
Pan y pasteles	Colorante natural (extracto lipídico de carotenoides)	Pieles de mandarina	Ordoñez-Santos L. E. et al.; 2022
Obleas para empanadillas	Polifenoles, flavonoides, glucósidos cianogénicos, b-caroteno, tocoferol y Vitamina C	Pieles de manzana, plátano, y hojas de aloe vera y de baqueta	Biswas A. K. et al.; 2015
Galletas y pan	Polifenoles	Orujo de oliva	Di Nunzio M. et al.; 2020
Yogurt	Fibras, polifenoles	Tallo duro de espárrago	Chitrakar B. et al.; 2022

OBJETIVOS

1. Objetivo general:

El objetivo general de la presente tesis es la obtención de subproductos a partir de residuos vegetales mediante deshidratación o extracción asistida por MW, PEFAE o USAE para ser incorporados posteriormente en matrices alimentarias de manera que resulten productos alimentarios de alto valor nutricional.

2. Objetivos específicos:

- ❖ Optimización de las condiciones de estabilización de los residuos mediante MWD.
- ❖ Optimización de las condiciones de extracción por MWAE, PEFAE o USAE.
- ❖ Caracterización de los subproductos ricos en compuestos bioactivos obtenidos.
- ❖ Obtención de alimentos de alto valor nutricional mediante la incorporación de los subproductos en diferentes matrices alimentarias.

MATERIAL Y MÉTODO DE ESTUDIO

1. Obtención de los subproductos

Para la obtención de subproductos y su estudio en esta tesis, se han utilizado residuos de cardo, alcachofa, champiñón, tomate, fresa y alperujo, todos ellos procedentes de industrias del valle del Ebro. En la tabla 2, se presentan los residuos utilizados y los compuestos bioactivos principales que están presentes en los subproductos de cada uno de ellos:

TABLA 2. Productos, residuos y compuestos bioactivos utilizados en la presente tesis doctoral.

Producto	Residuo	Compuesto bioactivo
Tomate	Piel y pericarpio	Carotenoide (licopeno), Compuestos fenólicos, fibra
Alcachofa	Hojas y tallos	Compuestos fenólicos, Fibras (inulina)
Aceitunas	Pieles y hueso	Polifenoles, fibra, pectina
Fresa	Pieles y pepitas	Compuestos fenólicos, (antocianinas), fibras
Cardo	Brácteas o pencas	Compuestos fenólicos, fibras
Champiñón	Migas de champiñón escaldadas	Compuestos fenólicos, fibras, proteínas, betaglucanos

En la figura 6, se muestran los residuos recogidos en la industria alimentaria en la que se generaron. Las migas de champiñón se recogieron escaldadas después del procesado.



a) Residuo de Aceitunas
(Alperujo)



b) Residuo de Fresa



c) Residuo de Cardo



d) Residuo de Alcachofa



e) Residuo de Champiñón
(Migas escaldadas)



f) Residuo de Tomate

FIGURA 6. Residuos para valorizar mediante las tecnologías propuestas.

Los residuos obtenidos se almacenaron en bolsas a -18°C hasta su utilización. El cardo se cortó en trozos una vez congelado para evitar que las fibras colapsaran la cortadora. Dos días antes del tratamiento con las diferentes tecnologías se descongelaron en refrigeración. Una vez descongelados, se procedió a su tratamiento de secado o de extracción.

A continuación, se muestra el diagrama de flujo (figura 7) establecido en el plan de trabajo de la presente tesis para su parte experimental:

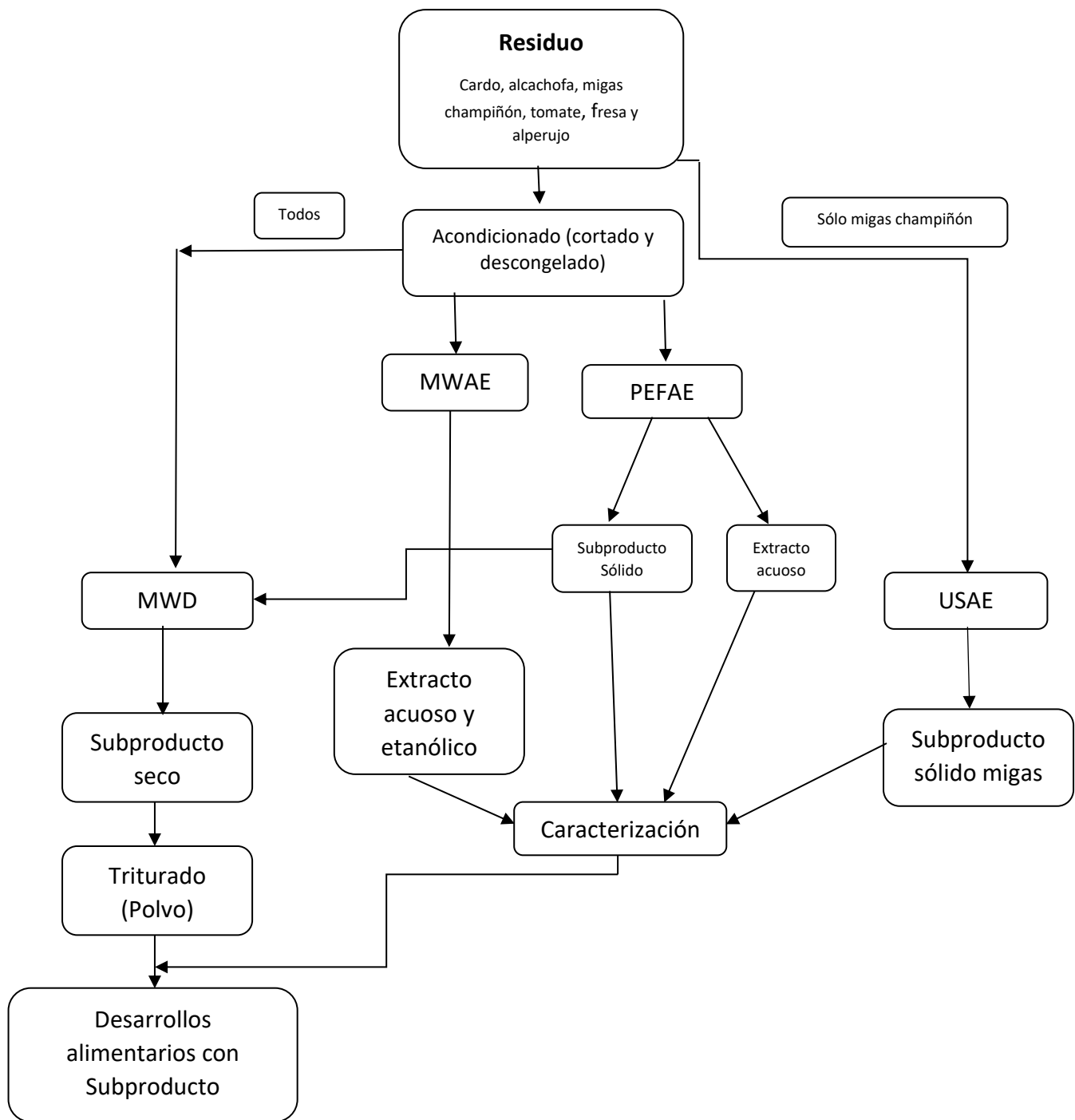


FIGURA 7. Diagrama de flujo realizado para la obtención de los subproductos.

MWD: deshidratación mediante microondas, MWAE: extracción asistida mediante microondas, PEFAE: extracción asistida mediante pulsos eléctricos, USAE: extracción asistida mediante ultrasonidos.

1.1. Tratamientos con microondas

Los tratamientos con microondas se realizaron con el equipo microondas (SI-MAQ0101, Sairem ibérica, España) de las instalaciones de Ctic Cita (figura 8) con una frecuencia de 2,45 GHz. El equipo contiene 4 magnetrones, cada uno de ellos con una potencia de 1000W.

Para la selección de las potencias y tiempos de tratamiento MW no se encontró uniformidad entre los estudios de los diferentes autores. Algunos de ellos, como Xiaokang et al. (2020), Abd El-Aziz et al. (2021) y Rudic et al. (2021) utilizaron potencias menores (200-800W) a las que permite el equipo MW del que se dispone, mientras que otros autores como Soares et al. (2023) utilizaron un MW doméstico (800W potencia máxima).

Para realizar un estudio completo se utilizaron las potencias de 1000W, 2000W, 3000W y 4000W, siendo 4000W el máximo de potencia que permite el equipo de las instalaciones de Ctic Cita. Además, en todo momento se mantuvieron los 4 magnetrones repartidos en la cavidad encendidos, consiguiendo la uniformidad del tratamiento porque cada magnetrón emite la misma potencia hasta alcanzar la potencia programada en el equipo.

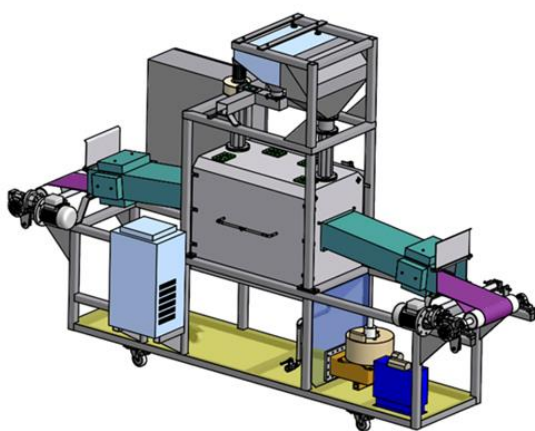


FIGURA 8. Equipo microondas situado en la Planta Piloto de Ctic Cita.

Mediante el tratamiento con microondas se obtuvieron dos tipos de subproductos:

- Subproductos deshidratados mediante el tratamiento directo por MW de los residuos.
- Extractos obtenidos por la MWAE del residuo.

Todos los subproductos mostrados en la tabla 2 y la figura 7, se caracterizaron y utilizaron posteriormente para la formulación de alimentos funcionales.

La temperatura se controló con sondas de fibra óptica (Optocon, Enelec, España), colocadas una en la cavidad del equipo microondas y dos en el producto repartidas en ambos extremos, así se pudo comprobar la diferencia de temperatura en las diferentes partes de la bandeja.

Se realizaron perfiles de temperatura para conocer la evolución de esta durante el tratamiento. También se tomaron los datos de la energía absorbida y reflejada cada 10 segundos, con los que se calculó la densidad energética (D.E. en W h/kg), que es la cantidad de energía consumida con respecto al tiempo de secado de un producto mediante la ecuación (1).

$$D. E. = \frac{\text{potencia absorbida (W)} \times \text{tiempo (h)}}{\text{Peso (kg)}} \quad (1)$$

Además, se analizó la humedad del subproducto en diferentes tiempos del proceso para conocer su evolución (curvas de secado), y comprobar que se alcanzaba la humedad deseada, tal como se detalla en el apartado 3 de Materiales y Métodos.

A continuación, se detallan los pasos llevados a cabo para obtener los dos tipos de subproductos.

1.1.1. Deshidratación de residuos mediante microondas (MWD)

En la deshidratación de los residuos una vez descongelados, se buscó reducir su humedad por debajo del 5% para evitar la proliferación de microorganismos. Los residuos se deshidrataron mediante MW, a diferentes potencias, 25%, 50%, 75% y 100%, que corresponde a 1000W, 2000W, 3000W, y 4000W respectivamente (4 ensayos por residuo) con tiempos máximos de 30 minutos.

Dentro de la cavidad del microondas se colocó una bandeja de polipropileno con una fina capa de residuo. Las cantidades que se trataron de cada residuo en los distintos tratamientos fueron, 175g de cardo, 110g de alcachofa, 165g de champiñón y 115 g tomate aproximadamente. Además, se introdujo aire frío, para evitar una subida excesiva de la temperatura en el interior del producto, y se trabajó con la cinta en vaivén para favorecer la homogeneidad del tratamiento y simular un tratamiento en continuo con la cinta transportadora. Posteriormente, el subproducto se trituró en un molinillo hasta obtener un polvo. Los subproductos obtenidos se almacenaron en bolsas de plástico a vacío a temperatura ambiente hasta su uso posterior.

Todos los subproductos deshidratados se caracterizaron según su contenido en humedad, a_w , antioxidantes, fibras, proteínas, licopeno, beta glucanos y color, tal como

se describe en el apartado 3 de Materiales y métodos. Los cálculos se expresaron en base seca con el fin de evaluar si la cantidad de compuestos de interés se veía modificada por el tratamiento.

1.1.2. Extracción asistida mediante microondas (MWAE):

Para obtener un extracto rico en compuestos bioactivos, se introdujo en la cavidad del microondas una bandeja con el residuo descongelado. De cada residuo, se utilizó una cantidad determinada, 100g de cardo, 60g de alcachofa, 68g de champiñón y 50g de tomate en 500ml de solvente, que era agua o una mezcla de agua:etanol alimentario en relación 60:40, que no necesita una purificación posterior para su uso en alimentos.

Con la mezcla agua:etanol hubo que ser especialmente cuidadoso porque el etanol es un compuesto volátil que puede causar arcos dentro de la cavidad. Estos arcos se producen cuando no hay suficiente producto y toda la energía no es absorbida. Por este motivo se añadió aspiración. Además de la aspiración, dentro de la cavidad se mantuvieron abiertas las puertas que cierran el sistema cuando no está en continuo, para que hubiera la máxima ventilación posible y evitar posibles arcos. La obtención del extracto se realizó a diferentes potencias de 25%, 50%, 75% y 100%, correspondientes a 1000W, 2000W, 3000W y 4000W, y estas se mantuvieron durante 3 min, 6 min y 9 min, con lo cual resultaron 24 ensayos diferentes para cada residuo. Los extractos obtenidos por ser líquidos se congelaron en frascos de cristal a -18°C para después caracterizarlos.

1.2. Extracción asistida mediante pulsos eléctricos (PEFAE)

En los diferentes subproductos seleccionados (tomate, alcachofa, cardo y champiñón) se realizaron seis PEFAE de moderada intensidad, seleccionando el campo eléctrico y el número de pulsos, como se muestra en la tabla 3. Estos tratamientos se realizaron a temperatura ambiente, con dos electrodos conectados entre sí y dejando una separación específica de 15 cm entre un electrodo y otro, según la bibliografía estudiada y las características del equipo.

Los parámetros utilizados (tabla 3) se seleccionaron teniendo en cuenta que se quería comprobar si sometiendo a los residuos a tratamientos PEFAE de moderada intensidad (0,5 a 3 kV/cm) y sin un número excesivo de pulsos, se puede reducir el tiempo de MWD posterior. En base a revisión bibliográfica se encontró que hasta los 2 kV/cm no se extraen los compuestos al solvente (Kit Leong et al., 2021; Naliyadhara et al., 2022), lo que permitió que los compuestos permanezcan en la parte sólida.

TABLA 3. Intensidad y número de pulsos aplicados durante los tratamientos con PEFAE.

Tratamiento	Campo eléctrico (kV/cm)	Nº pulsos
1	0,5	10
2	0,5	25
3	1	10
4	1	25
5	2	10
6	2	25

En la PEFAE se introdujo en la cámara de tratamiento (figura 9A) el residuo descongelado (670 g de cardo, de alcachofa 390 g, de champiñón 750 g y de tomate 270 g) y 1,75 L de agua de red por su contenido en minerales, factor importante para la transmisión de la corriente eléctrica, hasta que todo el residuo quedaba cubierto. La intensidad de pulsos se controló mediante el panel de control (figura 9C), Una vez finalizado el tratamiento se soltaron los electrodos con una lanza aislante (figura 9B).

Se utilizó el equipo de tratamiento con PEF (figura 9) ubicado en la planta piloto del Departamento de Tecnología, Ingeniería y Ciencia de Alimentos de la Universidad de Lleida, que permite un voltaje máximo de 70kV/cm en la descarga de PEF en una cámara de electrodos planos paralelos con distancia entre ellos de 15 cm.



FIGURA 9. Equipo para tratamiento con pulsos eléctricos de la Universidad de Lleida. A) cámara de tratamiento, B) lanza aislante y C) panel de control.

Una vez se realizado el tratamiento, se filtró y se almacenó la parte sólida en bolsas de plástico y la parte líquida (extractos) en frascos de cristal, a -18°C para su posterior análisis y utilización.

1.3. Tratamiento combinado de PEFAE y MWD

Se aplicaron tratamientos sucesivos de los residuos, realizando en primer lugar la PEFAE y después la MWD en las condiciones especificadas en tabla 4.

Para esta combinación de tratamientos, se seleccionaron los tratamientos que mejores resultados mostraron al aplicarles las tecnologías individualmente, teniendo en cuenta el tiempo, la temperatura que se alcanza y el contenido de compuestos bioactivos que se encontraron en el subproducto.

TABLA 4. Condiciones de tratamientos para la combinación de PEFAE y MWD.

Residuo	PEFAE	MWD
Cardo	1kV/cm 10p	4000W 6 min
Alcachofa	1kV/cm 10p	4000W 10 min
Champiñón	0,5kV/cm 10p	4000W 10 min
Tomate	0,5 o 1kV/cm 10p	2000W 10 min

MWD: deshidratación mediante microondas, PEFAE: extracción asistida mediante pulsos eléctricos.

1.4. Extracción asistida mediante ultrasonidos (USAE)

La USAE se realizó en el Centro para la Valorização de Resíduos (CVR), Guimarães (Portugal), utilizando un prototipo desarrollado en ese centro.

El prototipo de transductor está diseñado para un rango de frecuencia de 19,6 a 20,1 kHz y un rango de potencia de 200 a 600 W, lo que corresponde a un rango de intensidad acústica de 7 a 21 W/cm^2 aproximadamente. El funcionamiento del transductor prevé el uso de aire comprimido, a una presión de 5 bares, para facilitar el enfriamiento de los materiales piezoeléctricos.

Los tratamientos de USAE se realizaron en las migas de champiñón escaldadas, tal cual se obtienen en la industria agroalimentaria ya que tenía que utilizarse muestras en trozos pequeños y también porque contienen una elevada cantidad de proteínas (Xiaofen Du, 2023).

El equipo del que dispone el CVR es un prototipo (rango de frecuencia de 19,6 a 20,1 kHz y un rango de potencia de 200 a 600 W, lo que corresponde a un rango de intensidad acústica de aproximadamente 7 a 21 W/cm^2) creado por ellos por lo que se decidió utilizar las características del tratamiento en las que el centro ya tenía conocimiento en otro tipo de matrices. En todos los tratamientos, se desmenuzó el residuo lo máximo

posible y se mezcló con agua a la concentración deseada según las condiciones definidas previamente en el Centro (151 g producto y 24 litros de agua); y se homogeneizó durante 5 min. Una vez homogeneizado se aplicaron los US durante 10 min en el primer ensayo, 20 min en el segundo y 30 min en el tercero a una frecuencia de 19,8 kHz, con pulsos de 3 s de encendido y 1 s de apagado, a 400 W de potencia. Posteriormente se filtró la muestra para obtener la parte sólida, que es la parte donde se encuentran las proteínas.

El equipo de US (figura 10A) consta de tres partes importantes, el tanque donde se mezcló el residuo y el agua, la cabina de aplicación de ultrasonidos y el tanque donde se separó el líquido del sólido. En la figura 10B B se muestran los parámetros start frequency y Spam que se utilizaron para la calibración del equipo en vacío, hasta que se obtuvo una curva como la que se muestra en la figura 10C. Una vez se obtuvo esa curva, se guardaron los datos de calibración para empezar con el proceso. Los diferentes procesos se obtuvieron cambiando los parámetros que se muestran en la figura 10D: el tiempo de tratamiento y la separación de los pulsos de ultrasonidos



FIGURA 10. Equipo de tratamiento por ultrasonidos. A) Prototipo ultrasonidos, B) Pantalla de calibración del equipo, C) Curva de calibración y D) Pantalla de ajuste de los parámetros del proceso.

Al igual que con los subproductos obtenidos mediante PEFAE, una vez se realizó el tratamiento, se almacenó la parte sólida en bolsas de plástico a -18°C para su posterior análisis y utilización.

2. Desarrollo de los nuevos productos

Con los subproductos que se obtuvieron mediante deshidratación con MW se elaboraron diferentes alimentos. Estos subproductos se utilizaron como sustitutos de harina en bizcochos, hamburguesas veganas y pasta, o de concentrado de tomate en la salsa de tomate y el ketchup.

Se decidió elaborar una matriz con cada subproducto según sus características iniciales de textura, olor, color, etc.

El subproducto de tomate se utilizó en la elaboración de salsa de tomate y Ketchup, sustituyendo de la receta original el concentrado de tomate, por lo tanto, se necesitaba un ingrediente con sabor a tomate para no perjudicar a la calidad organoléptica. Para la utilización de la salsa se decidió elaborar pasta.

Hoy en día existen muchos tipos de pasta vegetales, siendo buena idea incorporar los subproductos de champiñón en la misma masa, incrementando además el aporte de proteínas y aportando sabor.

Las hamburguesas veganas, son comúnmente enriquecidas con fibra, es por esto que se añadió el subproducto de cardo, porque aporta poco sabor y no afecta al color.

Por último, se utilizó el subproducto de alcachofa, también rico en fibra, en la formulación de un bizcocho porque actualmente en el mercado no existen una gran cantidad de bizcochos con harina integral que pueda aportar esa cantidad de fibra, y además del precio elevado. El subproducto de alcachofa tiene un aroma y sabor neutros por lo que encaja perfectamente en un alimento que tiende a ser dulce.

Como se puede comprobar se ha llevado a cabo la elaboración de un menú completo donde se incluyen un primer, segundo plato y postre.

En la tabla 5 se pueden ver los ingredientes y su proporción para la elaboración de los diferentes productos alimentarios.

TABLA 5. Ingredientes y proporciones en los alimentos desarrollados.

INGREDIENTES	
Salsa de tomate	Agua 63,7%, Tomate concentrado 19,1%, Subproducto tomate 6,4%, Aceite de oliva 3,2%, Azúcar 3,2%, Almidón de yuca 2,9%, Sal 1,6%.
Kétchup	Agua 63,9%, Tomate concentrado 15,3%, Subproducto tomate 5,1%, Almidón de yuca 5,1%, Azúcar 3,8%, Aceite de oliva 2,5%, Vinagre 1,5%, Sal 1,3%, Cebolla 0,2%, Goma Konjac 0,2%, Aroma kétchup 0,2%, Colorante 0,2%, Ajo 0,1%, Pimienta blanca 0,07%.
Pasta fresca	Harina de trigo 61,1%, Huevos 15,1% (2), Champiñón 14,4%, Subproducto champiñón 5,5%, Aceite de oliva 3,1% y Sal 0,6%.
Bizcocho	Azúcar 14,4%, Claras 33,7%, Mantequilla 20,5%, Almendra polvo 17,7%, Harina floja 7,2%, Miel 3,6%, Subproducto alcachofa 1,8%, Fresas 1%, levadura química 0,08%.
Hamburguesa vegana	Agua 59,5%, Proteína texturizada 14,3%, Grasa coco 9,5%, Proteína patata 3,1%, Subproducto cardo 2,8%, Metil celulosa 2,4%, Sal 1,4%, Gel burger 1,2%, Maltodextrina 1,2%, Sillium 1,2%, Miel 0,9%, Cebolla 0,6%, Xantana 0,5%, Aroma 0,4%, Ajo 0,3%, Colorante rojo 0,3%, Polvo hongo 0,09%, Pimienta blanca 0,09%.

A continuación, se describen los procesos de elaboración de los desarrollos alimenticios:

- Para la elaboración de la salsa de tomate y el kétchup se utilizó el mismo método. Se mezclaron todos los ingredientes en una Thermomix (Vorwerk, España) con el programa de calentamiento (8 minutos a 120°C) y triturado (velocidad 1).
- Los ingredientes para elaborar la pasta fresca se mezclaron en una Thermomix (Vorwerk, España) durante 15 segundos a velocidad 6 y después se amasaron durante 2 minutos. A continuación, para darles la forma de espaguetis se extrusaron con una Pasta maker (Philips 7000 series, España). Una vez extrusados, se cocieron en agua hirviendo durante 2 minutos.
- El bizcocho se elaboró mezclando los ingredientes en una Thermomix (Vorwerk, España) durante 25 segundos a velocidad 5. Una vez mezclados los ingredientes, se colocó la masa del bizcocho en un molde untado con mantequilla, y se horneó (Zanussi ModeloFCS061E4, España) durante 35 minutos a 180°C. Para elaborar

el relleno se calentó la fruta y el azúcar hasta alcanzar una temperatura de 100°C y, formar una salsa espesa.

- Las hamburguesas veganas fueron realizadas mezclando todos los ingredientes hasta obtener una masa homogénea (durante unos 8 minutos). Después se les dio forma con un molde redondo y se hornearon (Zanussi ModeloFCS061E4, España) tipo mixto 7 min a 180°C.

3. Caracterización fisicoquímica de los subproductos

3.1. Humedad

La humedad se midió mediante el método AOAC (1990), según su procedimiento número 964.22. con algunas modificaciones. Esta determinación se realizó en todos los subproductos obtenidos mediante MWD y en los subproductos sólidos obtenidos mediante PEFAE y UAE. Se analizaron tres muestras de cada subproducto por tratamiento.

Para determinar la humedad, se pesó, tanto el recipiente (placas de aluminio) como la muestra (5 gramos aproximadamente) por separado, en una balanza de precisión, y se llevaron a la estufa (Estufa selecta modelo Digitheat, JP Selecta, España) a una temperatura de 80°C, y se dejaron al menos durante 24 horas hasta peso constante. Transcurrido este tiempo las muestras se introdujeron en el desecador hasta que se enfriaron. Una vez frías las muestras, se volvieron a pesar y se calculó la humedad. Los resultados obtenidos se calcularon y se expresaron en porcentaje mediante las ecuaciones 2 y 3:

$$\text{Materia seca (\%)} = 100 \times \frac{P_f - P_v}{P_m} \quad (2)$$

$$\text{Humedad (\%)} = 100 - \text{materia seca} \quad (3)$$

Donde P_f es el peso final de la placa conteniendo la muestra desecada, P_v el peso de la placa vacía y P_m la cantidad de muestra pesada en el ensayo.

3.2. Antioxidantes

Los antioxidantes se analizaron en los subproductos obtenidos mediante MWD, MAE y PEFAE (tres muestras por subproducto). Se determinaron polifenoles totales, capacidad antioxidante DPPH y capacidad antioxidante FRAP.

Gracias a los 3 métodos analíticos utilizados para la determinación de la capacidad antioxidante de los subproductos obtenidos, se demostró la existencia del grupo de compuestos, necesario para demostrar cómo afectaron los diferentes tratamientos a los compuestos antioxidantes presentes en los residuos.

La determinación mediante el método de Folin Ciocalteu es uno de los principales métodos para la cuantificación de polifenoles totales en productos vegetales vinos y bebidas espirituosas, zumos de frutas, grano de sorgo y otros productos similares (Reyes Ballesteros, 2017; Liang Yu et al., 2015), aunque tiene limitaciones al no discriminar la interacción con otras moléculas como los azúcares (Muñoz-Bernal et al., 2017). En el caso de los residuos estudiados en esta tesis, no se encuentra gran cantidad de azúcares por lo tanto esa interacción no afecta a la determinación.

El método DPPH consiste en un método de captación de radicales libres muy utilizado para determinar la actividad antioxidante de frutas (zumos), verduras, extractos de plantas, café, entre otros porque es un método sencillo y de bajo coste. Este método puede variar el resultado en función de la cantidad de reactivo DPPH que se adicione durante la determinación. Por ello se utiliza la misma cantidad para todas las muestras y se compara con un estándar ya estudiado por otros autores (Guija Poma et al., 2025; Ruiz Benitez, 2020; Brummelhaus de Menezes et al., 2021).

Para corroborar resultado se puede utilizar un método que se ve menos influenciado por el comportamiento del disolvente como es la determinación FRAP, método basado en transferencia electrónica de esfera exterior (Esin Celik et al., 2010). El ensayo de poder antioxidante reductor del ion férrico (FRAP) es un método típico basado en la TE que mide la reducción del complejo del ligando de iones férricos (Fe^{3+}) al complejo ferroso (Fe^{2+}), por parte de los antioxidantes en medios ácidos. Es sencillo, rápido y rentable y no requiere equipo especializado; su uso se ha extendido para evaluar la actividad antioxidante en fluidos biológicos, alimentos y extractos de plantas (Mejía Reyes et al., 2021).

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente se seleccionaron estas técnicas para demostrar el poder antioxidante de los subproductos obtenidos, aunque en estudios posteriores sería interesante poder analizar compuestos en particular que pueden presentar cada uno de los subproductos.

A continuación, se muestra cómo se llevaron a cabo las determinaciones mencionadas:

- Preparación de la muestra para las determinaciones posteriores:
 - Extracción

Se mezclaron en un tubo 1.0 g de subproducto con 9 ml de disolución extractora (HCl (37%): MeOH: H₂O en proporción 1:80:10) y se mantuvieron en agitación constante durante 24 horas a temperatura ambiente. Seguidamente, se centrifugó la muestra a 10.000 rpm. De la muestra centrifugada después de la extracción, se utilizó la parte líquida para realizar cada determinación.

- Preparación reactivos

Para la determinación de polifenoles totales se tuvo que preparar Carbonato de Sodio anhidro (Na_2CO_3) 20 % p/v 100 mL. Para su preparación se pesaron 20 g de Carbonato de Sodio anhidro y se disolvieron en 80 mL de agua destilada hirviendo. La mezcla se dejó enfriar a temperatura ambiente. Después de 24 horas, se filtró sobre papel de filtro y se aforó a 100 mL con agua destilada.

3.2.1. Determinación de Polifenoles totales

El contenido en Polifenoles Totales se determinó siguiendo el método colorimétrico Folin-Ciocalteu descrito por Muñoz Bernal et al. (2017), con algunas modificaciones. Se tomaron 200 μL del extracto en un tubo, y se mezclaron con 1.500 μL de agua destilada. En el caso del blanco se añadieron al tubo 1.700 μL de agua destilada directamente en lugar del extracto. En el mismo tubo, se añadieron 100 μL del reactivo comercial de Folin-Ciocalteu y 200 μL de carbonato de sodio anhidro 20 % p/v. Toda la mezcla se agitó en el vórtex y se dejó reposar en la oscuridad durante 30 minutos. Por último, se midió la absorbancia en el espectrofotómetro calibrándolo primero con el blanco a 765 nm. Los resultados se calcularon mediante la ecuación 4 y se expresaron en mg/kg ácido gálico:

$$\text{Polifenoles totales} = \frac{\text{absorbancia}}{0,0097} \quad (4)$$

3.2.2. Determinación de la capacidad antioxidante DPPH

El método DPPH es un método comúnmente utilizado para determinar la actividad antioxidante que consiste en la captación de radicales libres. Su fundamento se basa en la aceptación de un electrón o átomo de hidrógeno por la molécula 2,2-difenil-1-picrilhidracilo (DPPH), que en solución en metanol es de color violeta intenso. Esta determinación se realizó con el método de Muñoz Bernal (2020).

Se prepararon 100 ml de una disolución de DPPH (2,2-difenil-1-picril hidrazilo) de 20 mg/L en metanol. Para cada muestra, se tomó con pipeta 3,5 mL de la disolución DPPH, se colocó en un tubo de ensayo limpio y seco y se agregó a cada tubo 1,5 mL de extracto y se agitó. Tras la adición se esperaron 30 minutos y se midió en el espectrofotómetro (EPF.Q.01 Helios, Thermo Spectronic, España) a 517 nm. Los resultados se calcularon mediante la ecuación 5 expresados en % radical libre, y la ecuación 6 expresados en μmol trolox inicial /g producto:

$$\text{Capacidad antioxidante} = \left(1 - \frac{A2-A3}{A1}\right) \times 100 \quad (5)$$

Donde: A1= Absorbancia del patrón de referencia
A2= Absorbancia de la muestra
A3= Absorbancia del blanco de muestra

$$\text{DPPH} = \frac{(\text{cap. Antiox.} - O)/m) \times fd}{g \text{ material}} \quad (6)$$

Donde: O= ordenada en el origen
m= pendiente de la recta

fd= factor de dilución aplicado al extracto/muestra

3.2.3. Determinación de la capacidad antioxidante FRAP

El método FRAP se fundamenta en la reducción del hierro férrico (Fe³⁺) presente en el reactivo de FRAP hasta la forma ferrosa (Fe²⁺) por presencia de antioxidantes. se ha seguido el método propuesto por Rioja Antezana et al. (2018).

Para el ensayo se cogió con pipeta un volumen de 3,6 mL de Reactivo FRAP y se llevó a un tubo de ensayo limpio y seco. A continuación, se añadieron 0,36 mL de agua desionizada, y 0,12 mL de extracto, se agitó y se esperó 30 minutos para medir en el espectrofotómetro la absorbancia a 595nm. Los resultados se calcularon mediante la ecuación 7, capacidad antioxidante expresada en la unidad es % poder férrico reductor, y la ecuación 8 expresados en $\mu\text{mol TE/mg}$ producto:

$$\text{Capacidad antioxidante} = \frac{1-(A2-A3)}{A1} \times 100 \quad (7)$$

Donde: A1= Absorbancia del patrón de referencia

A2= Absorbancia de la muestra

A3= Absorbancia del blanco de muestra

$$\text{FRAP} = \frac{(\text{cap. Antiox.} - O)/m \times fd}{g \text{ material}} \quad (8)$$

Donde: O= ordenada en el origen

m= pendiente de la recta

fd= factor de dilución aplicado al extracto/muestra

3.3. Determinación de fibra dietética soluble e insoluble:

La fibra alimentaria se determinó siguiendo el método enzimático-gravimétrico oficial AOAC 991.43 (AOAC 1995) que permite diferenciar la Fibra Dietética Soluble (SDF), la Insoluble (IDF) y la Total (TDF) en alimentos, basado en los métodos de Prosky (1992) y Lee (1993). Se realizaron 3 repeticiones de la determinación por cada tratamiento y subproducto. La figura 11 muestra un esquema de la determinación de fibra dietética.

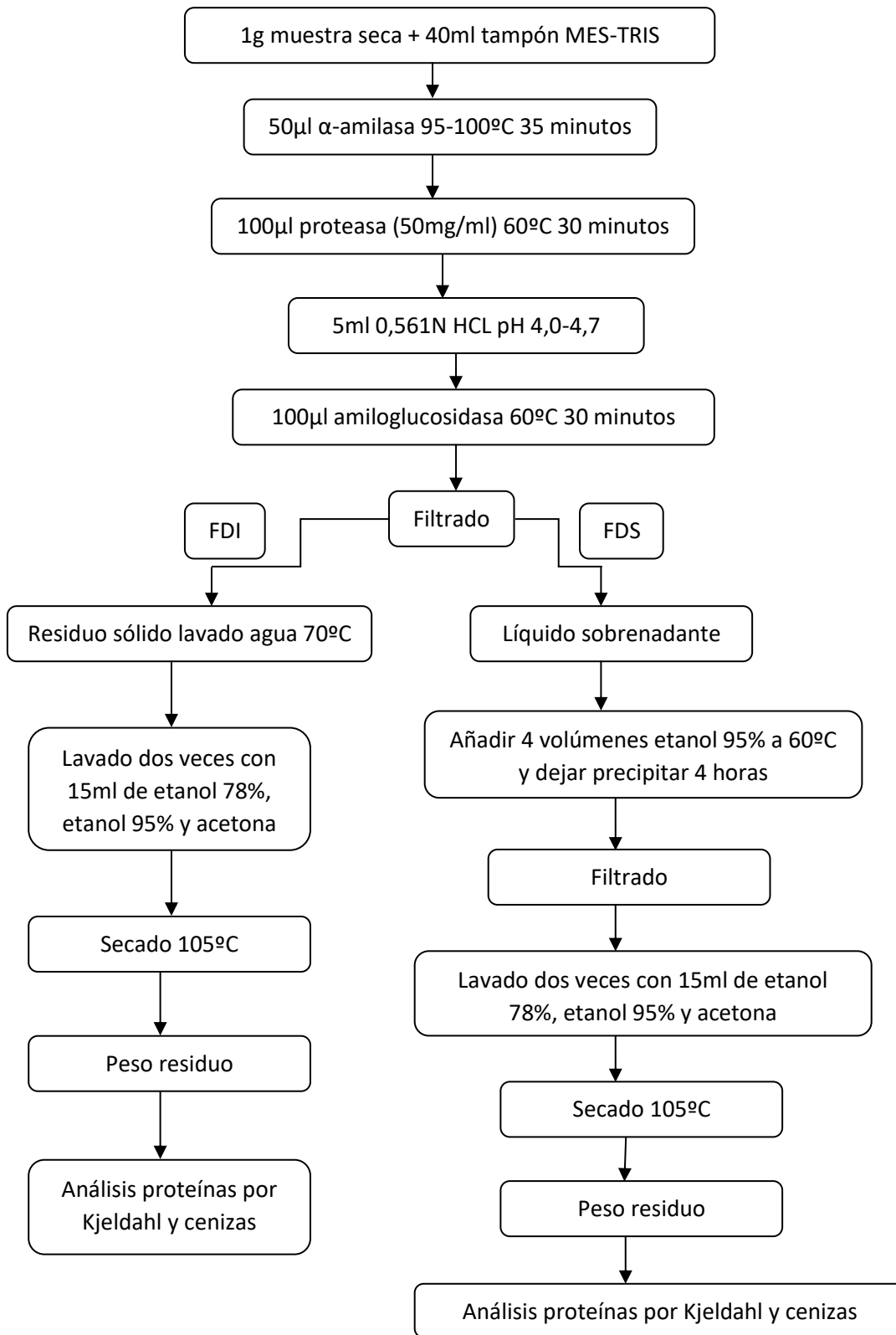


FIGURA 11. Esquema de la determinación de Fibra dietética soluble (SDF), insoluble (IDF) y total (TDF).

En detalle, el procedimiento fue el siguiente:

Se pesó 1g de subproducto. Se agregaron 40ml del tampón MES-TRIS que es 19,52 g de ácido 2(N-morfolino) etanosulfónico (MES) y 12,2 g de tris (hidroximetil) aminometano (TRIS) disueltos en 1.7 L de agua desionizada con pH ajustado a 8,2 con 6,0 N NaOH, y finalmente diluyendo hasta 2 L con agua. Una vez se añadió el tampón se ajustó la solución a pH 8,2 a 24°C y se agitó para evitar la formación de grumos con un agitador magnético. Se añadió a cada muestra y a cada blanco 50µl de solución de α-amilasa termoestable (Megazyme, Sydney, Australia) y se introdujeron, tapados con papel de aluminio, en un baño de agua con agitación a 95-100°C durante 35 minutos y después de dejaron enfriar hasta 60°C. Las paredes del vaso se limpiaron con 10ml de agua para arrastrar la muestra adherida. A continuación, se añadieron 100µl de solución de proteasa (50mg/mL) (Megazyme) a las muestras y blancos. Los vasos cubiertos se incubaron en baño de agua a 60°C, con agitación continua durante 30 minutos. Se añadieron 5ml de 0,561 N HCl y se ajustó a pH 4,0-4,7 con 1N NaOH o 1N HCl. Es importante que la temperatura de la muestra se mantenga a 60°C ya que el pH podría aumentar a temperaturas más bajas. Por último, se añadieron 300 µl de solución de amiloglucosidasa (Megazyme), se cubrieron los vasos y se incubaron en baño de agua a 60°C durante 30 minutos en continua agitación.

- Fibra dietética insoluble, soluble y total

Para la etapa de filtración se utilizaron embudos Büchner de borosilicato y diámetro de 40mm con placa filtrante de porosidad 40-90 ηm. Se pesaron los embudos secos, y a cada uno se le añadió una base de agente filtrante Celite de aproximadamente 1,0 gramo; se humedecieron con 3ml de agua destilada, se redistribuyó y aspiró para formar una capa uniforme de Celite, registrando el peso de cada uno. Con la ayuda de la bomba de vacío se filtraron las muestras a través de los embudos, reservando cada filtrado en un Kitasato debidamente identificado para la determinación de FDS. Cada residuo se lavó dos veces con 10 ml de agua destilada precalentada a 70°C. Los lavados de agua se sumaron a su correspondiente filtrado, y se guardaron para la determinación de FDS.

A) FDI: Los residuos se lavaron dos veces con 15 ml de etanol 78%, etanol 95% y acetona y se secaron los embudos con el residuo en estufa a 105°C durante toda la noche. Los crisoles se enfriaron en un desecador y se pesaron. Las cenizas de los residuos se analizaron y se determinó el contenido de proteína por el método Kjeldahl.

B) FDS: Cada solución con sus lavados de agua se filtró y pesó en su respectivo vaso previamente tarado. Se añadieron 4 volúmenes de etanol 95% precalentado a 60°C y se dejaron precipitar a temperatura ambiente durante 60 minutos. Antes de filtrar se pusieron los embudos con Celite del mismo modo que para FDI, sólo que en este caso se humedeció el lecho de Celite con etanol 78% en lugar de agua destilada; se registró el peso de cada uno, antes y después de agregar Celite. Por último, se filtró cada precipitado a través de un crisol con Celite, trasvasando todo el líquido y precipitado de

manera cuantitativa utilizando una bomba de vacío. Los residuos se lavaron y se procedió de la misma manera que en la Fibra Insoluble. Los resultados se calcularon mediante la ecuación 9:

$$\text{Fibra dietética (\%)} = \frac{(R_1 + \frac{R_2}{2}) - p - A - B}{(m_1 + \frac{m_2}{2})} \times 100 \quad (9)$$

Donde: R₁= peso del residuo 1

R₂= peso del residuo 2

m₁= peso de la muestra 1

m₂= peso de la muestra 2

A = peso de las cenizas

p = peso de las proteínas determinado mediante método Kjeldhal

3.4. Determinación de licopeno

El licopeno se analizó en todos los subproductos obtenidos de los residuos de tomate, realizando el análisis en tres muestras de cada tratamiento, mediante el método utilizado en la Universidad de Lleida basado en Davis et al. (2003).

Para la determinación de licopeno se pesaron 0,6 g de subproducto en un tubo de 50ml, añadiendo 5ml de acetona con BHT al 0,05%, 5ml de etanol al 95% y 10ml de hexano. A continuación, se centrifugó la muestra 200rpm 15 minutos a 4°C, se añadieron 3ml de agua destilada y se leyó la parte sobrenadante a 503nm hexano como blanco. Los cálculos se realizaron con la ecuación 10:

$$\text{Licopeno } \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right) = \frac{A_{503} \times PM \times fd \times 1000}{E \times L} \quad (10)$$

Donde: A₅₀₃ = Absorbancia a 503nm

PM = peso molecular licopeno

fd = factor de dilución

E = coeficiente de extinción

L = longitud cubeta

3.5. Determinación de betaglucanos

Esta determinación se realizó en todos los subproductos de champiñón obtenidos mediante microondas y PEF. La determinación se realizó por triplicado.

La cuantificación de β -glucano se realizó mediante el kit enzimático K-YBGL 09/2014" (Megazyme, Ireland). De esta manera se obtuvieron los contenidos en α -glucanos, beta glucanos y glucanos totales.

- Determinación de glucanos totales (α -glucanos+ β -glucanos)

Para la solubilización e hidrólisis parcial de los glucanos totales se añadió la muestra de subproducto de champiñón (100mg) a un tubo Pyrex de 20 x 125 mm. Se adicionaron 1,5 ml de HCl concentrado (37% v/v) a cada tubo y se taparon y agitaron vigorosamente en un vórtex. Los tubos se colocaron en un baño de agua a 30°C durante 45 minutos y se agitaron en el vórtex cada 15 min para asegurar la completa disolución del β -glucano. Se añadieron 10 ml de agua a cada tubo, se cerraron y agitaron en un vórtex. Después de 5 minutos a 100°C se apretaron los tapones y se continuaron incubando durante 2 horas. Los tubos se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se añadieron 10ml de KOH 2N para enrasarlos posteriormente a 100ml utilizando tampón acetato de sodio 200mM (pH 5,0) y ajustar el volumen. Una alícuota de la mezcla se centrifugó a 1500g durante 10min. Para la determinación de glucanos totales, alícuotas de 0,1ml (por duplicado) de extractos centrifugados se transfirieron al fondo de tubos de vidrio Pyrex (16 x 100 mm). Al fondo de cada tubo se añadió una mezcla, 0,1 ml, de exo-1,3-glucanasa (20 U/ml) más β -glucosidasa (4 U/ml) en tampón acetato de sodio 200 mM (pH 5,0), se mezclaron en un vórtex e incuban a 40°C durante 60 min. Proporcionado por el kit, se añadieron 3,0ml de mezcla de glucosa oxidasa/peroxidasa a cada tubo e incubaron a 40°C durante 20min. La absorbancia de todas las diluciones se midió a 510 nm frente a un blanco de reactivo.

- Determinación de α -glucanos

La muestra de subproducto de champiñón (100 mg) se añadió a tubos Pyrex de 20 x 125 mm. Se introdujo una barrita magnética agitadora (5 x 15 mm) y 2 ml de KOH 2 M a cada tubo y se resuspendió en un baño de hielo/agua sobre un agitador magnético durante 20 min. Se añadieron 8 ml de tampón acetato de sodio 1,2 M (pH 3,8) a cada tubo con agitación e inmediatamente, se adicionaron 0,2 ml de amiloglucosidasa (1630 U/ml) más invertasa (500 U/ml) proporcionada por el kit, se mezclaron bien y se colocaron los tubos en un baño a 40 °C durante 30 minutos mezclando intermitentemente con un vórtex. Los contenidos de cada tubo se transfirieron a un frasco volumétrico de 100 ml y se ajusta el volumen con agua. Se mezcló bien y una alícuota de la solución se centrifugó a 1500 g durante 10 min. Alícuotas de 0,1 ml (por duplicado) de los sobrenadantes se transfirieron a tubos de vidrio, se añadieron 0,1 ml de tampón acetato de sodio (200 mM, pH 5,0) más 3,0 ml de reactivo GOPOD (Glucosa oxidasa más peroxidasa y 4-aminoantipirina en tampón (48 ml, pH 7,4) de ácido p- hidroxibenzoico y ácido sódico (0,4% p/v) e incubaron a 40 °C durante 20 min. La absorbancia de las soluciones se midió a 510 nm frente a un blanco de reactivo. El blanco de reactivo consiste en 0,2ml de tampón acetato de sodio (200mM, pH 5,0) y 3,0ml de reactivo glucosa

oxidasa/peroxidasa. El patrón de D-glucosa consta de 0,1ml de patrón D-glucosa (1mg/ml), 0,1ml de tampón acetato de sodio (200mM, pH 5,0) y 3,0 ml de reactivo glucosa oxidasa/peroxidasa. Los cálculos se realizaron con la plantilla que proporciona el kit de Megazyme. Los resultados se calcularon mediante las ecuaciones 11, 12 y 13:

$$\text{Glucanos totales (\%)} = \Delta E \times \frac{F}{W} \times 90 \quad (11)$$

$$\alpha - \text{Glucanos (\%)} = \Delta E \times \frac{F}{W} \times 9,27 \quad (12)$$

$$\beta - \text{Glucanos (\%)} = \text{Glucanos totales} - \alpha - \text{Glucanos} \quad (13)$$

Donde: ΔE = absorbancia reactivo – absorbancia blanco

F = factor para convertir la absorbancia en microgramos de D-glucosa

W = peso de la muestra analizada

3.6. Determinación de proteína bruta

La proteína bruta se determinó en los subproductos sólidos de champiñón, además de en los desarrollos alimenticios. Para cada tratamiento se analizaron tres muestras.

El contenido de proteína se obtuvo mediante el método Kjeldhal, siguiendo la técnica general de la AOAC (2000), donde se determina el contenido de nitrógeno, para ser transformado a través de un factor en proteína. El factor que la norma toma para esta determinación es de 6,25. Se pesó 1 g de subproducto en un tubo de digestión de 250ml y se añadieron cuatro pastillas de catalizador a cada tubo, unos gramos de piedra pómez y 25 mL de Ácido sulfúrico 96% PA, y peróxido de hidrógeno 30%. Se introdujeron los tubos en el bloque digestor previamente calentado, 2020 Digestion Unit, Tecator, (Suecia), se encendió la campana extractora, se colocó la trompa encima de los tubos y se abrió el agua de refrigeración. Se mantuvieron una hora y media a 400°C y se dejaron enfriar. Una vez frío, se añadieron 25 mL de agua desionizada y 4 gotas de indicador fenolftaleína 1%. Para la valoración, en un Erlenmeyer de 250 mL se añadieron 25 mL de ácido bórico 4% y 6-8 gotas de indicador mixto, y luego en el destilador de nitrógeno se agregaron 50ml de hidróxido sódico, y el destilado se recogió sobre un vaso de plástico que se valoró hasta la coloración original, violeta, con Ácido Clorhídrico 0,1 mol/L. Los resultados se calcularon mediante la ecuación 14:

$$\text{Proteína bruta (\%)(base húmeda)} = 0,875 \times \frac{(V_1 - V_0)}{(M - M_0)} \quad (14)$$

Donde: V_1 = volumen en ml de ácido clorhídrico gastado en la valoración

V_2 = volumen en ml de ácido clorhídrico gastado en el ensayo en blanco

M = peso en gramos de la muestra pesada

M_0 = peso, en gramos de la muestra adherida al vidrio de reloj

3.7. Determinación de la Actividad de agua (a_w)

La actividad de agua se midió por triplicado en cada uno de los subproductos obtenidos mediante MWD.

Para cada residuo deshidratado se determinó la actividad de agua (a_w) del control y de los subproductos con el equipo que se muestra en la figura 12 (4TE, Aqualab, España). La a_w tiene que encontrarse por debajo de 0,89 como exige la legislación, para que no haya proliferación de *Listeria monocytogenes* (Elika, 2013).



Figura 12. Equipo medida actividad de agua (a_w).

3.8. Color

Se determinó el color tanto en los subproductos obtenidos por MWD como en los alimentos obtenidos conteniendo los subproductos a lo largo de su vida útil.

Para la determinación de color se utilizó un Colorímetro (ChromaMetr CR400/410, Konika Minolta, España) (figura 13), realizando 5 medidas en cada uno. Previamente a la toma del color de las muestras, se calibró el equipo con una placa blanca. Una vez calibrado el colorímetro, se midió el color de las muestras utilizando un el tubo de proyección con cristal en las muestras líquidos y un tubo de proyección sin cristal en las muestras sólidas.

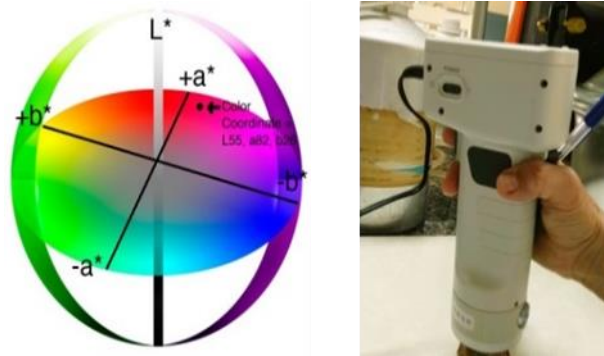


Figura 13. A la izquierda, ejes espaciales para los parámetros "L" "a" "b". A la derecha, medición con el colorímetro Minolta CR400/410.

Los tres parámetros en el modelo representan la luminosidad de color (L^* , $L^*=0$ rendimientos negro y $L^*=100$ indica el blanco), su posición entre magenta y verde ($+a^*$ = magenta, $-a^*$ = verde) y su posición entre amarillo y azul ($+b^*$ = amarillo, $-b^*$ = azul) (Díaz Andrea et al., 2019). Con esos tres datos se calculó la diferencia de color (ΔE), croma (C) y tono (h) (ecuaciones 15, 16 y 17).

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (15)$$

$$C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad (16)$$

$$h = \arctan (b^*/a^*) \quad (17)$$

3.9. Textura

Para la determinación de la textura de los alimentos obtenidos se utilizó un texturómetro (TA.XT plus Texture Analyser, Stable micro System products, Goaldming, England) (figura 14). Se realizaron 10 repeticiones de cada producto (Chen Lan et al., 2013) en condiciones específicas para cada uno de ellos. Los parámetros específicos que mides en cada producto están descritos en los siguientes apartados.

3.9.1. Salsa de tomate y ketchup

En la salsa de tomate y ketchup, se determinó la viscosidad, expresada en g, mediante extrusión con una sonda de 25mm en un vaso de 50mm de diámetro y 75mm de altura (figura 14). El vaso se llenó por la mitad y los parámetros utilizados fueron: distancia de compresión de 30 mm y velocidad de ensayo de 1mm/segundo.



Figura 14. Análisis de textura de la salsa de tomate y del ketchup.

3.9.2. Hamburguesa vegana y Bizcocho

La textura de las hamburguesas y los bizcochos consistió en un Análisis de Perfiles de Textura (TPA) en compresión expresada en g. Se tomaron muestras de lugares aleatorios de cada hamburguesa, y del bizcocho partido por la mitad, y se sometieron a una prueba de compresión de dos ciclos. Las muestras se comprimieron hasta el 60% de su altura original con una sonda cilíndrica de 6 cm de diámetro y una velocidad de la cruceta de 2 mm/s, obteniéndose el valor de la dureza en gramos (g).



Figura 15. Análisis de textura de la hamburguesa vegana y del bizcocho.

3.9.3. Pasta fresca

La textura de los espaguetis se midió mediante el método de elongación con el que se mide la resistencia a romperse, en gramos, en el que se estira un espagueti hasta que se fractura. Los parámetros de este ensayo fueron: velocidad de ensayo de 3mm/s y distancia de 40mm.

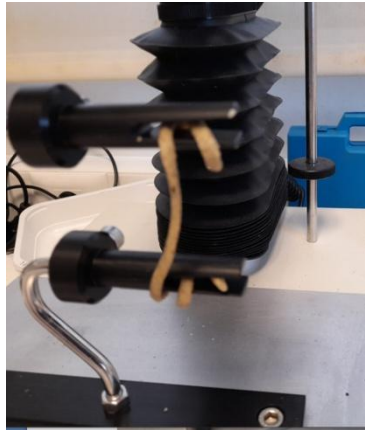


Figura 16. Análisis de textura de la pasta fresca.

4. Análisis sensorial de los nuevos productos

La sala de catas de Ctic Cita se adecuó siguiendo la Guía general para el diseño de una sala de cata según la norma ISO 8589:2010/Amd 1:2014 para Análisis sensorial. En la sala de catas se encuentra un espacio independiente para cada catador, y con una luz lo más parecida a la luz solar, uniforme, regulable y con luz difusa para apreciar el color de los alimentos.

Para llevar a cabo el análisis sensorial de alimentos se ha seguido la Norma UNE-ISO 6658, guía general sobre el uso del análisis sensorial. En primer lugar, se estableció el objetivo del estudio que fue determinar el grado de aceptabilidad de los productos.

Según la norma seguida para la organización y realización del análisis sensorial, el análisis sensorial de los alimentos se realizó con un panel de cata constituido por 10 catadores expertos entrenados según la norma ISO 5496. Estos evaluaron las muestras "a ciegas" en cabinas sensoriales normalizadas, con el objetivo de conocer los parámetros críticos organolépticos de cada producto estudiado. Además, a cada muestra se le asignó un código aleatorio.



Figura 17. Foto de una cata de los desarrollos alimenticios

En el anexo 1, pueden consultarse los cuestionarios utilizados para los diferentes productos y en las figuras 18 y 19, se muestran los utilizados para el caso particular del producto tipo bizcocho, a modo de ejemplo.

A continuación, se detallan los estudios del perfil sensorial y test hedónico, que dan la información para el estudio organoléptico de las muestras.

4.1. Perfil sensorial

Los perfiles sensoriales son procedimientos utilizados para evaluar, de forma reproducible, los atributos de una muestra y cuantificar su intensidad con escalas. La escala va desde ausencia de percepción a máxima percepción percibida. Los resultados de las escalas se transformaron en numéricos para poder cuantificarlos.

Para el análisis del perfil sensorial de los productos alimenticios que se han desarrollado en esta tesis se tuvieron en cuenta diferentes parámetros que influyen en la aceptabilidad de los productos, que se puntuaron del 1 al 10, excepto el número de masticaciones que cada catador apuntaba el valor final. Todo esto se llevó a cabo en base a la Guía general para establecer un perfil sensorial (ISO 13299:2016).

MUESTRA BIZCOCHO	
INTENSIDAD DE COLOR	◆-----◆ CLARO OSURO
INTENSIDAD DE OLOR	◆-----◆ NADA MUCHO
INTENSIDAD DE FLAVOR	◆-----◆ NADA MUCHO
FLAVORES ANÓMALOS	_____ INTENSIDAD _____
SABORES ANÓMALOS	_____ INTENSIDAD _____
DUREZA	◆-----◆ NADA DURO MUY DURO
MASTICABILIDAD	◆-----◆ NADA MASTICABLE MUY MASTICABLE
NÚMERO DE MASTICACIONES	_____
JUGOSIDAD	◆-----◆ NADA JUGOSO MUY JUGOSO
GOMOSIDAD	◆-----◆ NADA GOMOSO MUY GOMOSO
ESPONJOSIDAD	◆-----◆ NADA ESPONJOSO MUY ESPONJOSO

Figura 18. Ejemplo de hoja de perfil sensorial.

4.2. Método sensorial hedónico

Según la norma UNE-ISO 6658, el test hedónico permite la valoración del grado de satisfacción general que le produce un producto utilizando una escala que le proporciona el analista.

Las muestras se cataron en un orden secuencial monádico (una a una) en diferente orden para cada catador, siguiendo un diseño de bloques completo, para minimizar el efecto muestra. Los catadores puntuaron del 1 al 9 el agrado o desagrado que les producía el aspecto por el que se les preguntaba de cada alimento.

CÓDIGO DE MUESTRA: _____

P1. ¿Cuánto te gusta el ASPECTO del producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P2. ¿Cuánto te gusta el COLOR de este producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P3. ¿Cuánto te gusta el OLOR de este producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P4. ¿Cuánto te gusta el SABOR de este producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P5. ¿Cuánto te gusta la TEXTURA de este producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P6. ¿Cuánto te gusta GLOBALMENTE?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

Figura 19. Ejemplo de hoja de método sensorial hedónico.

5. Análisis estadístico de resultados

Se realizaron dos repeticiones de cada tratamiento. La caracterización de los subproductos se realizó en un mínimo de tres determinaciones analíticas.

De cada grupo de datos, se eliminaron los valores aberrantes mediante el procedimiento de Identificación de Valores Atípicos (outlier), para poder separar una observación que no proviene de la misma distribución que el resto de la muestra.

Una vez se eliminaron los datos aberrantes, todos los datos obtenidos tras las determinaciones analíticas se trataron estadísticamente mediante un ANOVA con el programa Statgraphics centurion 19 (Statgraphics Technologies, Inc., The Plains, Virginia, Estados Unidos). Se realizó una prueba Múltiple de Rangos mediante el procedimiento ANOVA simple con el que se obtuvieron las diferencias significativas. Además, se realizó el test de Tukey para conocer el sentido de esas diferencias cuando las hubo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se muestran y se discuten los resultados de los tratamientos MWD, MWAE, PEFAE y USAE, mediante la caracterización de los productos obtenidos y las propiedades de los alimentos formados con los mismos. La sección se divide en dos apartados, uno donde se exponen y discuten los resultados de la obtención y caracterización de los 6 subproductos, y otro, dedicado a los 4 alimentos desarrollados con los subproductos incorporados.

1. Obtención y caracterización de los subproductos

1.1. Subproductos obtenidos de residuos de cardo

Los residuos de cardo descritos en el apartado 1 de Materiales y Métodos, se dividieron en 4 lotes. Uno fue expuesto a MW para su deshidratación (MWD) y otro, a la MWAE. Otra parte de los residuos fue sometida a PEFAE y una última porción a la combinación de PEFAE y MWD.

1.1.1. Efectos de los tratamientos con microondas (MW)

1.1.1.1. Deshidratación (MWD)

Dependiendo de la potencia utilizada en la MWD de los residuos de cardo, se alcanzó diferente temperatura durante el tratamiento, aumentando esta con la potencia utilizada. Como se observa en la figura 20, en todos los casos se alcanzó una temperatura aproximada de 120°C, salvo en el tratamiento con la mayor potencia (4000W), con el que se alcanzó una temperatura de 130°C. Utilizando 1000W de potencia se necesitaron 15 minutos para alcanzar una temperatura de 115°C, mientras que al utilizar potencias de 2000W, 3000W y 4000W se pudo reducir el tiempo de duración del tratamiento hasta los 7, 5 y 4 minutos respectivamente. El tiempo se redujo la mitad al aumentar la potencia de 1000W a 2000W, un 66,6% al aumentar a 3000W y un 73,3% cuando se utilizó la máxima potencia. Por lo tanto, cuanto más alta fue la potencia, más rápidamente se calentó el producto y menor fue el tiempo de tratamiento necesario para deshidratarlo. Ello concuerda con lo expuesto por Maupoey et al., 2001 para el secado de alimentos por aire caliente.

Además, la subida de temperatura fue más gradual cuando se utilizaron potencias bajas/medias que cuando se utilizaron las potencias altas, porque con las potencias más altas el aporte de energía fue mayor.

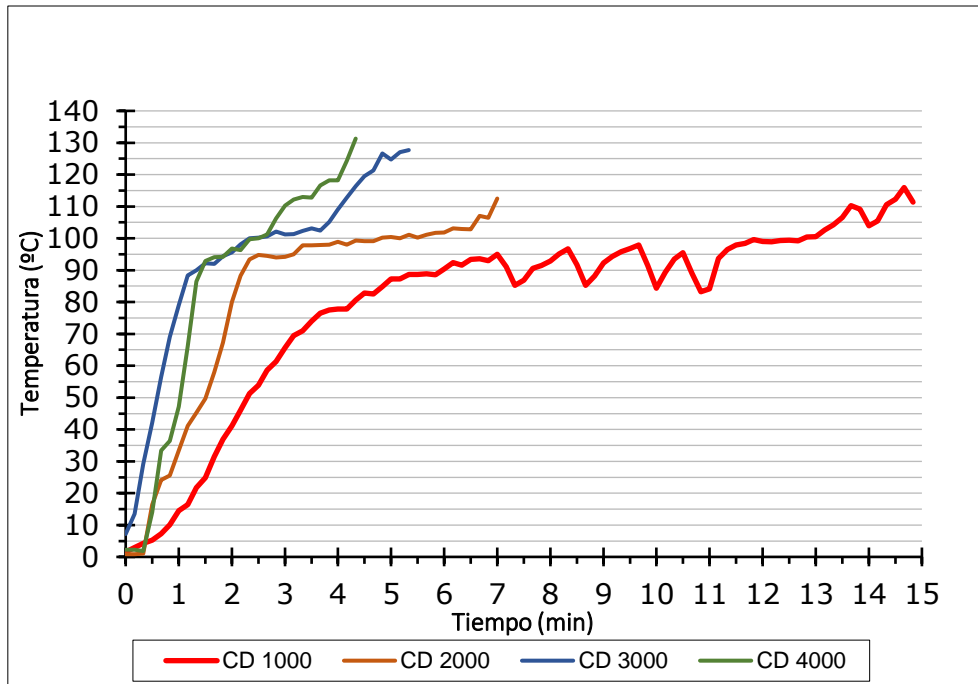


Figura 20. Perfil de temperatura durante los tratamientos de deshidratado mediante microondas (MWD) de residuos de cardo. Leyenda: Cardo deshidratado (CD) - potencia emitida en W.

La tabla 6 muestra las condiciones de tratamiento y los resultados de la densidad energética de los tratamientos de MWD para conseguir una humedad por debajo del 5%, y así evitar la proliferación microbiana y conseguir la estabilización del subproducto (Gascón et al., 2013).

Tabla 6. Condiciones de tratamiento y densidad energética aplicada en los diferentes tratamientos con microondas para deshidratar (MWD) los residuos de cardo.

Tratamiento	Peso (kg)	Tiempo (h)	Potencia emitida	Potencia reflejada	Potencia absorbida	D.E. (W h/kg)
CD 1000-30	0,179	0,50	1000	629,76	370,24	1028,87
CD 2000-30	0,175	0,50	2000	1239,06	760,94	2162,38
CD 3000-15	0,176	0,17	3000	1432,59	1567,41	1483,28
CD 4000-6	0,177	0,10	4000	2004,59	1995,41	1126,91

[Cardo deshidratado (CD) - potencia emitida en W – tiempo en minutos]. D.E.: densidad energética.

Como se muestra en la tabla 6, la densidad energética más elevada fue 2.162W h/kg y se obtuvo en el tratamiento con 2000W de potencia. Ello fue debido a que este parámetro está directamente relacionado con la potencia y el tiempo aplicados. En este tratamiento, el tiempo fue más largo que en los de mayor potencia. En cambio, si se compara con el tratamiento en el que se usó una potencia de 1000W durante el mismo tiempo, la densidad energética, 1.028,87W h/kg, fue menor. El consumo energético de

secado depende de la eficacia de la transferencia de calor, del caudal de aire en circulación o las pérdidas de calor. Al igual que en esta tesis doctoral, Cuvertino Calderón (2004) observó que, a medida que la humedad del aire disminuyó, el gasto energético del proceso se redujo. Además, cuanto más alta fue la temperatura de aire empleado, mayor fue la cantidad de energía necesaria para calentarlo. A su vez, una temperatura de trabajo más alta aceleró el proceso, reduciendo considerablemente el tiempo de secado. Por tanto, al aumentar la temperatura de secado se redujo el gasto energético empleado para el calentamiento, agilizando el secado y pudiendo aumentar su productividad, tal y como estudió Galán Lacarra en 2011.

Por lo cual, el tratamiento que mostró un resultado más eficiente en cuanto a densidad energética fue el de 4000W con una densidad energética de 1126,91W h/kg.

Humedad

En la figura 21 se observa la evolución de la humedad de los subproductos a lo largo del tiempo de tratamiento. En los tratamientos a 1000W y 2000W de potencia durante 30 minutos se tomaron las muestras a 5, 15 y 30 minutos, en el de 3000W 15 minutos se tomaron a los 5 y 15 minutos y en el de 4000W 6 minutos se tomaron a los 5 y 6 minutos.

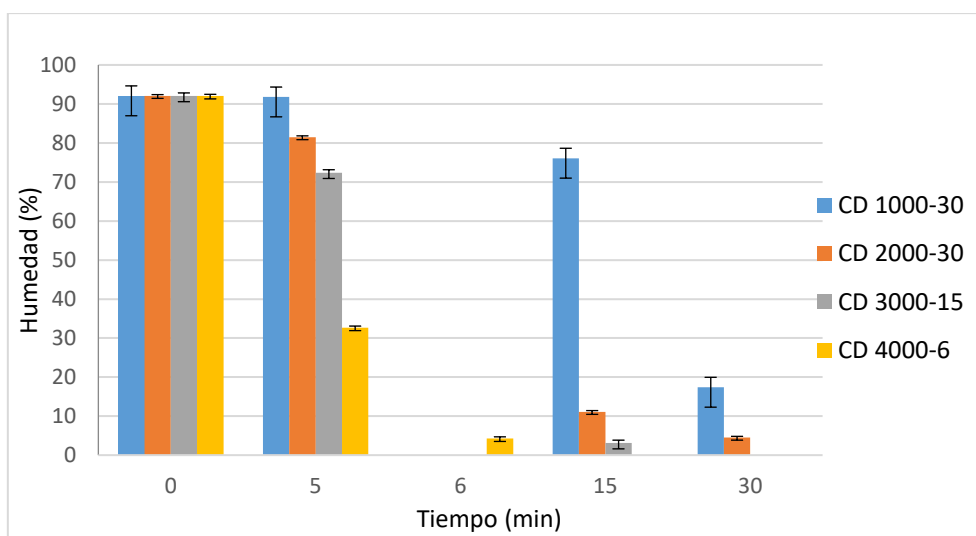


Figura 21. Evolución de la humedad durante los tratamientos de deshidratado mediante microondas (MWD) de residuos de cardo. Leyenda: Cardo deshidratado (CD) - potencia emitida en W – tiempo en minutos.

La humedad inicial en los residuos de cardo fue de 92,8%. En todos los tratamientos de MWD se consiguió reducir la humedad hasta un 4% o 3%, pero algunos necesitaron tiempos muy largos de exposición a las MW, como se muestra en la figura 21. Esto es debido a que a medida que se aumentó la potencia, el tiempo de tratamiento disminuyó, como afirmó Prieto y Jimenez (2020).

En la industria alimentaria se pretende que los tiempos de procesado sean cortos y que se conserven todas las características del producto. Por ese motivo, y teniendo en cuenta estos aspectos, los mejores tratamientos con respecto al tiempo de procesado, fueron en los que se utilizó una potencia de 3000W durante 15 minutos y 4000W durante 6 minutos. En los tratamientos con 1000W y 2000W fue necesario un tiempo demasiado largo para poder aplicarse industrialmente. Además, con una potencia de 1000W, a pesar del tiempo largo de tratamiento, la humedad no bajó del 10%, lo que permite el crecimiento microbiano que afecta a la estabilidad de los productos deshidratados durante el almacenamiento (Gascón et al., 2013).

Color

Como se observa en la figura 22, todos los tratamientos de MWD fueron eficaces para conseguir secar el residuo de cardo sin llegar a carbonizarlo. Cabe señalar que con una potencia de 1000W, el subproducto presentó un aspecto algo carbonizado, cosa que no ocurrió utilizando las potencias más altas, que mostraron un aspecto aceptable al ser más corto el tiempo de tratamiento. Ello se hizo patente con los resultados de medida instrumental de color recogidos en la tabla 7.

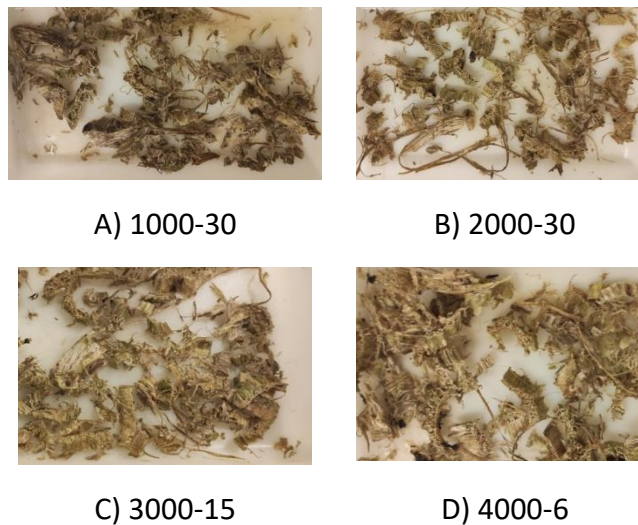


Figura 22. Aspecto de los subproductos de cardo después de los tratamientos con MWD.
Leyenda: Potencia emitida en W - tiempo en minutos.

Tabla 7. Parámetros de color de los subproductos de cardo deshidratados.

Subproducto	L*	a*	b*	C	h	ΔE
CT inicial	53,71 ± 1,16 ^a	4,27 ± 0,32 ^d	13,27 ± 0,55 ^a	96,18 ± 2,07 ^a	1,26 ± 0,01 ^a	-
CD 1000-30	55,74 ± 1,26 ^b	4,04 ± 0,62 ^{c^d}	16,72 ± 0,80 ^b	148,31 ± 13,91 ^{bc}	1,33 ± 0,04 ^b	9,98 ± 0,02 ^a
CD 2000-30	55,98 ± 1,81 ^b	3,56 ± 0,21 ^{ab}	16,55 ± 0,90 ^b	143,74 ± 14,71 ^b	1,36 ± 0,02 ^c	9,42 ± 0,01 ^a
CD 3000-15	57,03 ± 1,33 ^b	3,43 ± 0,35 ^a	17,46 ± 0,75 ^c	158,64 ± 13,08 ^c	1,38 ± 0,02 ^c	16,87 ± 0,00 ^b
CD 4000-6	57,12 ± 2,05 ^b	3,88 ± 0,32 ^{bc}	18,28 ± 0,62 ^d	174,81 ± 11,13 ^d	1,36 ± 0,02 ^c	19,27 ± 0,01 ^b

Valor medio ± desviación estándar. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.05$). CT: control. [Cardo deshidratado (CD) - potencia emitida en W - tiempo en minutos]. L*: luminosidad (L=0 rendimientos negro y L=100 indica blanca). a*: posición entre magenta y verde (+a= magenta, frente a -a= verde). b*: posición entre amarillo y azul (+b = amarillo frente a -b= azules). ΔE: diferencia de color. C: croma. h: tono.

En la tabla 7, en lo relativo a luminosidad (L*), se observaron diferencias significativas entre el subproducto control (CT inicial) y el resultante de los distintos tratamientos, siendo más luminosos los subproductos obtenidos mediante MWD porque se mantuvo el color del subproducto sin tender a negro. Para el valor de a* se observó que el color tendió más a verde a medida que aumentó la intensidad de tratamiento, aunque no se encontraron diferencias con el control y el tratamiento de 1000W. Sin embargo, se vio una disminución del valor de 0,5 – 0,6 en los tratamientos de 2000W y 3000W, mientras que en el tratamiento de mayor potencia la disminución fue menor, de 0,16. El valor b* mostró diferencias entre el control y todos los tratamientos, y esas diferencias aumentaron su valor de 0,74 a 1,56 a medida que aumentó la potencia de tratamiento a potencias de 3000W y 4000W respectivamente mostrando estos últimos diferencias significativas entre ellos y el resto de subproductos, aunque todos tendieron más al amarillo que al azul.

Como se muestra en la tabla 7, el croma (C) del subproducto de cardo aumentó a medida que aumentó la intensidad de la potencia de tratamiento y se redujo el tiempo de tratamiento, siendo menor cuando no se aplicó ningún tratamiento, mostrándose diferencias significativas entre el control y los tratamientos, y los subproductos obtenidos con las potencias altas y el resto de los subproductos. Sin embargo, el tono (h) fue similar en todos los tratamientos mostrando diferencias significativas con el control y con el tratamiento de 1000W. La diferencia de color (ΔE), aumentó a medida que aumentó la intensidad de tratamiento, siendo similar entre los dos tratamientos de menor potencia por un lado y entre los de mayor potencia por otro.

Los valores de los parámetros L*, a* y b*, indicaron que los subproductos obtenidos mediante MWD se oscurecieron, sin embargo, fueron más brillantes que el control (CT inicial) sin tratamiento.

Según el C, h y ΔE, el color de los subproductos se vio afectado cuando se aumentó la potencia de tratamiento, aumentando esa diferencia con las potencias más elevadas, 3000W y 4000W.

En esta tesis doctoral, se ha demostrado que L* no mostró diferencias significativas con la disminución del tiempo de tratamiento, que a* disminuyó con el aumento de la

temperatura aumentando su intensidad de color verde, sin embargo, b^* se incrementó con el tiempo y la temperatura de tratamiento aumentando la intensidad del color amarillo, tal como reportaron Ortega Quintana y Montes Montes (2015). Estos parámetros indicaron que la temperatura y el tiempo de tratamiento afectaron al color de los subproductos, con un aumento de su intensidad en color verde y amarillo a medida que aumentó la potencia de tratamiento.

Como consecuencia de los resultados obtenidos, para la deshidratación de los residuos de cardo, se seleccionaron las condiciones de tratamiento, teniendo en cuenta como criterios la humedad y el aspecto del subproducto deshidratado, así como la densidad energética aplicada para obtenerlos. Estas condiciones de tratamiento fueron: 15 minutos con una potencia de 3000W y 6 minutos al utilizar la potencia de 4000W. En los productos obtenidos cuando se aplicaron MW se determinó su capacidad antioxidante y fibra.

Actividad de agua

La tabla 8 muestra los resultados de actividad del agua (a_w) en los diferentes subproductos de cardo deshidratado.

Tabla 8. Actividad de agua en los subproductos de cardo deshidratados.

Subproducto	a_w
CT inicial	0,9602 ± 0,01
CD 1000-30	0,4485 ± 0,01
CD 2000-30	0,449 ± 0,00
CD 3000-15	0,4519 ± 0,01
CD 4000-6	0,4406 ± 0,02

Valor medio ± desviación estándar. Los datos del control inicial (CT inicial) y de los tratamientos microondas se presentan en actividad de agua (a_w) que no tiene unidades. [Cardo deshidratado (CD) – potencia emitida en W - tiempo en minutos].

El cardo tiene un pH de alrededor de 8 (MAPA, 2016), con lo cual puede haber crecimiento de microorganismos como *S. aureus*, *Salmonella*, *Clostridium perfringens*, *Listeria monocytogenes* y *Bacillus cereus* tal y como marca el Real Decreto 135/2010 B.O.E. 25/02/2010, por lo que hay que disminuir la humedad por debajo del 7% y la a_w hasta valores de 0,6.

La a_w en todos los subproductos de cardo obtenidos mediante MWD se encontró en valores aproximados de 0,45 como se observa en la tabla 8. Estos valores son muy adecuados para evitar el crecimiento microbiano, por ejemplo, el valor limitante de a_w es 0,8 para que no haya crecimiento de *Listeria monocytogenes* (Elika, 2013).

Además, los valores de a_w al aplicar el tratamiento MWD disminuyeron con respecto al control con el aumento de la potencia de tratamiento porque permitió la evaporación

del agua a mayor velocidad. Con el tratamiento que mayor a_w se conservó fue con el de 3000W.

Capacidad antioxidante

En todos los subproductos de cardo, para poder comparar los resultados obtenidos con respecto a la temperatura y el tiempo de tratamiento se analizó la capacidad antioxidante a través de tres determinaciones distintas, ya que cada una de ellas ofrece una información diferente. La determinación de polifenoles totales indica el contenido de polifenoles presentes en el subproducto, mientras que la capacidad antioxidante DPPH muestra la capacidad antioxidante frente a radicales libres, y la capacidad antioxidante FRAP muestra el poder antioxidante en la transferencia de electrones.

Tabla 9. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los subproductos de cardo deshidratados.

Subproducto	Polifenoles totales (mg/kg ácido gálico)	DPPH (μmol trolox inicial /g producto)	FRAP (μmol TE/mg producto)
CT inicial	3829,71 \pm 22,52 ^c	13,80 \pm 0,25 ^c	1039,33 \pm 19,61 ^b
CD 1000-30	404,67 \pm 5,54 ^{ab}	1,11 \pm 0,01 ^b	125,02 \pm 3,19 ^a
CD 2000-30	344,40 \pm 18,48 ^a	0,96 \pm 0,02 ^{ab}	76,18 \pm 18,32 ^a
CD 3000-15	453,86 \pm 28,08 ^b	0,89 \pm 0,01 ^a	113,35 \pm 21,50 ^a
CD 4000-6	485,44 \pm 14,31 ^b	0,88 \pm 0,03 ^a	86,66 \pm 11,26 ^a

Valor medio \pm desviación estándar. Datos expresados en materia seca. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.05$). CT: control. [Cardo deshidratado (CD) - potencia emitida en W - tiempo en minutos].

Como se observa en la tabla 9, cualquiera de los tratamientos de MWD de los residuos de cardo produjo una reducción muy significativa de la capacidad antioxidante del subproducto con respecto al control sin tratar, indicativo de que el aumento de temperatura destruyó los compuestos antioxidantes que son termolábiles. Al igual que lo observado en esta tesis doctoral, Esparza-Martínez et al. (2016), en un estudio sobre zumo de mandarina, encontraron que el tiempo prolongado de exposición a alta temperatura afectó más a los antioxidantes que el aumento de la temperatura, disminuyendo el contenido de antioxidantes con la subida de temperatura del ambiente como ocurrió al deshidratar los residuos para obtener subproductos.

Sin embargo, cuando se compara la concentración de polifenoles totales entre tratamientos, se encontraron diferencias significativas entre el tratamiento de 2000W y los de 3000W y 4000W, siendo mayor el contenido de polifenoles en el tratamiento en el que se utilizó 4000W de potencia. Con esto, la concentración de polifenoles totales de los subproductos de cardo fue un 14% superior al resultante del tratamiento de 2000W de potencia, que fue en el que menor concentración se observó. Al aplicar

4000W de potencia se consiguió mayor concentración de polifenoles que con el resto de los tratamientos porque el tiempo utilizado fue menor, sólo 6 minutos para alcanzar una temperatura muy similar, lo que permitió que los compuestos no se destruyeran y que se evaporara el agua (molécula formada por enlaces covalentes a un átomo de oxígeno que se destruyen al incrementar la temperatura) con rapidez al igual que en los mostrado por Esparza-Martínez et al. (2016). Todo esto ocurrió porque los compuestos fenólicos están formados por uno o varios anillos fenólicos (Quiñones et al., 2012) los cuales cuando se alcanza la temperatura de 60°C se destruyen por el largo tiempo de tratamiento, pero a partir de 130°C se reduce significativamente su concentración, aunque el tiempo de tratamiento fuera corto, igual que se vio en el estudio de Acevedo Alzate et al. (2017).

La mayor concentración retenida de polifenoles totales en los subproductos deshidratados de cardo con potencias más altas y tiempos más cortos de tratamiento se ha observado también en otros productos, tal y como se ha demostrado en los estudios de Barrientos y Rosemary (2018). Estos autores, demostraron en estudios llevados a cabo en nísperos, que los polifenoles pueden resistir temperaturas altas durante tiempos cortos de tratamiento más que tiempos largos y temperaturas medias-alta. Tiempos largos de tratamiento provocan la disminución de la concentración de estos compuestos, efecto que se debe a una exposición mayor al oxígeno y la luz, como lo que observaron Prieto y Jiménez, 2020 en el cocinado de alimentos.

Además de evaluar la concentración de polifenoles totales como forma indirecta de medir la capacidad antioxidante de los subproductos deshidratados de cardo, se determinó está directamente a través de los métodos DPPH y FRAP. Como se muestra en la tabla 9, en lo relativo a la capacidad antioxidante DPPH, el subproducto control (CT inicial) mostró diferencias significativas con los subproductos deshidratados con MW, entre los que no hubo diferencias significativas con independencia de la potencia aplicada. También se observa que entre los tratamientos de 1000W y 2000W de potencia los valores fueron similares, aunque el resultado obtenido en el tratamiento de 1000W fue 0,15 $\mu\text{mol trolox inicial /g producto}$ mayor. La capacidad antioxidante DPPH del tratamiento de 1000W fue 0,2 $\mu\text{mol trolox inicial /g producto}$, mayor que el resto de tratamientos, porque los radicales determinados por el método DPPH se vieron afectados por el aumento de la temperatura de tratamiento. Los radicales libre se ven afectados por las altas temperaturas (Muñoz Rojas et al., 2014) como es el caso de las temperaturas alcanzadas en los tratamientos descritos anteriormente.

Con respecto a la capacidad antioxidante medida según la determinación FRAP, el control mostró diferencias significativas con todos los tratamientos, mientras que no se encontraron diferencias entre tratamientos, mostrando que la capacidad antioxidante FRAP no se vio afectada ni por el aumento de tiempo ni por el aumento de temperatura.

La capacidad antioxidante, medida tanto por el método del radical DPPH como el FRAP, fue mayor cuando se utilizó la potencia de 1000W, aunque en el caso del FRAP no se

vieron diferencias significativas con respecto al control. Esto ocurrió porque la actividad de barrido del poder antioxidante férrico reductor se vio menos afectado por el tiempo que con el aumento de la temperatura, como ocurrió en el estudio de Esparza-Martínez et al. (2016) en zumo de mandarina. Esto es debido a que los enlaces que se determinan mediante estas dos determinaciones se vieron más afectados por la subida de temperatura que los enlaces de las moléculas que forman los polifenoles.

Los polifenoles son los causantes principales de la actividad antioxidante medida por DPPH y FRAP. Pero tal y como estudió Mendoza-Isaza et al. (2020) en extractos de Stevia, los compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante están relacionados en que el mecanismo principal de capacidad captadora es a través de la captura del átomo de hidrógeno por parte del DPPH para crear una molécula estable, aunque también puede deberse a que el DPPH extrae un átomo de hidrógeno del grupo hidroxilo de ciertos ácidos y derivados fenólicos, mientras que el ensayo de FRAP fue determinado a través de la capacidad de reducir el hierro (III) a hierro (II) por medio de una reacción de transferencia de un electrón. Con lo cual las interacciones de moléculas que se miden son diferentes y por eso se vieron afectadas de diferente manera por la temperatura y el tiempo como demostró Escutia-López et al. (2020) en extractos de Stevia.

Contenido en fibra dietética (FD)

En la tabla 10, se muestran los valores obtenidos de fibra dietética soluble (SDF), insoluble (IDF) y total (TDF) en los subproductos de cardo. Se puede ver que se obtuvo una mayor cantidad de IDF, valores que oscilaron entre 41 y 63 g/100g peso seco, que de SDF, valores que oscilaron entre 0,77 y 0,94 g/100g peso seco, y que con el tratamiento con el que mayor cantidad de IDF se conservó fue con el de 1000W de potencia. Entre el subproducto control (CT inicial) y el tratamiento de 1000W no se encontraron diferencias en las cantidades de IDF, obteniéndose 62g/100g peso seco, un 20% más que con el tratamiento de 4000W de potencia en el que se obtuvieron 41,40 g/100g peso seco. A este respecto, Zayed y Farag (2020) propusieron el tratamiento por MWD como opción para la obtención de fibras de cardo y encontraron contenidos de TDF en semillas de cardo sin tratar de 20–27 g/100 g valores por debajo de los resultados que se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Fibra dietética soluble (SDF), insoluble (IDF) y total (TDF) en los subproductos de cardo deshidratados.

Subproducto	IDF	SDF	TDF
CT inicial	63,10 ± 4,07 ^b	0,52 ± 0,24 ^{ab}	63,61 ± 4,62 ^c
CD 1000-30	62,08 ± 2,91 ^b	0,48 ± 0,18 ^{ab}	62,56 ± 2,85 ^c
CD 2000-30	58,98 ± 6,84 ^b	0,57 ± 0,13 ^a	59,55 ± 2,65 ^{bc}
CD 3000-15	54,80 ± 1,25 ^b	0,72 ± 0,33 ^b	55,52 ± 1,56 ^b
CD 4000-6	41,40 ± 2,05 ^a	0,94 ± 0,07 ^b	42,34 ± 2,35 ^a

Valor medio ± desviación estándar. Datos expresados en g/100g peso de materia seca. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre los tratamientos (P < 0.05). CT: control. [Cardo deshidratado (CD) - potencia emitida en W - tiempo en minutos].

Además, se obtuvo SDF, que es la más difícil de conservar después de tratamientos de secado porque es más termolábil que la IDF, al estar constituida por componentes como inulina, pectinas, gomas y fructooligosacáridos (Zayed y Farag, 2020). Esta SDF, que aumentó con los tratamientos de mayor potencia porque disminuyó el contenido de agua de la muestra, se asocia con un mejor control glucémico porque forma un gel que ralentiza el tránsito intestinal y la absorción de los hidratos de carbono simples, siendo el único tipo de fibra con beneficios clínicos demostrados (Lehoux et al, 2023).

En la tabla 10, la TDF muestra la misma tendencia que la IDF, no encontrándose diferencias significativas excepto con el tratamiento en el que se utilizaron 4000W de potencia. Con ese tratamiento se reduce hasta un 20% el contenido de TDF en comparación con el control. Esta tendencia indica que la fibra se ve afectada por el aumento de la temperatura al igual que en el estudio de Zayed y Farag (2020) en alcachofa.

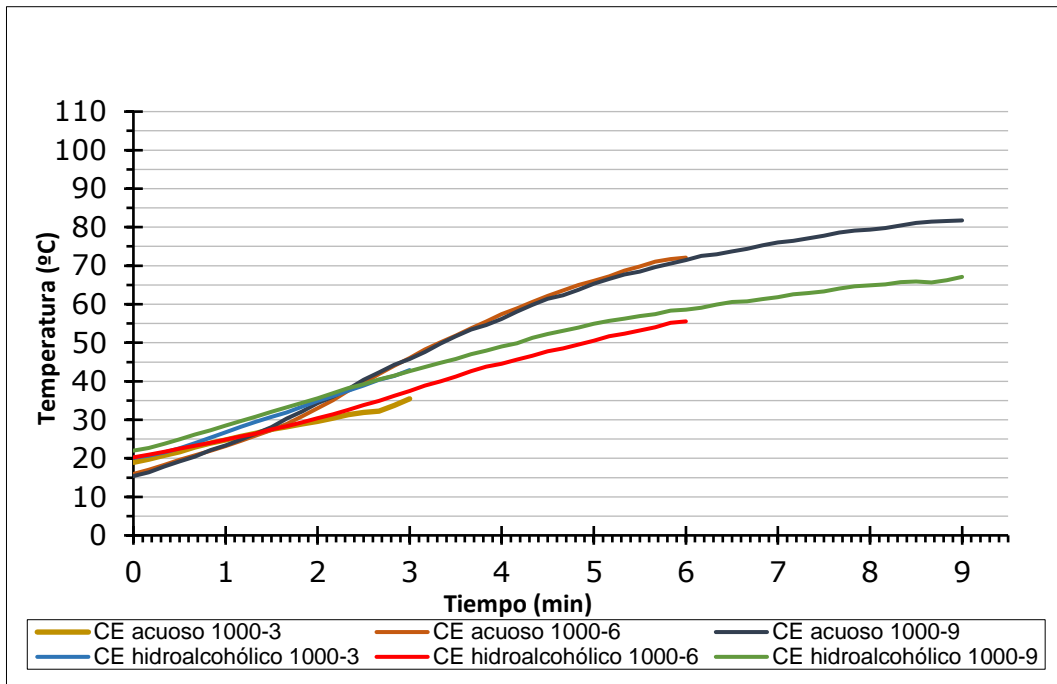
Gallego García et al. (2023) observaron que la tecnología MW es útil para secar los desperdicios de alimentos y residuos lignocelulósicos, y para la obtención de compuestos bioactivos reduciendo el tiempo de proceso hasta un 50% respecto al secado convencional. Sin embargo, hay que seguir investigando para tener en cuenta el consumo de energía y el uso de químicos para la extracción, sin evitarlo, pero reduciendo la cantidad de utilización y con unas condiciones más suaves.

1.1.1.2. Extracción asistida por microondas (MWAE)

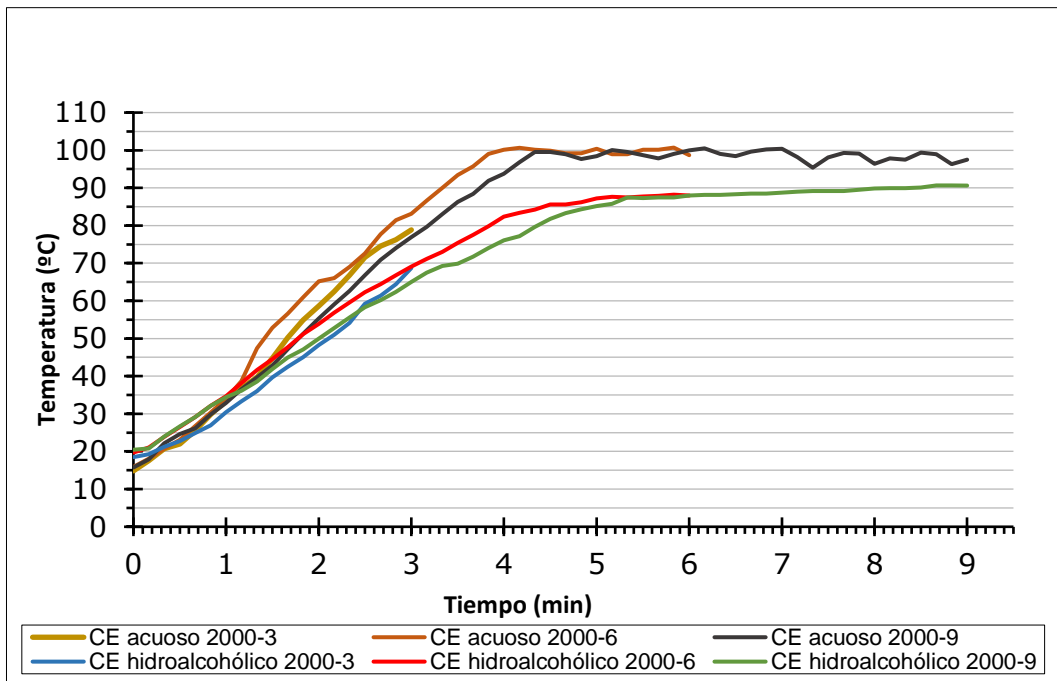
En las figuras 23A, 23B, 23C y 23D se muestran los perfiles de temperatura de la MWAE para obtener extractos acuosos e hidroalcohólicos (60:40) de cardo. En cada figura, se muestran los tratamientos realizados, tanto para la obtención de los extractos acuosos como hidroalcohólicos, con una de las potencias utilizadas durante 3, 6 y 9 minutos. En ellas, puede observarse que cuando se utilizaron potencias de 1000W y 2000W, la

temperatura aumentó en menor medida en los extractos hidroalcohólicos que en los extractos acuosos.

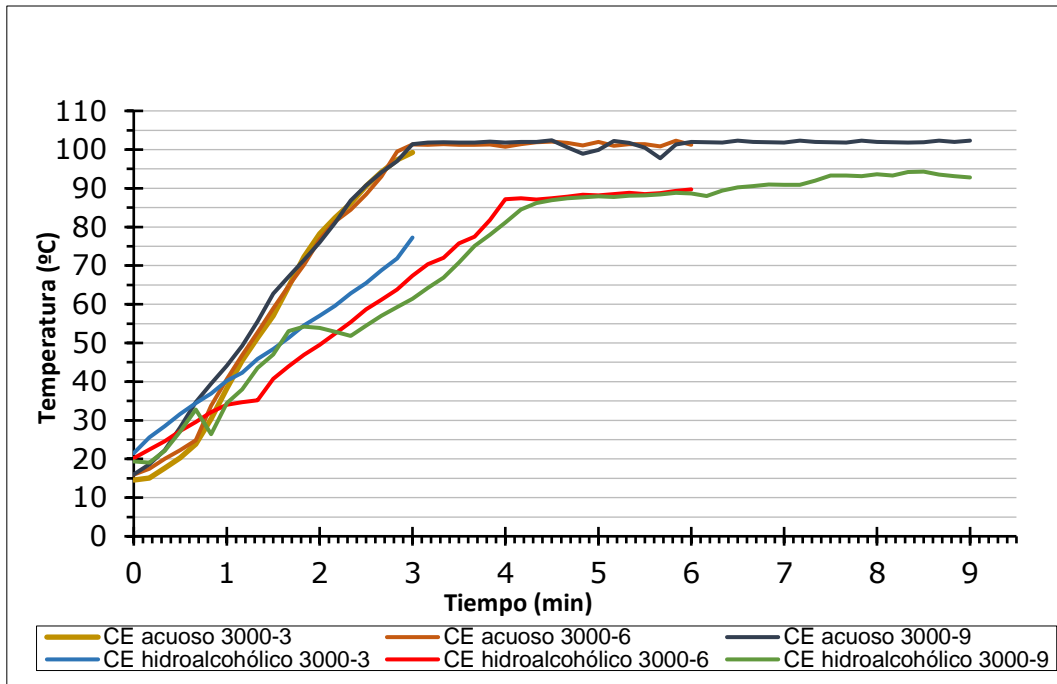
A



B



C



D

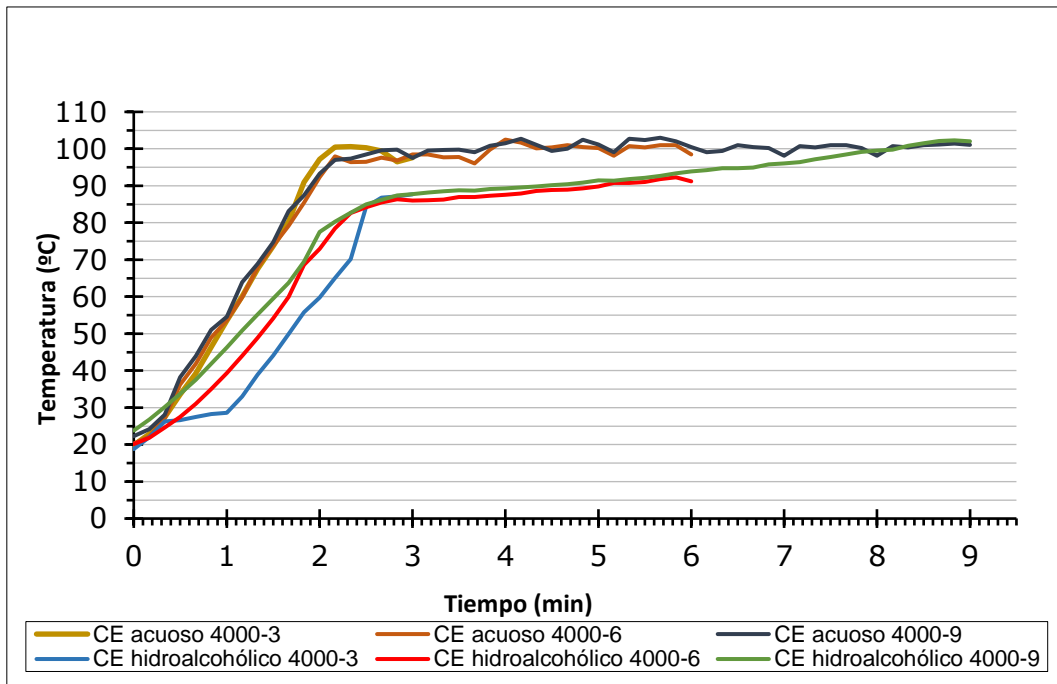


Figura 23. Perfil de temperatura para cada tratamiento de extracción asistida por microondas (MWA) de residuos de cardo. A) 1000W, B) 2000W, C) 3000W y D) 4000W. Leyenda: Cardo extracto (CE) – disolvente - potencia emitida en W - tiempo en minutos.

Como se ve en la figura 23C, cuando se utilizó la potencia de 3000W, la temperatura aumentó en menor medida en los extractos hidroalcohólicos que en los extractos acuosos. Esto mismo ocurrió cuando se utilizó la potencia de 4000W durante 3 y 6 minutos, pero cuando se aumentó el tiempo de tratamiento hasta 9 minutos se alcanzó la misma temperatura utilizando los dos tipos de disolventes. Esto se debió a que el etanol se evaporó más rápidamente que el agua porque la temperatura de ebullición del etanol es de 78°C (Velasco, 2014), menor que la temperatura de ebullición del agua, 100°C. Además, pudo ser debido a que el producto absorbió mayor energía al principio del tratamiento y disminuyó a medida que transcurrió el tiempo de tratamiento al igual que en el estudio de Galán Lacarra (2011) en un secadero industrial.

Además, al igual que en los tratamientos para la MWD de los residuos de cardo, a medida que se aumentó la potencia, aumentó la temperatura de tratamiento.

Para los extractos de cardo acuosos e hidroalcohólicos se alcanzaron temperaturas similares, una temperatura de entre 41°C en el tratamiento con 1000W de potencia a 3 minutos y una temperatura de 101°C en el tratamiento de mayor potencia y tiempo (4000W 9 minutos), por lo que influyó el solvente en menor medida que la potencia y el tiempo de tratamiento para la extracción de los compuestos que fueron los parámetros que provocaron la ruptura de las células.

A continuación, en la tabla 11, se muestran las condiciones de tratamiento empleadas para la obtención de extractos mediante MWAE y la densidad energética calculada.

Tabla 11. Condiciones de tratamiento y densidad energética aplicada en los diferentes tratamientos mediante extracción asistida por microondas (MWAE) de los residuos de cardo.

Tratamiento	Peso (kg)	Tiempo (h)	Potencia emitida	Potencia reflejada	Potencia absorbida	D.E. (W h/kg)
CE acuoso1000-9	0,6	0,15	1000	628,33	371,67	92,92
CE acuoso 2000-9	0,6	0,15	2000	1127,59	872,41	218,10
CE acuoso 3000-9	0,6	0,15	3000	1255,90	1744,10	436,03
CE acuoso 4000-9	0,6	0,15	4000	1386,00	2614,00	653,50
CE etanólico 1000-9	0,6	0,15	1000	684,50	315,50	78,88
CE etanólico 2000-9	0,6	0,15	2000	1085,96	914,04	228,51
CE etanólico 3000-9	0,6	0,15	3000	1201,32	1798,68	449,67
CE etanólico 4000-9	0,6	0,15	4000	1381,85	2618,14	654,54

[Cardo extracto (CE) - disolvente - potencia emitida en W – tiempo en minutos]. D.E.: densidad energética.

Como se muestra en la tabla 11, a medida que aumentó la potencia del tratamiento a un mismo tiempo, aumentó la densidad energética, hecho que coincide con Bo-Lin et al. (2023) en su estudio sobre la liofilización de piña asistida por microondas. La densidad energética fue mayor en los experimentos para obtener los extractos acuosos que en

los hidroalcohólicos, entre 14 y 1 W h/kg mayor dependiendo del tratamiento, porque el etanol al tener una temperatura de ebullición más baja que el agua se evaporó con mayor rapidez, con lo cual el tiempo de tratamiento se redujo.

En los extractos de cardo obtenidos mediante MWAE, se analizaron la concentración de polifenoles totales y la capacidad antioxidante tanto DPPH como FRAP, como se puede ver en la tabla 12.

Capacidad antioxidante

En la tabla 12 se observa el contenido de polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los extractos de cardo obtenidos mediante MWAE.

Tabla 12. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los extractos de cardo.

Subproducto	Extracto acuoso			Extracto hidroalcohólico		
	Polifenoles totales (mg/kg ácido gálico)	DPPH (μmol trolox inicial /g producto)	FRAP (μmol TE /mg producto)	Polifenoles totales (mg/kg ácido gálico)	DPPH (μmol trolox inicial /g producto)	FRAP (μmol TE /mg producto)
CE 1000-3	1,82 \pm 0,77 ^a	0,16 \pm 0,01 ^a	3,80 \pm 0,06 ^a	1,21 \pm 0,29 ^a	0,17 \pm 0,00 ^a	4,46 \pm 0,81 ^a
CE 1000-6	1,86 \pm 0,76 ^a	0,16 \pm 0,00 ^a	4,06 \pm 0,11 ^{ab}	2,12 \pm 0,76 ^{ab}	0,19 \pm 0,01 ^{ab}	4,76 \pm 0,14 ^a
CE 1000-9	6,73 \pm 0,80 ^{bcd}	0,20 \pm 0,00 ^c	4,82 \pm 0,07 ^c	2,42 \pm 0,98 ^{abc}	0,22 \pm 0,00 ^b	5,29 \pm 0,24 ^{ab}
CE 2000-3	1,59 \pm 1,43 ^{abc}	0,18 \pm 0,01 ^b	4,74 \pm 0,65 ^c	1,06 \pm 0,33 ^a	0,20 \pm 0,00 ^b	6,61 \pm 0,42 ^b
CE 2000-6	5,21 \pm 0,93 ^{abc}	0,20 \pm 0,01 ^c	5,09 \pm 0,16 ^{cd}	2,12 \pm 0,30 ^{ab}	0,27 \pm 0,00 ^c	8,87 \pm 1,11 ^c
CE 2000-9	7,76 \pm 1,79 ^{cd}	0,23 \pm 0,00 ^d	6,09 \pm 0,29 ^e	4,52 \pm 0,25 ^{cd}	0,43 \pm 0,00 ^e	12,39 \pm 1,30 ^d
CE 3000-3	3,68 \pm 1,24 ^{ab}	0,18 \pm 0,00 ^b	4,42 \pm 0,20 ^{abc}	2,60 \pm 0,95 ^{abc}	0,20 \pm 0,00 ^{ab}	5,43 \pm 0,23 ^{ab}
CE 3000-6	5,54 \pm 0,77 ^{abcd}	0,23 \pm 0,00 ^d	5,69 \pm 0,08 ^{de}	5,12 \pm 2,41 ^d	0,37 \pm 0,01 ^d	11,21 \pm 0,72 ^d
CE 3000-9	8,97 \pm 1,05 ^d	0,26 \pm 0,00 ^e	7,00 \pm 0,10 ^f	12,92 \pm 2,42 ^f	0,73 \pm 0,01 ^g	20,65 \pm 0,06 ^e
CE 4000-3	2,44 \pm 0,91 ^a	0,18 \pm 0,01 ^b	4,67 \pm 0,10 ^{bc}	3,91 \pm 1,19 ^{bcd}	0,27 \pm 0,00 ^c	6,57 \pm 0,04 ^b
CE 4000-6	5,51 \pm 2,92 ^{abcd}	0,22 \pm 0,00 ^d	6,23 \pm 0,86 ^e	9,52 \pm 1,00 ^e	0,56 \pm 0,03 ^f	20,37 \pm 2,82 ^e
CD 4000-9	4,70 \pm 0,15 ^{abc}	0,35 \pm 0,00 ^f	11,67 \pm 0,77 ^g	20,27 \pm 2,38 ^g	1,01 \pm 0,07 ^h	29,54 \pm 0,69 ^f

Valor medio \pm desviación estándar. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.05$). [Cardo extracto (CE) - potencia emitida en W - tiempo en minutos].

Como se muestra en la tabla 12, en los extractos de cardo, la concentración de polifenoles totales fue mayor en los extractos hidroalcohólicos que en los acuosos por la polarización del solvente al mezclarse agua con etanol y cambiarse las interacciones entre las moléculas. Además, se observó una mayor concentración de polifenoles totales en los extractos hidroalcohólicos cuando se aumentó la potencia de tratamiento a 3000W y 4000W, sin embargo, en los extractos acuosos la mayor concentración de polifenoles totales se encontró al utilizar potencias de 2000W y 3000W. En los extractos acuosos no se apreciaron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos,

mientras que en los extractos hidroalcohólicos se apreciaron diferencias entre los tratamientos de 4000W de potencia y el resto de tratamientos. Aplicando esta potencia y utilizando como disolvente el agua, se observó la mayor concentración de polifenoles en los extractos (8,97 mg/l ácido gálico). Su análogo hidroalcohólico fue superior con 20,27 mg/kg ácido gálico, más del doble, siendo el extracto hidroalcohólico con mayor cantidad de polifenoles totales en el que se utilizó 4000W de potencia durante 9 minutos. La potencia más alta causó la rotura de un mayor número de células, lo que causó la migración de los polifenoles al disolvente. Los resultados corroboran lo encontrado en un vegetal de la misma familia que el cardo, la alcachofa, por Mena-García et al. (2020), aunque estos autores trabajaron en condiciones de tratamiento diferentes, variando el tiempo y la temperatura de tratamiento y utilizando solventes como metanol, agua, etanol y mezclas de ellos.

Además de la energía aplicada, en el proceso de MWAE, el tipo de disolvente también influyó en la eficacia de la extracción de polifenoles porque dependiendo del tipo de enlace que se formó con el disolvente se extrajeron en mayor contenido, observándose que la diferencia con el agua se debe a la presencia de etanol, el cual consiguió una mayor extracción de los compuestos al ser un solvente con una polarización mayor que el acuoso. En consecuencia, en la MWAE, la utilización de 4000W durante 9 minutos con una mezcla agua:etanol al 60:40 como disolvente, dio lugar a la máxima extracción de los polifenoles.

En la tabla 12 se observa como la capacidad antioxidante del extracto de cardo, medida tanto con el método DPPH como el de FRAP, aumentó con el tiempo de tratamiento con cada una de las potencias aplicadas y con el aumento de la potencia de tratamiento. Además, se encontraron diferencias significativas de capacidad antioxidante de los extractos entre los tratamientos con mayor potencia y tiempo (4000W 9 minutos) y el resto de tratamientos. Comparando los extractos con mayor capacidad antioxidante que se obtuvieron aplicando 4000W durante 9 minutos, se observó que, frente al radical DPPH, fue 2,8 veces mayor en el extracto hidroalcohólico, y según el método FRAP, el resultado fue 2,5 veces mayor en ese extracto. Otros autores como Chihoub et al. (2019), obtuvieron, al igual que en esta tesis doctoral, extractos hidroalcohólicos de cardo con valores de la capacidad antioxidante DPPH de 0,07 μmol trolox inicial /g producto. Si comparamos los resultados de estos autores con los de esta tesis doctoral la extracción fue menor porque usaron menor cantidad de solvente y de cardo, aunque el tiempo fuera mayor (1h).

Como se muestra en la tabla 12, para la capacidad antioxidante DPPH en los extractos acuosos, además, se observó como al aumentar la potencia en el mismo intervalo de tiempo, se aumentó la concentración de los antioxidantes, mientras que en el FRAP esa diferencia no se observó hasta que se aumentó la potencia a 2000W. Mientras que en los extractos hidroalcohólicos aumentó la concentración de polifenoles cuando se aumentó el tiempo de tratamiento a 6 y 9 minutos al aumentar la potencia a 3000W y

4000W, al igual que lo observado en los resultados obtenidos por el método FRAP, pero en este caso las diferencias significativas también se observaron con 2000W de potencia de tratamiento. Sin embargo, al analizar la capacidad antioxidante DPPH en el mismo tiempo de tratamiento aumentó siempre la concentración cuando se aumentó la potencia de tratamiento.

Sharad Mali y Kumar (2023) estudiaron la tecnología MWAE en comparación con la extracción convencional para valorizar y evaluar los atributos funcionales del polvo de cáscara de judía negra, consiguiendo obtener antocianinas, polifenoles y actividad antioxidante además de la inhibición de α -amilasa y la α -glucosidasa. Los resultados mostraron que MWAE obtuvo un mayor rendimiento de contenido de antocianina, DPPH y actividad ABTS en comparación con la extracción convencional. En estudios futuros se debe investigar sobre la separación y purificación del extracto para mejorar el rendimiento bioactivo de los componentes individuales responsables de las actividades biológicas.

1.1.2. Extracción asistida por pulsos eléctricos de intensidad moderada (PEFAE)

En la tabla 13, se muestran las concentraciones de polifenoles totales y las capacidades antioxidantes DPPH y FRAP en los subproductos obtenidos tras la aplicación de PEFAE de los residuos de cardo.

- Subproductos líquidos:

Tabla 13. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los subproductos líquidos de cardo obtenidos mediante extracción asistida por pulsos eléctricos (PEFAE).

Subproducto	Líquidos		
	Polifenoles totales (mg/kg ácido gálico)	DPPH (μ mol trolox inicial /g producto)	FRAP (μ mol TE /mg producto)
0,5 kV/cm 10 p	0,19 \pm 0,07 ^a	0,04 \pm 0,00 ^a	1,05 \pm 0,01 ^a
0,5 kV/cm 25 p	0,28 \pm 0,05 ^b	0,05 \pm 0,00 ^a	1,08 \pm 0,00 ^a
1 kV/cm 10 p	0,19 \pm 0,07 ^a	0,05 \pm 0,00 ^a	1,08 \pm 0,03 ^a
1 kV/cm 25 p	0,22 \pm 0,04 ^{ab}	0,05 \pm 0,00 ^a	1,05 \pm 0,00 ^a
2 kV/cm 10 p	0,18 \pm 0,02 ^a	0,05 \pm 0,00 ^a	1,06 \pm 0,02 ^a
2 kV/cm 25 p	0,24 \pm 0,04 ^{ab}	0,05 \pm 0,00 ^a	1,08 \pm 0,04 ^a

Valor medio \pm desviación estándar. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre los tratamientos con Pulsos eléctricos ($P < 0.05$). p: pulsos.

En la parte líquida resultante de la PEFAE de residuos de cardo en distintas condiciones de tratamiento, como se observa en la tabla 13, no se encontraron diferencias significativas en la capacidad antioxidante FRAP y DPPH, mientras que sí las hubo en su

concentración de polifenoles totales entre los tratamientos en los que se aplicó mayor número de pulsos y menor campo eléctrico. En el caso de los polifenoles totales, su concentración aumentó al aumentar el número de pulsos aplicado. Al igual que encontraron Naliyadhara et al. (2022) en diferentes frutas y hortalizas, el aumento de la intensidad de campo a 2 kV/cm no significó un aumento de la extracción de polifenoles.

- Subproductos sólidos:

Al analizar la capacidad antioxidante y los polifenoles totales de la parte sólida (tabla 14) después del tratamiento con PEFAE, se observó que en la parte sólida, tal y como era de esperar, se encontraron la mayor parte de los compuestos de interés.

Tabla 14. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los subproductos sólidos de cardo obtenidos mediante extracción asistida por pulsos eléctricos (PEFAE).

Subproducto	Sólidos		
	Polifenoles totales (mg/kg ácido gálico)	DPPH (μmol trolox inicial /g producto)	FRAP (μmol /mg producto)
0,5 kV/cm 10 p	141,35 \pm 5,68 ^a	8,06 \pm 0,23 ^a	371,39 \pm 10,87 ^a
0,5 kV/cm 25 p	159,03 \pm 24,97 ^a	9,09 \pm 0,02 ^{bc}	344,93 \pm 21,99 ^a
1 kV/cm 10 p	161,15 \pm 9,03 ^a	9,21 \pm 0,01 ^{bc}	378,33 \pm 24,65 ^a
1 kV/cm 25 p	150,25 \pm 28,82 ^a	10,55 \pm 0,04 ^d	429,61 \pm 57,46 ^a
2 kV/cm 10 p	121,61 \pm 21,76 ^a	9,50 \pm 0,00 ^c	480,30 \pm 27,49 ^a
2 kV/cm 25 p	161,81 \pm 20,07 ^a	8,67 \pm 0,02 ^b	387,82 \pm 26,30 ^a

Valor medio \pm desviación estándar. Datos expresados en materia seca. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre los tratamientos con Pulsos eléctricos ($P < 0.05$). p: pulsos.

En la tabla 14, se comparan los resultados obtenidos en los extractos de cardo al aplicar los diferentes tratamientos, sin observarse diferencias significativas ni en la concentración de polifenoles totales ni en su capacidad antioxidante FRAP, mientras que el tratamiento con 25 p a 1 kV/cm dio lugar a una capacidad antioxidante medida con el radical DPPH significativamente mayor que con el resto de tratamientos. Teniendo en cuenta el número de pulsos aplicados, la intensidad del campo eléctrico y los resultados obtenidos, se seleccionó para la combinación con MWD el tratamiento de 1 kV/cm 10p de PEFAE porque es corto y utiliza poca energía, obteniéndose valores de 161,1 mg/kg ácido gálico para los polifenoles totales, 10,5 μmol trolox inicial /g producto para la capacidad antioxidante DPPH y 429,61 μmol /mg producto para capacidad antioxidante FRAP, para la combinación con MWD.

Además, tanto en los polifenoles totales como en la capacidad antioxidante al aplicar el tratamiento de 2 kV/cm, no se aumentó la concentración de esos compuestos, ni tampoco al aplicar 25 pulsos en vez de 10 pulsos. Esto demuestra que las intensidades de campo y los números de pulso estudiados no afectaron a los compuestos del residuo, al igual que en los estudios de Naliyadhara et al. (2022) en vegetales y frutas con PEF a

intensidades medias y sin un número excesivo de pulsos, ya que no se destruyen los enlaces de los compuestos antioxidantes y algunos se disuelven en el solvente y no permanecen en la muestra sólida.

Bocker y Keven Silva (2022) estudiaron la obtención de colorantes naturales como antocianinas (rojo azul-púrpura), betalainas (rojo), carotenoides (amarillo-naranja-rojo) y clorofilas (verde) mediante PEFAE a partir de vegetales dada la creciente demanda de productos naturales por parte de los consumidores y la industria agroalimentaria. Los PEFAE demostraron producir una baja degradación de compuestos termosensibles y obtener un alto rendimiento del proceso. Sin embargo, es necesario realizar nuevos estudios para optimizar condiciones de procesamiento, además de su gasto energético, que aumentaría al hacer el escalado industrial.

1.1.3. Combinación de las dos tecnologías (PEFAE y MWD)

Teniendo en cuenta el contenido de polifenoles totales, la capacidad antioxidante de los diferentes subproductos de cardo, y el gasto energético, se seleccionaron los tratamientos de PEFAE 1kV/cm 10p y MWD 4000W 6 min para combinarlos. La materia prima utilizada para la combinación de PEFAE y MWD, es el sólido que se obtuvo de los tratamientos PEFAE.

A continuación, se presentan y discuten los resultados de polifenoles totales y capacidad antioxidante de la combinación del tratamiento PEFAE y MWD.

La α_w de los subproductos deshidratados de cardo obtenidos mediante la combinación de PEFAE (1kV/cm 10p) y MWD (4000W 6 min) fue 0,4459 y su humedad 5,88%. Para el contenido en polifenoles totales y capacidad antioxidante DPPH y FRAP se obtuvieron valores con la combinación de tratamiento de 385,16 mg/kg ácido gálico, 0,95 μmol trolox inicial /g producto y 135,39 μmol /mg producto respectivamente. La concentración de polifenoles totales en estos extractos duplicó la obtenida cuando se realizó la PEFAE (tabla 14), mientras que la capacidad antioxidante DPPH se redujo 10 veces y la capacidad antioxidante FRAP se redujo 2,8 veces, indicando que la temperatura de deshidratación que se alcanzó, 130°C, permitió mantener el contenido de polifenoles, pero si afectó en mayor medida a las demás moléculas, destruyéndose con el aumento de temperatura.

Si observamos la comparación en el contenido de polifenoles totales en los subproductos de cardo, de los tratamientos con MWD, PEFAE y la combinación de ellos, se observó que el mejor tratamiento fue en el que sólo se utilizan MWD (tabla 9), ya que se obtuvieron resultados tres veces mayores que con PEFAE (tablas 13 y 14) y 1,25 mayores que con la combinación de tratamientos.

Además, al evaluar la capacidad antioxidante DPPH y FRAP de los subproductos de cardo se observó que la capacidad antioxidante fue mayor en los subproductos sólidos aplicando sólo PEFAE, como se observa en la tabla 14, que con la MWD (tabla 9) o con

la combinación de ambas tecnologías. Para la capacidad antioxidante DPPH fue 9,5 μmol trolox inicial /g producto mayor con respecto a la MWD y la combinación mientras que para la capacidad antioxidante FRAP fue 345 $\mu\text{mol TE/mg}$ producto mayor con respecto a MWD y 355 $\mu\text{mol TE/mg}$ producto con respecto a la combinación de las dos tecnologías. Todo esto pudo ser debido a que los polifenoles totales son más resistentes a la temperatura que los antioxidantes que se analizan con DPPH y FRAP, al igual que en el estudio realizado por Esparza-Martínez et al. (2016) en zumo de mandarina.

En base a la densidad energética se seleccionarían los tratamientos MWAE, pero con esta tecnología los resultados del contenido de polifenoles fueron muy inferiores, hasta un 96% menores, a los obtenidos por MWD. Sin embargo, considerando la capacidad antioxidante (DPPH y FRAP), el tratamiento seleccionado fue PEFAE como se he explicado en el anterior párrafo, aunque los resultados en polifenoles también son muy inferiores a los obtenidos con MWD. Por tanto, en base al contenido de polifenoles y al tiempo de tratamiento, que son los parámetros más importantes a tener en cuenta, se seleccionó el tratamiento de MWD 4000W 6 min con el objetivo de obtener un subproducto sólido rico en compuesto antioxidantes y FD que puede ser utilizado para la elaboración de alimentos.

Como se ha demostrado, aunque el tratamiento MWD es eficaz para la obtención de subproductos, estos tuvieron menor contenido en compuestos de interés, como los polifenoles y la fibra dietética, que el control, con lo cual podría seguir investigándose, por ejemplo, con una cinta más larga que permita un mayor recorrido del producto en la cinta transportadora del MW, o trabajando variando la potencia durante el tratamiento y así optimizar en mayor medida los tratamientos.

Bocker y Keven Silva (2022) concluyeron que la combinación de PEFAE con otras tecnologías también puede ser una alternativa que permita aumentar la eficiencia energética del proceso y una mayor permeabilidad de la estructura celular, promoviendo un aumento en la extracción.

Por tanto, un proceso asistido por el PEFAE proporciona un mayor rendimiento de extracción, mayor eficiencia energética mediante extracción más corta, menor cantidad de solvente y condiciones de temperatura más bajas. Sin embargo, todavía se tiene que estudiar en otros compuestos y optimizar los parámetros utilizados.

1.2. Subproductos obtenidos de residuos de alcachofa

En este apartado se muestran los resultados obtenidos al ser sometidos los residuos de alcachofa, descritos en el apartado 1 de Materiales y métodos, a MWD, MWAE, PEFAE y la combinación de ambas tecnologías.

1.2.1. Efectos de los tratamientos con microondas (MW)

1.2.1.1. Deshidratación (MWD)

Mediante las potencias utilizadas con MW se alcanzó la temperatura necesaria para la deshidratación de los residuos de alcachofa. En la figura 24, se observa como a medida que aumentó la potencia de tratamiento aumentó la temperatura que se alcanzó durante ese tratamiento tal y como expuso Maupoey et al. (2001) en su estudio sobre el secado por aire caliente de diferentes tipos de alimentos.

Con el tratamiento de menor potencia (1000W), como se puede ver en la figura 24, se alcanzó una temperatura de 80°C en 3,4 minutos, mientras que con los tratamientos donde se utilizaron las potencias de 2000W y 3000W se alcanzó una temperatura de 100°C en 2,5 y 3,5 minutos respectivamente. Además, con el tratamiento de máxima potencia (4000W), se alcanzó en 2,5 minutos la mayor temperatura (120°C), temperatura similar alcanzada durante el tratamiento con 4000W de potencia del producto estudiado y explicado anteriormente, el cardo.

Al aumentar la potencia de tratamiento de 1000W a 2000W y 3000W el tiempo para alcanzar la temperatura máxima se redujo en 1,2 y 2 minutos, respectivamente, mientras que en el tratamiento que se utilizó la potencia de 4000W sólo se redujo 1 minuto porque la temperatura que se alcanzó fue la mayor.

Además, en la figura 24 se puede ver que el tiempo que se utilizó para alcanzar las temperaturas máximas fue menor que en el caso del cardo, y como consecuencia se vio menos fluctuación de temperatura durante el tratamiento. Esto es debido a que la humedad inicial de la alcachofa fue un 7,8%, menor que en el cardo, y a que la estructura de la alcachofa es más fina.

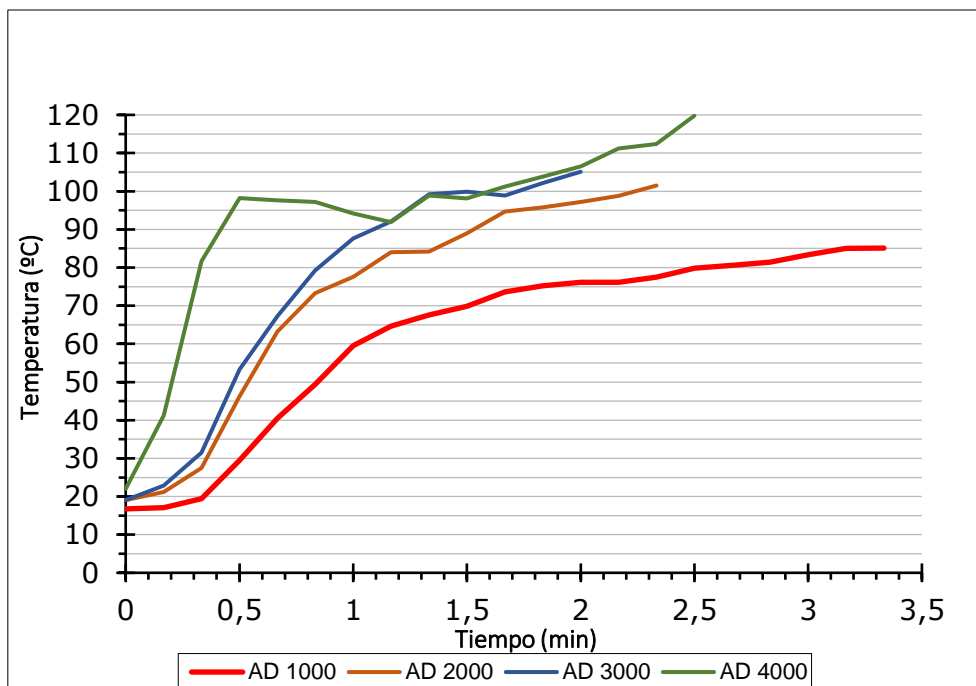


Figura 24. Perfil de temperatura durante los tratamientos de deshidratación mediante microondas (MWD) de residuos de alcachofa. Leyenda: Alcachofa deshidratada (AD) - potencia emitida en W.

A medida que se realizó la deshidratación de los residuos de alcachofa, se obtuvieron datos de las potencias emitidas y reflejadas que se utilizaron para calcular la densidad energética de los diferentes tratamientos, como se muestra en la tabla 15.

Tabla 15. Condiciones de tratamiento y densidad energética aplicada en los diferentes tratamientos de deshidratación mediante microondas (MWD) para deshidratar los residuos de alcachofa.

Tratamiento	Peso (kg)	Tiempo (h)	Potencia emitida	Potencia reflejada	Potencia absorbida	D.E. (W h/kg)
AD 1000-40	0,109	0,67	1000	836,41	163,59	994,89
AD 2000-40	0,110	0,67	2000	1496,26	503,74	3047,44
AD 3000-15	0,110	0,25	3000	1863,96	1136,04	2558,87
AD 4000-10	0,110	0,17	4000	1921,24	2078,76	3127,18

[Alcachofa deshidratada (AD) - potencia emitida en W – tiempo en minutos]. D.E.: densidad energética.

Como se puede observar en la tabla 15, en el tratamiento con 1000W de potencia se obtuvo una densidad energética de 995W h/kg, mientras que en los tratamientos de 2000W y 3000W se obtuvieron valores entre 3047 y 2558W h/kg respectivamente y, en el de 4000W la densidad energética fue 3127W h/kg. La densidad energética aumentó a medida que aumentó la potencia de tratamiento, salvo en los tratamientos que se utilizaron las potencias de 2000W y 3000W. En estos dos tratamientos los valores de

densidad energética fueron similares ya que la diferencia del tiempo empleado es importante, con 2000W la duración del tratamiento fue de 40 minutos y con 3000W fue de 15 minutos. En esta tesis doctoral, al igual que en el estudio de Bobby Shekarau et al. (2023) realizado sobre col blanca, tal y como se ha explicado anteriormente en el caso del cardo, el consumo de energía fue mayor a medida que aumentó la potencia o el tiempo de tratamiento.

Por lo tanto, el tratamiento que mejor resultado mostró en cuanto a densidad energética fue el de 3000W con una densidad energética de 2558,87W h/kg.

Humedad

La evolución de la humedad de los subproductos de alcachofa a lo largo de los diferentes tratamientos se observa en la figura 25. Para conocer la evolución de la humedad durante cada tratamiento se recogieron muestras del subproducto. En el tratamiento de 1000W se tomaron muestras a 5, 15, 30 y 40 minutos, al igual que en el de 2000W, mientras que en el tratamiento de 3000W se tomaron las muestras a los 2, 5, 7 y 15 minutos y en el de 4000W de potencia durante a los 2, 5 y 10 minutos. En todos los casos, el último punto de análisis fue el seleccionado porque se verificó que la humedad conseguida era la deseada.

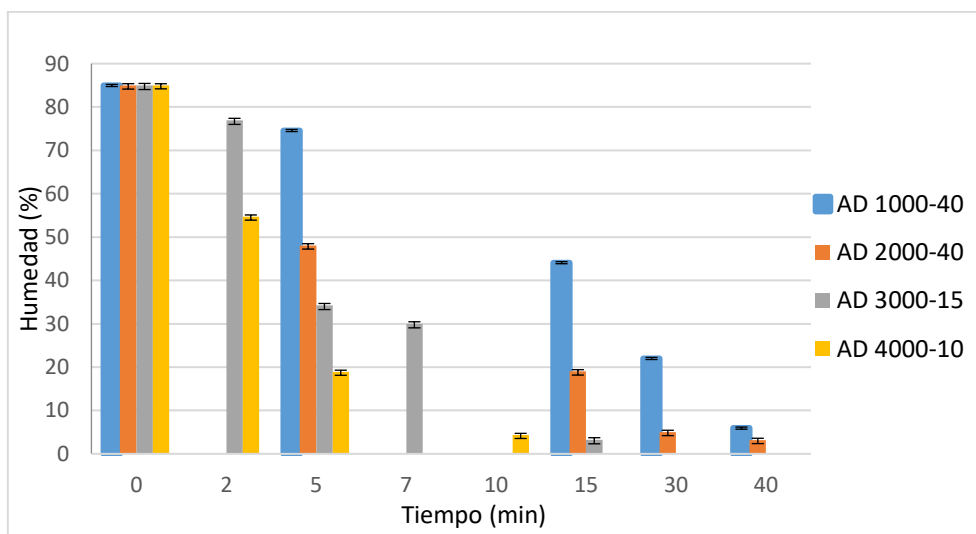


Figura 25. Evolución de la humedad para cada tratamiento de deshidratado mediante microondas (MWD) de los residuos de alcachofa. Leyenda: Alcachofa deshidratada (AD) - potencia emitida en W - tiempo en minutos.

Como se muestra en la figura 28, la humedad inicial del residuo de alcachofa fue de 85%. Al aplicar la MWD, se consiguió una gran reducción de la humedad, ya que ésta osciló

entre un 5,9% y un 3,2% tras los tratamientos. La variación de tiempo que se empleó en cada tratamiento fue amplia, con diferencias de hasta 30 minutos entre ellos.

Los tratamientos de 1000W y 2000W se descartaron porque los tiempos de procesado fueron excesivamente largos para poder reproducirse el proceso en una industria alimentaria. Sin embargo, los otros dos tratamientos se consideran válidos porque el tiempo fue más corto, y, aunque aumentó más la temperatura que con las potencias más bajas, se conservaron los compuestos de interés, tal y como estudiaron Esparza-Martínez et al. (2016) en el zumo de mandarina.

Color

En las imágenes de la figura 26 se muestra que todos los tratamientos MWD sobre el residuo de alcachofa fueron eficaces para conseguir secar la muestra sin llegar a carbonizarla, manteniendo el color verde que caracteriza a la alcachofa.

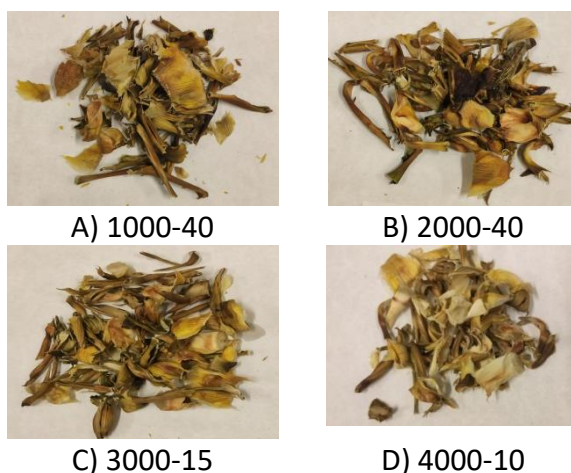


Figura 26. Aspecto de los subproductos de alcachofa después de los tratamientos de deshidratado mediante microondas (MWD). Leyenda: Potencia emitida en W - tiempo en minutos.

Además, para comparar el aspecto de color se obtuvieron los datos de L^* , a^* y b^* mediante un colorímetro y se calculó la diferencia de color (ΔE), el croma (C) y el tono (h), dando los resultados que se muestran en la tabla 16.

Tabla 16. Parámetros de color de los subproductos de alcachofa deshidratados.

Subproducto	L*	a*	b*	C	h	ΔE
CT inicial	51,22 ± 2,07 ^a	0,61 ± 0,37 ^c	7,48 ± 1,15 ^a	28,67 ± 8,85 ^a	1,49 ± 0,06 ^a	-
AD 1000-40	59,23 ± 1,71 ^b	-0,03 ± 0,29 ^b	14,47 ± 1,04 ^b	105,36 ± 17,85 ^b	1,57 ± 0,03 ^b	64,75 ^a
AD 2000-40	63,91 ± 2,63 ^c	-0,60 ± 0,50 ^a	19,29 ± 2,07 ^d	185,25 ± 2,71 ^d	1,60 ± 0,00 ^c	146,06 ^c
AD 3000-15	58,18 ± 1,90 ^b	0,42 ± 0,39 ^c	18,39 ± 1,21 ^c	169,71 ± 11,66 ^c	1,55 ± 0,01 ^b	79,84 ^a
AD 4000-10	59,39 ± 2,23 ^b	-0,48 ± 0,54 ^a	19,86 ± 0,41 ^d	197,56 ± 9,99 ^d	1,59 ± 0,01 ^c	109,57 ^b

Valor medio ± desviación estándar. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.05$). CT: control. [Alcachofa deshidratada (AD) - potencia emitida en W - tiempo en minutos]. L*: luminosidad (L=0 rendimientos negro y L=100 indica blanca). a*: posición entre magenta y verde (+a= magenta, frente a -a= verde). b*: posición entre amarillo y azul (+b = amarillo frente a -b= azules). ΔE: diferencia de color. C: croma. h: tono.

En la tabla 15 para la luminosidad (L*), se observaron diferencias significativas entre los subproductos resultantes de los distintos tratamientos y el subproducto control (CT inicial), siendo más luminosos los subproductos obtenidos mediante MWD presentando un color más intenso que el control. Esto fue debido a que, a medida que se deshidrataron los residuos, intensificaron el tono verde de la alcachofa, sin oscurecerse.

En este aspecto, también se observaron diferencias significativas en el color L* entre el tratamiento de 2000W de potencia con el resto de tratamientos, porque se utilizó mayor tiempo que en los tratamientos de mayor potencia, e igual tiempo pero mayor potencia que en el tratamiento de 1000W. Por este motivo, el subproducto que se obtuvo con 2000W es el que presentó un color más intenso.

Para el valor de a*, como se muestra en la tabla 15, el color fue más verde al aplicar los tratamientos MWD sobre los residuos. Además, se observó un mayor tono verde en los tratamientos que se utilizaron las potencia de 2000W y 4000W. Al observar el valor de b*, se vio que el color de los subproductos tendió a ser más amarillo cuando se aumentó la potencia, siendo el valor menor en el control. Los resultados de estos dos parámetros demostraron el color más intenso de los subproductos tratados mediante MWD.

C aumentó a medida que aumentó la intensidad de la potencia y el tiempo de tratamiento, siendo menor cuando no se aplicó ningún tratamiento. Sin embargo, h fue similar por un lado entre el tratamiento de 1000W y 3000W, y por otro lado entre el tratamiento de 2000W y 4000W. ΔE frente al control mostró más diferencias con los subproductos obtenidos al aplicar las potencias de 2000W 40min y 4000W 10min, que fueron los de mayor potencia y tiempo utilizados.

Al igual que en lo mencionado en este apartado, Prieto y Jiménez en su estudio de 2020, descubrieron que se produjo un aumento del color verde en el producto alimentario para después disminuir progresivamente según avanza el tiempo de tratamiento térmico durante el cocinado.

Con respecto a todos los parámetros estudiados, se dedujo que dependiendo del tiempo y la potencia de tratamiento el color de los subproductos tratados mediante MWD varió, intensificando su color en comparación con el control inicial.

Como consecuencia de los resultados obtenidos, los tiempos y potencias seleccionados en base a la humedad, la densidad energética y el aspecto fueron: la potencia de 3000W 15 minutos y la potencia de 4000W 10 minutos.

Actividad de agua

También se analizó la a_w (tabla 17) en los subproductos de alcachofa como referencia para la predicción de un posible deterioro del producto por crecimiento microbiano.

Tabla 17. Actividad de agua en los subproductos de alcachofa deshidratados.

Subproducto	a_w
CT inicial	0,9566 ± 0,00
AD 1000-40	0,4563 ± 0,01
AD 2000-40	0,4571 ± 0,00
AD 3000-15	0,4545 ± 0,01
AD 4000-10	0,4488 ± 0,01

Valor medio ± desviación estándar. Los datos del control inicial (CT inicial) y de los tratamientos microondas se presentan en actividad de agua (a_w) que no tiene unidades. [Alcachofa deshidratada (AD) – potencia emitida en W - tiempo en minutos].

La alcachofa tiene un pH de 5,6, y al igual que en el cardo puede tener crecimiento de microorganismos como *S. aureus*, *Salmonella*, *Clostridium perfringens*, *Listeria monocytogenes* y *Bacillus cereus* (Real Decreto 135/2010 B.O.E. 25/02/2010). Por este motivo es importante disminuir la humedad y la a_w , hasta valores por debajo de 0,6, que evitan la proliferación de microorganismos.

Al igual que en el cardo, se puede asegurar que no proliferan los microorganismos, porque la actividad de agua en todos los subproductos de alcachofa obtenidos mediante MWD se encontró en valores aproximados de 0,45, disminuyendo a medida que aumentó la potencia de tratamiento como se observa en la tabla 17, al igual que en el caso de la humedad. Mayor potencia permitió disminuir con mayor rapidez y en mayor medida la a_w .

Capacidad antioxidante

Para comprobar que sus propiedades se mantenían, se analizó la concentración de compuestos bioactivos que se conservaron en cada subproducto de alcachofa. En estos subproductos, al igual que en el cardo, se analizaron el contenido de polifenoles totales, la capacidad antioxidante DPPH y FRAP (tabla 18), y el contenido de fibra dietética soluble, insoluble y total.

Tabla 18. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los subproductos de alcachofa deshidratados.

Subproducto	Polifenoles totales (mg/kg ácido gálico)	DPPH (μmol trolox inicial /g producto)	FRAP (μmol TE/mg producto)
CT inicial	13720,57 \pm 14,88 ^b	5,46 \pm 0,11 ^b	680,06 \pm 6,30 ^b
AD 1000-40	2657,84 \pm 26,00 ^a	0,80 \pm 0,01 ^a	61,74 \pm 4,06 ^a
AD 2000-40	2528,33 \pm 20,43 ^a	0,81 \pm 0,01 ^a	106,32 \pm 2,63 ^a
AD 3000-15	2469,82 \pm 26,96 ^a	0,84 \pm 0,01 ^a	172,66 \pm 6,75 ^a
AD 4000-10	2747,35 \pm 23,10 ^a	0,82 \pm 0,01 ^a	164,56 \pm 6,16 ^a

Valor medio \pm desviación estándar. Datos expresados en materia seca. Codificación: Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.05$). CT: control. [Alcachofa deshidratada (AD) - potencia emitida en W - tiempo en minutos].

Todos los tratamientos redujeron considerablemente la capacidad antioxidante con respecto al subproducto control inicial sin tratar. Tal y como ocurre en la presente tesis doctoral, fue demostrado por Luna et al. (2016), aunque estos autores trabajaron con temperaturas de 63°C, 70°C y 75°C, menores a las que se alcanzaron con el tratamiento MWD, que la temperatura afectó significativamente al contenido de polifenoles ya que a medida que aumentó la temperatura existió una mayor degradación de estos en el contenido final.

Comparando los resultados obtenidos de polifenoles totales de los tratamientos MWD sobre residuos de alcachofa no se encontraron diferencias significativas como se aprecia en la tabla 18. Los resultados de polifenoles obtenidos oscilaron entre 2469 y 2747 mg/kg ácido gálico. Para la capacidad antioxidante DPPH en los subproductos de alcachofa tampoco se encontraron diferencias significativas, dando valores entre 0,80 y 0,84 μmol trolox inicial/g producto. En los subproductos de alcachofa, en relación con la capacidad antioxidante FRAP, ocurrió lo mismo que en el caso de los polifenoles y capacidad antioxidante DPPH, no se encontraron diferencias significativas entre el contenido presente en los diferentes tratamientos. En este caso los resultados oscilaron entre 61,74 y 172,66 μmol TE/mg producto. Tal y como muestran los datos de la tabla 18, cuando se utilizó MWD se pudieron obtener subproductos ricos en antioxidantes, como demostró el estudio realizado por Soares et al. (2023), encontrando una cantidad de un polifenol de 72,0 mg/l tras el cocinado por MW doméstico.

Contenido en fibra dietética (FD)

El contenido en fibra dietética soluble (SDF), insoluble (IDF) y total (TDF) en los subproductos de alcachofa deshidratados se muestra en la tabla 19.

En cuanto a la cantidad de TDF en los subproductos de alcachofa se observó que no existían diferencias significativas entre los resultados de los diferentes tratamientos MWD y el control. Datos diferentes a los obtenidos en el caso del cardo.

Tabla 19. Fibra dietética soluble (SDF), insoluble (IDF) y total (TDF) en los subproductos de alcachofa deshidratados.

subproducto	IDF	SDF	TDF
CT inicial	47,06 ± 1,20 ^a	7,26 ± 0,11 ^b	54,32 ± 1,12 ^a
AD 1000-40	38,47 ± 7,87 ^a	2,34 ± 1,20 ^a	40,81 ± 8,51 ^a
AD 2000-40	40,47 ± 1,25 ^a	7,81 ± 1,55 ^b	48,28 ± 2,31 ^a
AD 3000-15	45,97 ± 1,80 ^a	7,35 ± 2,83 ^b	53,32 ± 3,95 ^a
AD 4000-10	43,28 ± 2,87 ^a	3,13 ± 0,74 ^a	46,41 ± 3,11 ^a

Valor medio ± desviación estándar. Datos expresados en g/100g peso de materia seca. Codificación: Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre los tratamientos (P < 0.05). CT: control. [Alcachofa deshidratada (AD) - potencia emitida en W - tiempo en minutos].

Además, como se observa en la tabla 19, también se obtuvo SDF, manteniéndose el contenido respecto al control a medida que aumentó la potencia de tratamiento, excepto con el de mayor y menor potencia que disminuyó. Cuando se utilizó la mayor potencia disminuyó el contenido en SDF porque la temperatura alcanzada provocó la degradación de este compuesto, mientras que disminuyó con el tratamiento de menor potencia porque la potencia utilizada no fue suficiente para provocar la rotura de las células. Ruiz et al. (2016), obtuvieron después del tratamiento MW fibras de los residuos de alcachofa, 11,6 mg/g de muestra seca, menor que en la presente tesis doctoral, porque la temperatura y el tiempo utilizado por estos autores fue inferior al utilizado en este trabajo, 60°C durante 3 minutos.

Al igual que en el presente estudio, en el que se demostró que la tecnología MWD permitió obtener subproductos en menor tiempo que el secado convencional (24 a 48 horas a 60-80°C) (Gascón et al., 2013), conservando en mayor medida la FD y los antioxidantes, en los estudios evaluados en residuos de alcachofa por Yang et al. (2015) y Zayed y Farag (2020) obtuvieron inulina, 5-7g/100g después del secado con MW.

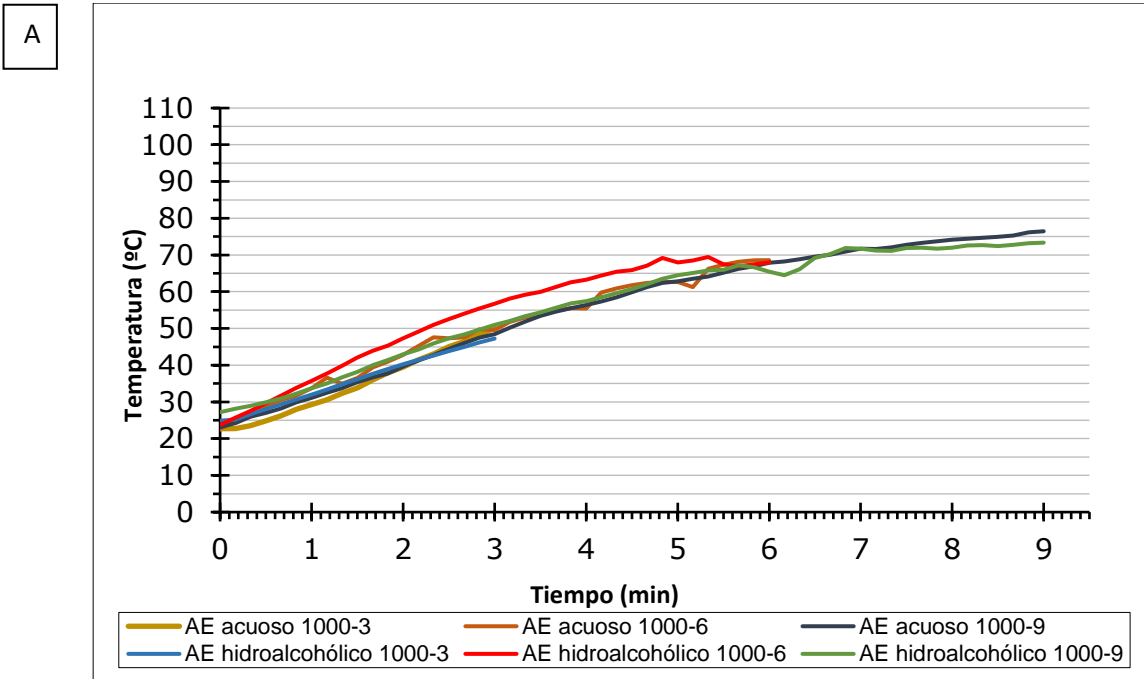
Además, Yang et al. (2015) encontraron que los subproductos de alcachofa obtenidos mediante MW pueden aplicarse como alimento funcional y fuente de ingredientes bioactivos, como la inulina, la fructosa y los antioxidantes.

En estudios actuales, Punia Bangar et al. (2024) concluyeron que el MWD es un método emergente que puede ser altamente prometedor para deshidratar o extraer nuevos productos; siendo una técnica segura y respetuosa con el medio ambiente. Gracias a esta tecnología se puede reducir el tiempo de procesamiento y la dependencia de solventes dañinos mientras se mejoraron los rendimientos. Sin embargo, su aplicación

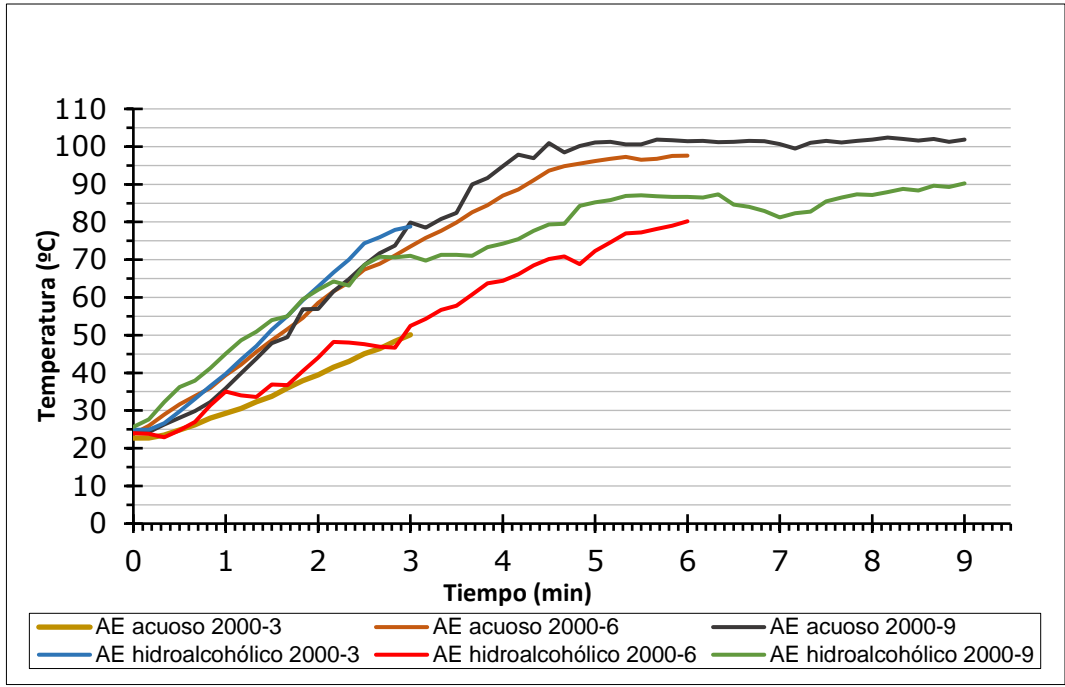
necesita una investigación en profundidad para que esta solución sea rentable y eficiente para su implementación a escala industrial.

1.2.1.2. Extracción asistida por microondas (MWAE)

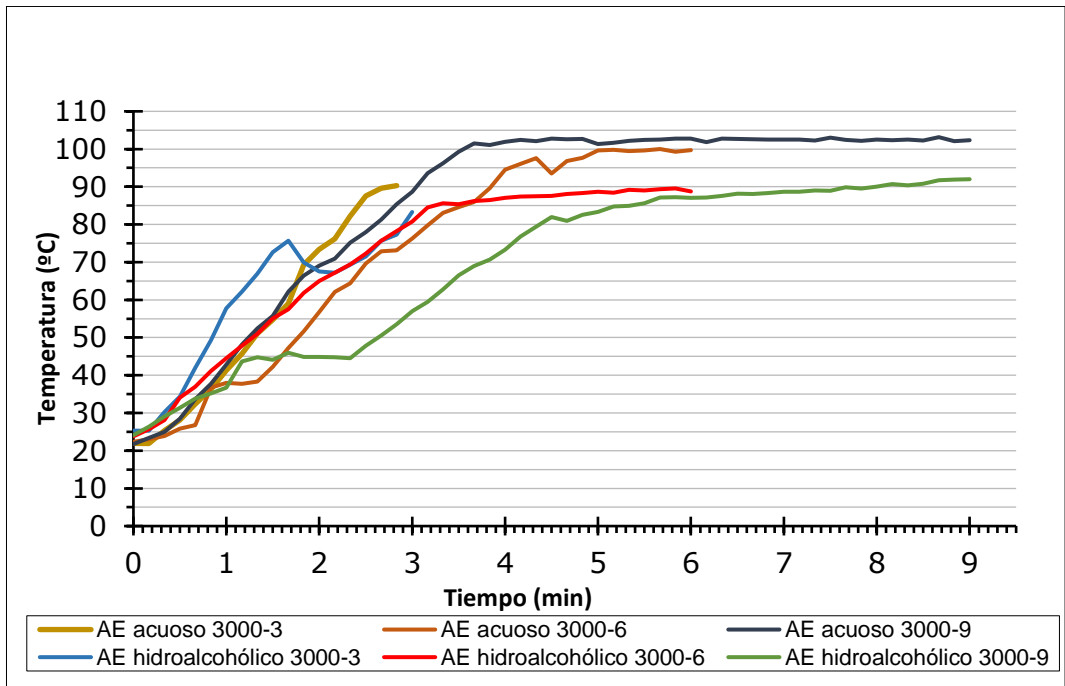
A continuación, se pueden observar los perfiles de temperatura de los extractos acuosos e hidroalcohólicos obtenidos mediante MWAE de los residuos de alcachofa (figuras 27A, 27B, 27C y 27D). En los extractos de alcachofa que se obtuvieron mediante MWAE con 1000W de potencia, figura 30, no se encontraron diferencias entre la temperatura resultante al obtener los extractos acuosos y los hidroalcohólicos, obteniéndose temperaturas entre 47 y 75°C.



B



C



D

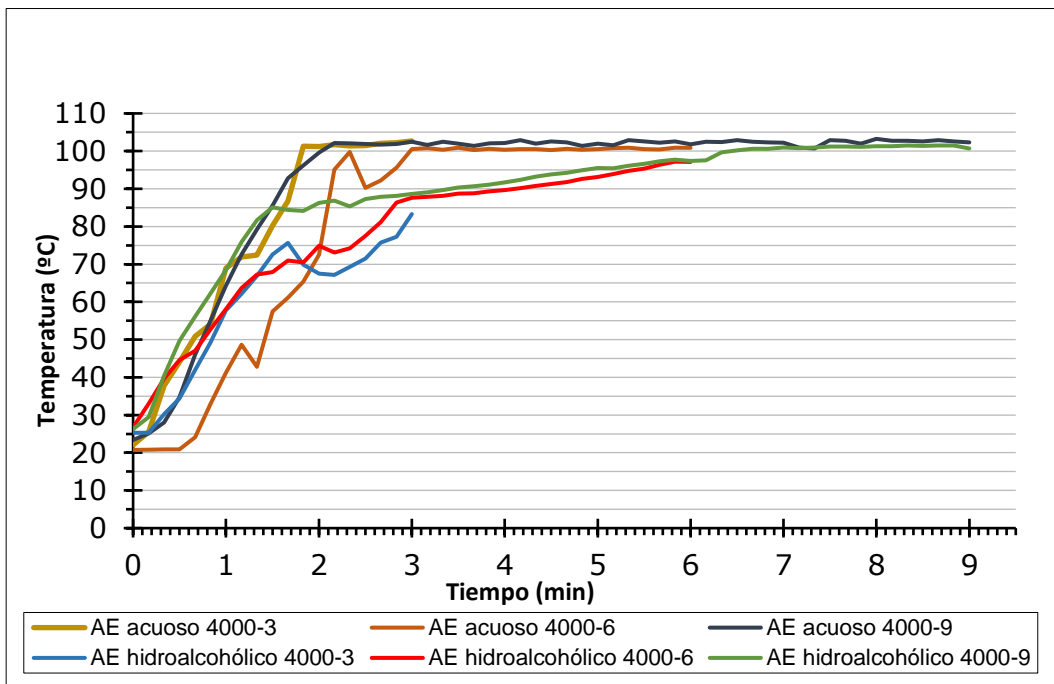


Figura 27. Perfil de temperatura para cada tratamiento de extracción asistida por microondas (MWAE) de residuos de alcachofa. A) 1000W, B) 2000W, C) 3000W y D) 4000W. Leyenda: Alcachofa extracto (AE) – disolvente - potencia emitida en W - tiempo en minutos.

Como se aprecia en las figuras 27B, 27C y 27D, cuando se utilizaron potencias de 2000W, 3000W y 4000W, se apreció que la temperatura fue superior, entre 5 y 20°C, en los tratamientos realizados para la obtención de los extractos acuosos en comparación con los tratamientos en los que se obtuvieron los extractos hidroalcohólicos. Excepto en el tratamiento que se aplicó durante 9 minutos con potencia de 4000W que finalmente se alcanzó la misma temperatura en los dos tipos de extractos. La diferencia de temperatura entre los tratamientos hidroalcohólicos y acuosos de la misma potencia y tiempo osciló entre 20 y 4°C. Tal y como mencionó Cornejo Artiaga (2016) la temperatura de ebullición del etanol es menor que la del agua, con lo cual se evapora antes, explicando lo expuesto anteriormente.

En los tratamientos MWAE con solvente acuoso en la alcachofa las temperaturas alcanzadas oscilaron entre 51,7°C y 102,3°C. La temperatura aumentó a medida que se aumentó la potencia y el tiempo de tratamiento, por lo tanto, la máxima temperatura correspondió al tratamiento de 4000W durante 9 minutos.

Las temperaturas alcanzadas con el tratamiento MWAE en extracto hidroalcohólico de alcachofa oscilaron entre 47,2°C con el tratamiento más suave y 100,7°C con el tratamiento de mayor intensidad.

Al igual que en el estudio realizado por Rudic et al. (2021), el MWAE acortó el tiempo de extracción en comparación con los procedimientos convencionales. Esto ocurrió porque el aumento de la temperatura provocó la ruptura de la célula, y como resultado, una mayor disponibilidad de componentes para ser extraídos en la solución (Marić et al., 2018). Además, a alta temperatura, la viscosidad del disolvente disminuyó, aumentando su movilidad y solubilidad, lo que mejoró la eficacia de la extracción. Es importante añadir que Rudic et al. (2021), llegaron a la conclusión que se aumentó la biodisponibilidad de los compuestos al utilizar como disolvente una mezcla de agua y etanol.

En la tabla 20, se muestran las condiciones de tratamiento y la densidad energética de los tratamientos mediante MWAE para obtener extractos de residuos de alcachofa en los que se obtuvieron mayor contenido en compuestos bioactivos.

Tabla 20. Condiciones de tratamiento y densidad energética aplicada en los diferentes tratamientos mediante extracción asistida por microondas (MWAE) de los residuos de alcachofa.

Tratamiento	Peso (kg)	Tiempo (h)	Potencia emitida	Potencia reflejada	Potencia absorbida	D.E. (W h/kg)
AE acuoso 1000-9	0,56	0,15	1000	742,63	257,37	68,94
AE acuoso 2000-9	0,56	0,15	2000	1167,94	832,06	222,87
AE acuoso 3000-9	0,56	0,15	3000	1388,89	1611,11	431,55
AE acuoso 4000-9	0,56	0,15	4000	1600,03	2399,97	642,85
AE etanólico 1000-9	0,56	0,15	1000	637,89	362,11	96,99
AE etanólico 2000-9	0,56	0,15	2000	1138,63	861,37	230,72
AE etanólico 3000-9	0,56	0,15	3000	1334,29	1665,71	446,17
AE etanólico 4000-9	0,56	0,15	4000	1535,25	2464,75	660,20

[Alcachofa extracto (AE) - disolvente - potencia emitida en W – tiempo en minutos]. D.E.: densidad energética.

La densidad energética fue mayor en los tratamientos para la obtención de extractos hidroalcohólicos que en los tratamientos para obtener extractos acuosos. Los resultados mostrados fueron unos 15 W h/kg mayor en los hidroalcohólicos que en los acuosos, debido a que la mezcla agua-etanol necesitó mayor aporte de energía. Además, a medida que aumentó la potencia durante el mismo tiempo de tratamiento, aumentó la densidad energética, como en el estudio de Bo-Lin et al., (2023) de la liofilización asistida por MW de piña.

Capacidad antioxidante

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de polifenoles totales, capacidad antioxidante DPPH y capacidad antioxidante FRAP, en los extractos acuosos e hidroalcohólicos de residuos de alcachofa obtenidos mediante MWAE (tabla 21).

Tabla 21. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los extractos de alcachofa.

Subproducto	Extracto acuoso			Extracto hidroalcohólico		
	Polifenoles totales (mg/kg ácido gálico)	DPPH (μmol trolox inicial /g producto)	FRAP (μmol TE/mg producto)	Polifenoles totales (mg/kg ácido gálico)	DPPH (μmol trolox inicial /g producto)	FRAP (μmol TE /mg producto)
AE 1000-3	1,90 \pm 0,13 ^a	0,16 \pm 0,00 ^a	4,21 \pm 0,06 ^a	2,45 \pm 0,49 ^a	0,16 \pm 0,00 ^a	5,00 \pm 0,11 ^a
AE 1000-6	6,93 \pm 2,57 ^d	0,16 \pm 0,00 ^{ab}	4,94 \pm 0,27 ^{ab}	4,15 \pm 0,68 ^{ab}	0,18 \pm 0,00 ^b	6,81 \pm 0,62 ^a
AE 1000-9	4,54 \pm 0,36 ^{bc}	0,20 \pm 0,00 ^e	6,44 \pm 0,34 ^{cd}	4,18 \pm 0,40 ^{ab}	0,20 \pm 0,01 ^{cd}	7,54 \pm 0,83 ^a
AE 2000-3	3,41 \pm 0,06 ^{ab}	0,17 \pm 0,00 ^{cd}	5,25 \pm 0,17 ^{abc}	3,36 \pm 0,20 ^{ab}	0,19 \pm 0,00 ^{bc}	5,73 \pm 0,19 ^a
AE 2000-6	5,15 \pm 0,54 ^{bcd}	0,20 \pm 0,00 ^e	6,85 \pm 0,45 ^d	7,29 \pm 0,38 ^{bc}	0,27 \pm 0,00 ^e	8,59 \pm 0,73 ^a
AE 2000-9	11,04 \pm 0,57 ^e	0,23 \pm 0,00 ^f	8,96 \pm 0,68 ^e	11,36 \pm 1,78 ^{cd}	0,39 \pm 0,00 ^g	15,78 \pm 0,98 ^b
AE 3000-3	5,51 \pm 0,55 ^{cd}	0,17 \pm 0,00 ^{bc}	5,58 \pm 0,45 ^{abcd}	4,35 \pm 0,12 ^{ab}	0,21 \pm 0,01 ^d	7,26 \pm 0,49 ^a
AE 3000-6	10,00 \pm 0,97 ^e	0,23 \pm 0,00 ^f	9,07 \pm 0,65 ^e	14,94 \pm 0,59 ^d	0,37 \pm 0,01 ^f	13,36 \pm 0,82 ^b
AE 3000-9	20,88 \pm 1,74 ^f	0,27 \pm 0,00 ^g	14,14 \pm 1,56 ^f	50,89 \pm 5,56 ^f	0,66 \pm 0,01 ⁱ	34,94 \pm 3,48 ^d
AE 4000-3	6,12 \pm 0,88 ^{cd}	0,18 \pm 0,00 ^d	6,22 \pm 0,01 ^{bcd}	6,29 \pm 2,04 ^{bc}	0,26 \pm 0,00 ^e	7,85 \pm 0,67 ^a
AE 4000-6	19,44 \pm 1,13 ^f	0,23 \pm 0,01 ^f	10,24 \pm 1,75 ^e	26,34 \pm 4,59 ^e	0,59 \pm 0,01 ^h	22,45 \pm 3,29 ^c
AE 4000-9	29,48 \pm 1,54 ^g	0,36 \pm 0,01 ^h	19,82 \pm 1,07 ^g	142,15 \pm 4,46 ^g	0,88 \pm 0,02 ^j	49,85 \pm 7,12 ^e

Valor medio \pm desviación estándar. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.05$). [Alcachofa extracto (AE) - potencia emitida en W - tiempo en minutos].

En la tabla 21 se puede observar que el contenido de polifenoles en los extractos de alcachofa fue mayor en los hidroalcohólicos que en los acuosos, al igual que en el cardo estudiado anteriormente. Además, en los dos tipos de extractos, el mayor contenido de polifenoles se encontró en la muestra obtenida de los tratamientos que se utilizaron 4000W de potencia durante 9 minutos, siendo 4,8 veces mayor el contenido de polifenoles en el extracto hidroalcohólico en comparación con el acuoso.

Además, se observa que, excepto al utilizar la potencia de 1000W, el contenido de polifenoles fue aumentando con respecto al tiempo. Esto puede deberse a que la potencia de 1000W no es suficiente para tener un efecto en la rotura de las células de los residuos. A igual tiempo de tratamiento el contenido de polifenoles aumentó al aumentar la potencia. Si comparamos los resultados obtenidos en esta tesis doctoral con otros autores, Mena-García et al. (2020) demostraron que la mayor actividad antioxidante se encontró en los extractos obtenidos con mezclas hidroalcohólicas 50:50 en comparación con el agua, y que los valores de polifenoles totales varió entre 5,91 y 27,21 mg GAE g⁻¹ al utilizar una potencia de MW de 900W y un tiempo de 4 minutos, que se correlacionó directamente con los valores de actividad antioxidante.

Por otro lado, Abd El-Aziz et al. (2021), estudiaron que la concentración de polifenoles totales en extractos de alcachofa hidroalcohólicos fue de $193,63 \pm 2,34$ μg de equivalentes de ácido gálico (GAE)/mg. Sus valores son mayores que los obtenidos en esta tesis doctoral, porque la proporción del solvente (70% etanol/30% agua) fue más elevada en concentración de etanol y además las potencias con las que experimentaron fueron 1400W y 407W.

Además, en la tabla 21, se muestran los resultados que se obtuvieron para la capacidad antioxidante DPPH y FRAP. Mostrando mayor capacidad antioxidante los tratamientos en los que se utilizó un solvente hidroalcohólico y la mayor potencia y tiempo, al igual que en el cardo. La diferencia entre la capacidad antioxidante DPPH del extracto acuoso e hidroalcohólico en el que se utilizaron 4000W de potencia durante 9 minutos fue de 2,4 veces mayor en el hidroalcohólico, mientras que esa diferencia fue de 2,5 veces mayor en el hidroalcohólico para la capacidad antioxidante FRAP. Esto es debido a que con la mayor potencia y tiempo se produjo una mayor rotura de las células sin degradar los antioxidantes. Esto mismo descubrieron Soares et al. (2023), comprobando que el extracto de brácteas de alcachofa exhibió un potencial de actividad antioxidante mediante ensayos DPPH y poder antioxidante reductor férrico (FRAP) de 30,0 mg de equivalentes de Trolox (TE)/g de peso seco, y 231,6 μmol de FeSO_4 equivalente/g de peso seco, respectivamente al cocinar con un MW doméstico. La fuerte actividad antioxidante de ese subproducto de extracto de alcachofa podría atribuirse a su alto contenido polifenólico total, ya que las brácteas internas exhibieron las concentraciones fenólicas más altas (TPC = 10,7 mg GAE/g DW).

También se puede observar como en los polifenoles totales, DPPH y FRAP, a la misma potencia de tratamiento, aumentó la extracción al aumentar el tiempo de tratamiento tanto en los extractos acuosos como hidroalcohólicos, ya que se utilizaron tiempos muy cortos que no destruyeron los compuestos antioxidantes, como en el estudio de Rudic et al. (2021). Estos autores utilizaron MW con potencias entre 100W y 450W para obtener a partir de subproducto seco de alcachofa extractos hidroalcohólicos (etanol del 0 al 75%). Obtuvieron que la actividad antioxidante reductora férrica (FRAP) fue creciendo igual que el contenido en polifenoles mientras que la inhibición de los radicales DPPH no expresó una gran dependencia de la concentración de disolvente.

En los extractos acuosos se pudo observar, en la tabla 21, que las mayores diferencias significativas en cuanto a la capacidad antioxidante se encontraron entre los tratamientos de 3000W y 4000W durante 6 y 9 min con respecto a los demás. Además, el tratamiento de 3000W durante 9 min no mostró diferencias con el tratamiento de 4000W durante 6 minutos, obteniéndose resultados similares. Mientras que en los extractos hidroalcohólicos al observar los resultados obtenidos en esos mismos tratamientos se mostró un aumento de las diferencias significativas a medida que aumentó la potencia y el tiempo de tratamiento.

Además, en la tabla 21, se puede observar cómo en todos los extractos el contenido de antioxidantes aumentó al aumentar la potencia usando el mismo tiempo de tratamiento. En ambos extractos, sobre todo ocurrió al aumentar los tiempos a 6 y 9 minutos, porque en esos tratamientos el aumento de la potencia provocó mayor extracción de compuestos por el aumento de la rotura de las células al haber tenido el tiempo suficiente para actuar sobre esa célula.

En el año 2023 Mohammadi et al. estudiaron la extracción de quitosano a partir de desechos de camarón mediante extracción convencional, y extracción asistida por microondas. Los resultados mostraron que los parámetros del proceso de calentamiento por MWAE afectaban considerablemente a las propiedades fisicoquímicas, al igual que la extracción convencional. Por lo tanto, en el futuro se deben optimizar las condiciones de extracción.

1.2.2. Extracción asistida por pulsos eléctricos de intensidad moderada (PEFAE)

En los subproductos líquidos y sólidos de alcachofa obtenidos mediante PEFAE, se analizó lo mismo que en los subproductos de cardo, polifenoles totales, DPPH y FRAP como puede observarse en las tablas 22 y 23.

- Subproductos líquidos:

Tabla 22. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los subproductos líquidos de alcachofa obtenidos mediante extracción asistida por pulsos eléctricos (PEFAE).

Subproducto	Líquidos		
	Polifenoles totales (mg/kg ácido gálico)	DPPH (μmol trolox inicial /g producto)	FRAP (μmol TE/mg producto)
0,5 kV/cm 10 p	1,39 \pm 0,14 ^b	0,04 \pm 0,00 ^a	1,85 \pm 0,04 ^b
0,5 kV/cm 25 p	2,45 \pm 0,10 ^d	0,05 \pm 0,00 ^a	2,42 \pm 0,16 ^d
1 kV/cm 10 p	1,18 \pm 0,07 ^a	0,04 \pm 0,00 ^a	1,64 \pm 0,03 ^a
1 kV/cm 25 p	1,93 \pm 0,02 ^c	0,05 \pm 0,00 ^a	2,07 \pm 0,04 ^c
2 kV/cm 10 p	1,51 \pm 0,13 ^b	0,05 \pm 0,00 ^a	1,81 \pm 0,05 ^b
2 kV/cm 25 p	2,50 \pm 0,11 ^d	0,05 \pm 0,00 ^a	2,44 \pm 0,07 ^d

Valor medio \pm desviación estándar. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre los tratamientos con Pulsos eléctricos ($P < 0.05$). p: pulsos.

Si comparamos los resultados obtenidos para la capacidad antioxidante DPPH, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos. Sin embargo, para la capacidad antioxidante FRAP y los polifenoles totales se obtuvieron mayores resultados al utilizar 25 pulsos en lugar de 10 pulsos. Cuanto más se aumentó el número de pulsos mayor fue la rotura de la membrana celular, lo que provocó la extracción de los compuestos y su mayor disponibilidad. Sin embargo, el aumento de la intensidad de

campo eléctrico no provocó un aumento en la extracción, como se ha demostrado con esta prueba, Naliyadhara et al. (2022) en diferentes vegetales y frutas, que encontraron que el aumento de la intensidad del campo eléctrico a 2 kV/cm no significó un aumento de la extracción de los compuestos con un mismo número de pulsos.

- Subproductos sólidos:

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la parte sólida de los residuos de alcachofa tratados con PEFAE (tabla 23), estos fueron los que se trataron posteriormente con MWD, como se explica en siguiente apartado.

Tabla 23. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los subproductos de alcachofa obtenidos mediante extracción asistida por pulsos eléctricos (PEFAE).

Subproducto	Sólidos		
	Polifenoles totales (mg/kg ácido gálico)	DPPH (μmol trolox inicial /g producto)	FRAP (μmol TE/mg producto)
0,5 kV/cm 10 p	750,23 \pm 48,99 ^{bc}	5,67 \pm 0,15 ^a	930,92 \pm 50,63 ^a
0,5 kV/cm 25 p	685,95 \pm 52,89 ^{bc}	6,93 \pm 0,09 ^c	1083,63 \pm 93,23 ^b
1 kV/cm 10 p	959,20 \pm 81,20 ^c	6,81 \pm 0,23 ^{bc}	1173,29 \pm 35,05 ^b
1 kV/cm 25 p	613,11 \pm 36,86 ^b	7,09 \pm 0,02 ^c	1082,24 \pm 78,49 ^b
2 kV/cm 10 p	173,27 \pm 11,11 ^a	6,58 \pm 0,29 ^b	1154,98 \pm 23,62 ^b
2 kV/cm 25 p	521,02 \pm 27,98 ^b	7,60 \pm 0,05 ^d	1132,46 \pm 92,37 ^b

Valor medio \pm desviación estándar. Datos expresados en materia seca. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre los tratamientos con Pulsos eléctricos ($P < 0.05$). p: pulsos.

En la tabla anterior, se puede observar que los compuestos de interés se conservaron en la parte sólida de los subproductos obtenidos mediante PEFAE, con valores muy superiores a los presentados en la tabla 22. Esto es debido a que los PEAE no tuvieron el efecto suficiente con los tratamientos aplicados para la extracción de los compuestos.

Para la concentración de polifenoles totales, en la tabla 23, se mostraron diferencias significativas en el tratamiento de 2 kV/cm y 10 pulsos, que mostró el menor resultado. El tratamiento que mayor resultado ofreció fue el de 1 kV/cm y 10 pulsos, aunque no se observaron diferencias significativas con los tratamientos de 0,5 kV/cm. Lo comentado anteriormente pudo ser debido a que 2 kV/cm es una intensidad de pulso que permitió la extracción de los polifenoles, no conservándose en la parte sólida.

Sin embargo, en la tabla 23, para la capacidad antioxidante DPPH, las diferencias significativas se vieron entre el tratamiento de 0,5 kV/cm 10p, con el menor valor, y 2 kV/cm y 25p, que tuvo el mayor resultado, sin observarse diferencias entre los demás. Por otro lado, para la capacidad antioxidante FRAP, las diferencias sólo se encontraron entre el tratamiento de menor intensidad y el resto de tratamientos. Esto indicó que el poder antioxidante férrico reductor no se destruyó ni permitió su extracción con las

intensidades de campo eléctrico estudiadas en esta tesis doctoral. Con lo cual, se puede concluir que para los tratamientos PEFAE en los subproductos de alcachofa, se obtuvieron teniendo en cuenta el tiempo corto y baja intensidad de pulso, mayores valores de polifenoles y capacidad antioxidante en los tratamientos donde se aplicaron 1 kV/cm y 10 p de PEFAE, con valores de 959,2 mg/kg ácido gálico para los polifenoles, 7,09 μmol trolox inicial /g producto para la capacidad antioxidante DPPH y 1173,3 μmol TE/mg producto para capacidad antioxidante FRAP. Al igual que en el estudio de Naliyadhara et al. (2022) en frutas y verduras, que con 2 kV/cm se aumentó la extracción de compuestos y por ese motivo no se mantuvieron en la parte sólida.

Calleja Gomez et al. (2024) llegaron a la conclusión de que la PEFAE es una tecnología no térmica útil para la recuperación sostenible de compuestos de alto valor añadido, de acuerdo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Esta tecnología es respetuosa con el medio ambiente, permite obtener mayores rendimientos, calidad y pureza de los extractos recuperados.

Las tendencias futuras y las perspectivas industriales deberían abarcar la mejora de la eficiencia y de las condiciones operativas, desarrollando un enfoque de escalado adecuado en la industria alimentaria que cubra las dimensiones económica, social y medioambiental de la sostenibilidad. Uno de los ejemplos en los que ya se ha implementado a nivel industrial es a baja intensidad (1 kV/cm) como pretratamiento en la producción de patatas fritas. En esta línea, la calidad del producto obtenido mejoró al reducirse la pérdida de almidón durante el corte, disminuir el contenido en lípidos durante la fritura del 7,5 al 6,8%. Por tanto, se obtiene un producto con beneficios para la salud superiores a los obtenidos por tratamiento térmico con un gran ahorro energético y económico. La reducción de pérdida de almidón y materia seca gracias a la beneficiosa aplicación de la tecnología PEF afectó incluso al rendimiento de la producción de patatas fritas, considerando capacidades de producción diarias de hasta 100 toneladas al día. También se observó una reducción de la acrilamida durante el proceso de fritura después del pretratamiento.

Aunque la tecnología PEFAE pueden utilizarse para mejorar el proceso de secado, congelación o fritura, cabe señalar que su principal aplicación a nivel industrial se centra en aumentar la eficiencia de la extracción de compuestos específicos a partir de diferentes matrices, esforzándose en aumentar la transferencia de masa y disminuir la degradación de compuestos termosensibles. Sin embargo, también hay que subrayar que el uso de esta tecnología puede repercutir negativamente en la sostenibilidad si se utilizan de forma inadecuada. Por ejemplo, el uso inadecuado de la PEFAE puede dañar la estructura celular, alterar la calidad de los alimentos y aumentar los requisitos energéticos si no se utilizan el campo eléctrico y las condiciones energéticas específicas adecuadas, con repercusiones negativas para el medio ambiente (Calleja Gomez et al.; 2024).

1.2.3. Combinación de las dos tecnologías (PEFAE y MWD)

En los subproductos de alcachofa obtenidos mediante la combinación del tratamiento PEFAE con MWD, 1kV/cm 10p 4000W 10min, se analizó la a_w , dando un valor de 0,4565 y la humedad con un valor de 0,84%. El resultado de antioxidantes cuando se combinaron estas dos tecnologías (1kV/cm 10p 4000W 10 min) fue de 1113,96 mg/kg ácido gálico para fenoles totales, 0,81 μmol trolox inicial /g producto para DPPH y 181,49 μmol TE /mg producto para FRAP. En la combinación de tratamientos con PEFAE y MWD se obtuvo mayor cantidad de polifenoles, pero menor capacidad antioxidante que utilizando sólo PEFAE.

Cuando se compararon los tratamientos de MWD (tabla 18) y PEFAE (tablas 22 y 23) seleccionados, con la combinación de los dos en los subproductos de alcachofa, se observó que la tecnología que ayudó a una mayor conservación de polifenoles totales fue MWD, tanto combinada con PEFAE como por ella misma. Aunque se obtuvo el doble de polifenoles cuando sólo se utilizó MWD porque no se extrajo el compuesto del residuo al solvente, sino que permaneció en el subproducto seco. Se obtuvieron con el MWD resultados 2,8 veces mayor que con los PEFAE y 2,4 veces mayor que con la combinación de tratamientos.

Además, el contenido de antioxidantes fue mayor en los tratamientos MWAE (tabla 21) en comparación con los líquidos obtenido con PEFAE (tabla 22), porque MWAE tuvo mayor capacidad para la extracción de los compuestos. Sin embargo, al evaluar la capacidad antioxidante DPPH y FRAP de los subproductos sólidos, se conservaron en los tratamientos en los que se utilizó sólo PEFAE. Para la capacidad antioxidante DPPH fue 6 μmol trolox inicial /g producto mayor con respecto a la MWD y la combinación de MWD y PEFAE, mientras que para la capacidad antioxidante FRAP fue 1000 μmol TE/mg producto mayor con respecto a MWD y 992 μmol TE/mg producto con respecto a la combinación de las dos tecnologías. Al igual que en el estudio de Esparza-Martínez et al. (2016) en el zumo de mandarina, lo mencionado anteriormente pudo ser debido a que los polifenoles son más resistentes a la temperatura que los antioxidantes que se analizaron con DPPH y FRAP.

Por tanto, teniendo en cuenta el contenido de los compuestos y el tiempo de tratamiento, sólo aplicando MWD se muestran las mejores características para aplicarse en una industria alimentaria.

Nandhu Lal et al. (2021) estudió la obtención de pectina de los desechos de yaca mediante la combinación de PEFAE y MWAE, mostrando una mayor extracción de pectina (hasta un 18.24%) y un menor uso de energía (hasta 0.0986 kW-h) comparado con el método convencional.

1.3. Subproductos obtenidos de residuos de champiñón

Los residuos de champiñón descritos en el apartado 1 de Materiales y Métodos, fueron expuestos a MW para su deshidratación y para la obtención de extractos. Además, fueron sometidos a PEFAE, a la combinación de ambas tecnologías (PEFAE y MWD) y por último fueron tratados por USAE.

1.3.1. Efectos de los tratamientos con microondas (MW)

1.3.1.1. Deshidratación (MWD)

Gracias a la temperatura alcanzada por el producto durante el tratamiento MWD se pudieron deshidratar los residuos de champiñón. En la figura 28 se muestra la temperatura máxima que se alcanzó en cada tratamiento, así como el tiempo que tardó en alcanzarse esa temperatura. En el tratamiento con la potencia de 1000W la temperatura que se alcanzó fue de 95,1°C en 3,5 minutos, mientras que para los demás tratamientos se superaron los 120°C. Por ejemplo, en el tratamiento de 2000W se alcanzaron 121°C en 6,5 minutos, en el de 3000W se alcanzaron 124°C en 5,1 minutos, y en el de 4000W se alcanzaron 123,2°C en 3,6 minutos. En definitiva, cuanto mayor fue la potencia menor tiempo se necesitó para secar el residuo, tal y como demostró Maupoey et al., 2001 en su trabajo sobre secado de alimentos mediante aire caliente.

Cuando se utilizaron 1000W y 4000W para deshidratar la temperatura máxima se alcanzó en un corto periodo de tiempo, 3,5 minutos. Ello fue debido a que la temperatura alcanzada con 1000W fue menor que en resto de casos, mientras que con la potencia máxima, de 4000W, se redujo el tiempo, aunque la temperatura máxima alcanzada fue la más alta. Si los comparamos con el tratamiento en el que mayor tiempo se necesitó para alcanzar la temperatura máxima, el de 2000W, el tiempo en ese tratamiento fue un 50% mayor, entre 2 y 3 minutos mayor que en el resto de tratamientos.

En los tratamientos MWD de los residuos de champiñón la subida de temperatura no mostró fluctuaciones, sino que aumentó gradualmente hasta alcanzar la máxima temperatura, figura 28.

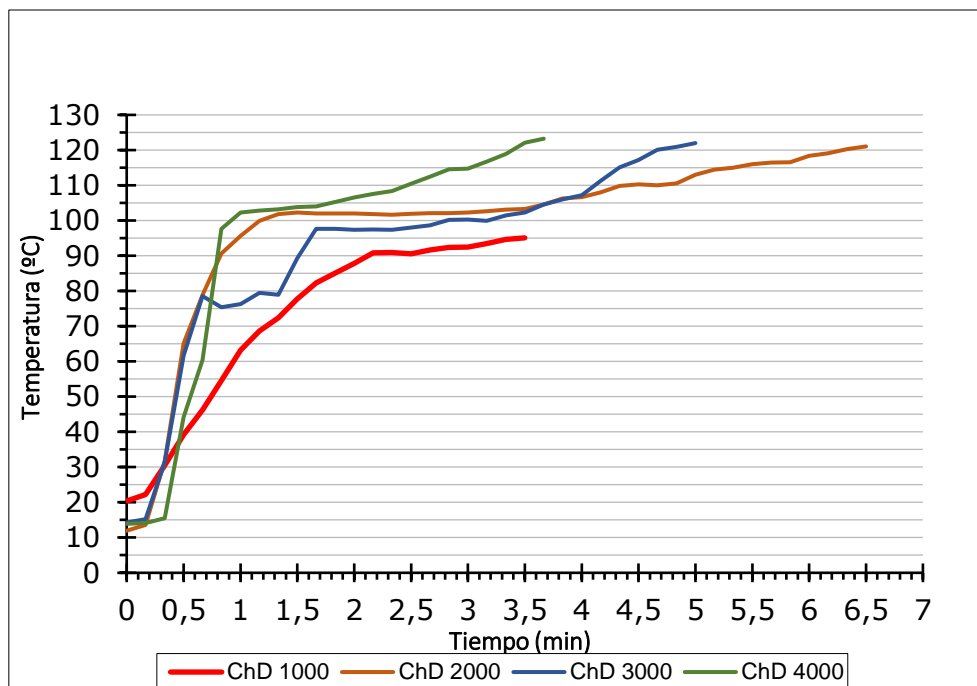


Figura 28. Perfil de temperatura durante los tratamientos de deshidratado mediante microondas (MWD) de residuos champiñón. Leyenda: Champiñón deshidratado (ChD) - potencia emitida en W.

Para deshidratar las migas de champiñón por debajo del 5% de humedad, aconsejada para la deshidratación de alimentos como expuso Gascón et al., 2013, se realizaron varias pruebas, utilizando diferentes potencias y tiempos. Las condiciones de tratamiento y los resultados de densidad energética obtenidos después de la deshidratación de migas de champiñón mediante MWD se muestran en la tabla 24.

Tabla 24. Condiciones de tratamiento y densidad energética aplicada en los diferentes tratamientos de deshidratado mediante microondas (MWD) para deshidratar los residuos de champiñón.

Tratamiento	Peso (kg)	Tiempo (h)	Potencia emitida	Potencia reflejada	Potencia absorbida	D.E. (W h/kg)
ChD 1000-40	0,166	0,67	1000	714,47	285,53	1145,24
ChD 2000-30	0,167	0,50	2000	1488,19	511,81	1524,60
ChD 3000-15	0,164	0,25	3000	1762,10	1237,90	1878,23
ChD 4000-10	0,165	0,17	4000	2121,08	1878,92	1889,20

[Champiñón deshidratado (ChD) - potencia emitida en W – tiempo en minutos]. D.E.: densidad energética.

Durante los tratamientos MWD de las migas de champiñón, como se muestra en la tabla 24, la densidad energética aumentó a medida que aumentó la potencia del tratamiento microondas, disminuyendo el tiempo del tratamiento de secado. Bo-Lin et al. (2023) en su estudio en piña, relacionó la DE directamente con la potencia y el tiempo. En el tratamiento con 1000W de potencia se obtuvo una densidad energética de 1145W h/kg

y en el de 2000W valores de 1524W h/kg. También se pudo comprobar que con las potencias de 3000W y 4000W se obtuvieron valores de densidad energética similares, 1880W h/kg, debido a que el tiempo se redujo al aumentar la potencia. Al igual que en la presente tesis doctoral, Cuvertino Calderón (2004) mostraron que, a medida que la humedad del aire disminuyó en tratamientos de secado el gasto energético del proceso se redujo.

Teniendo en cuenta el tiempo y la densidad energética el tratamiento que mejor resultado mostró fue el de 4000W de potencia, porque con esta potencia se utilizaron 10 minutos de tiempo de deshidratado y la densidad energética fue similar al tratamiento de 3000W y poco mayor, entre 360 y 740W h/kg, que en los otros dos tratamientos.

Humedad

En la figura 29 se muestra la evolución de la humedad de los subproductos de champiñón durante los diferentes tratamientos con MWD. En el tratamiento de 1000W de potencia durante 40 minutos se tomaron muestras para calcular la humedad a los 5, 15, 30 y 40 minutos, en el de 2000W 30 minutos a los 5, 15 y 30 minutos, en el de 3000W 15 minutos a los 2, 5, 10 y 15 minutos y en el de 4000W 10 minutos a los 2, 5, 7 y 10 minutos.

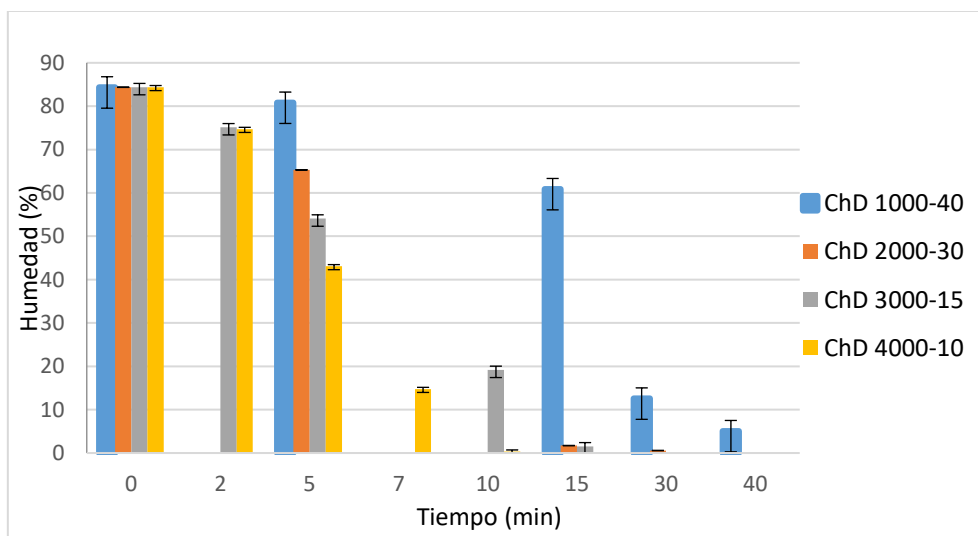


Figura 29. Evolución de la humedad para cada tratamiento de deshidratado mediante microondas (MWD) de las migas de champiñón. Leyenda: Champiñón deshidratado (ChD) - potencia emitida en W - tiempo en minutos.

Como se observa en la figura 29, la humedad inicial de las migas de champiñón fue de 84,4%, reduciéndose con todos los tratamientos por debajo del 5%, nivel que inhibe el

crecimiento microbiano y que es adecuado para los alimentos deshidratados (Gascón et al., 2013). Esa reducción de la humedad al final del tratamiento osciló entre un 5,1 y un 0,3%, en función del tiempo y de la potencia que se empleó en cada tratamiento. Con la menor potencia de tratamiento se consiguió reducir la humedad hasta un 5,1% en 40 minutos, mientras que con la de 2000W se consiguió una reducción hasta el 1% en 30 minutos, y con la de 3000W hasta un 1,5% en 15 minutos, y con la de 4000W se logró un 0,3% de humedad en 10 minutos.

Los tratamientos más largos se descartaron por las mismas razones que en los subproductos anteriores, en la industria alimentaria se busca que el tiempo sea el menor posible. Además, al utilizar tiempos cortos de procesado se conservaron en mayor medida los compuestos bioactivos como demostró Esparza-Martínez et al. (2016). Por este motivo se seleccionaron como los tratamientos óptimos los que tuvieron una duración entre 15 y 10 minutos.

Color

Como se observa en la figura 30, todos los tratamientos MWD fueron eficaces para conseguir secar la muestra sin llegar a carbonizarla. Todos los subproductos de champiñón presentaron un color marrón por el pardeamiento enzimático que se produjo durante el proceso. Además, se puede ver que cuando se usaron 4000W de potencia durante menos tiempo se consiguió mantener el color de la muestra menos oscuro que con los otros tratamientos. Ello se hizo patente con los resultados de medida instrumental de color recogidos en la tabla 25.

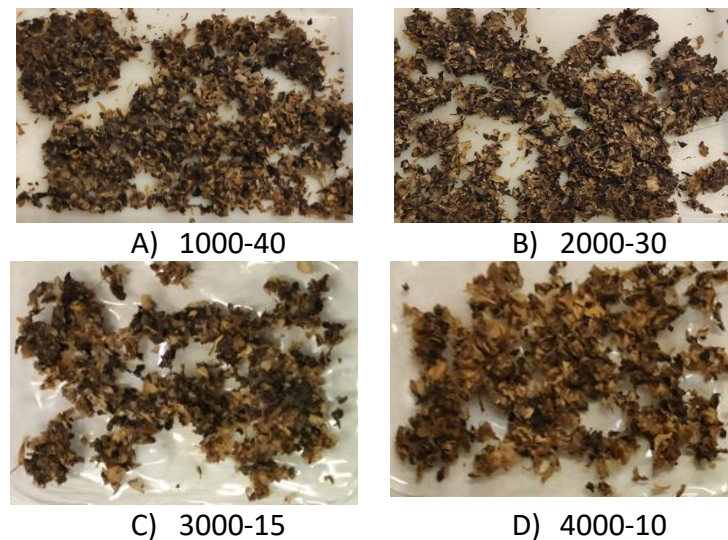


Figura 30. Aspecto de los subproductos de champiñón después de los tratamientos de deshidratado mediante microondas (MWD). Legenda: Potencia emitida en W - tiempo en minutos.

Tabla 25. Parámetros de color de los subproductos de champiñón deshidratados.

Subproducto	L*	a*	b*	C	h	ΔE
CT inicial	46,00 \pm 0,46 ^b	4,19 \pm 0,07 ^b	13,39 \pm 0,16 ^a	98,00 \pm 2,81 ^a	1,27 \pm 0,00 ^a	-
ChD 1000-40	44,98 \pm 1,54 ^a	3,89 \pm 0,16 ^a	14,37 \pm 0,58 ^b	110,96 \pm 8,43 ^b	1,31 \pm 0,01 ^b	2,27 \pm 0,01 ^a
ChD 2000-30	45,43 \pm 0,55 ^a	3,79 \pm 0,12 ^a	16,01 \pm 0,37 ^c	135,37 \pm 6,33 ^c	1,34 \pm 0,00 ^c	3,65 \pm 0,01 ^a
ChD 3000-15	46,72 \pm 0,82 ^b	4,25 \pm 0,15 ^b	15,60 \pm 0,49 ^d	130,84 \pm 8,10 ^c	1,31 \pm 0,01 ^b	3,13 \pm 0,01 ^a
ChD 4000-10	48,67 \pm 0,84 ^c	4,46 \pm 0,14 ^c	16,78 \pm 0,34 ^e	150,77 \pm 6,00 ^d	1,31 \pm 0,01 ^b	9,71 \pm 0,01 ^b

Valor medio \pm desviación estándar. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.05$). CT: control. [Champiñón deshidratado (ChD) - potencia emitida en W - tiempo en minutos]. L*: luminosidad (L=0 rendimientos negro y L=100 indica blanca). a*: posición entre magenta y verde (+a= magenta, frente a -a= verde). b*: posición entre amarillo y azul (+b = amarillo frente a -b= azules). ΔE : diferencia de color. C: croma. h: tono.

En la tabla 25 se muestra que el valor de L*, luminosidad, y el valor de a* del subproducto control (CT inicial) no mostraron diferencias significativas con los subproductos de migas de champiñón obtenidos con 3000W de potencia. Sin embargo, L* y a* disminuyeron al aumentar el tiempo de tratamiento, pero aumentaron al aumentar la potencia y disminuir el tiempo de tratamiento. Si se observa el valor b*, las migas de champiñón tendieron a un color amarillo, aumentando a medida que se incrementaba la potencia del tratamiento. Esto indica que con la deshidratación se intensificó el color del subproducto, mostrando el color marrón oscuro característico del pardeamiento, no como el control que era marrón claro.

El croma, C mostrado en la tabla 25, aumentó a medida que aumentó la potencia de tratamiento, siendo similar entre los tratamientos con potencia de 2000W y 3000W. Sin embargo, el tono (h) fue similar en los tratamientos de 1000W, 3000W y 4000W,

observándose sólo diferencias entre el subproducto control y el subproducto que se obtuvo con el tratamiento MWD 2000W, aunque la diferencia fue mínima, de 1,31 a 1,34, diferencia que no se nota a simple vista. La diferencia de color (ΔE) frente al subproducto control mostró una mayor diferencia con el tratamiento de 4000W. En el estudio de Barron-García et al. (2022), se obtuvieron las mismas tendencias de color que lo mostrado en este apartado, L^* disminuyó, mientras que a^* y h se mantuvieron similares y b^* aumentó ligeramente con el aumento de la temperatura, todo ello provocado por el pardeamiento.

Teniendo en cuenta la humedad del producto, el tiempo y la densidad energética de los tratamientos, se decidió que las variables con las que se obtuvo el resultado deseado fueron las siguientes: 3000W durante 15 minutos y 4000W durante 10 minutos.

Actividad de agua

Otro dato que se tuvo en cuenta en los subproductos de champiñón es la a_w , recogida en la tabla 26:

Tabla 26 . Actividad de agua en los subproductos de champiñón deshidratados.

Subproducto	a_w
CT inicial	0,9821 \pm 0,02
ChD 1000-40	0,456 \pm 0,01
ChD 2000-30	0,4569 \pm 0,01
ChD 3000-15	0,4565 \pm 0,00
ChD 4000-10	0,4529 \pm 0,00

Valor medio \pm desviación estándar. Los datos del control inicial (CT inicial) y de los tratamientos microondas se presentan en actividad de agua (a_w) que no tiene unidades. [Champiñón deshidratado (ChD) - potencia emitida en W - tiempo en minutos].

En el champiñón el pH fue 7,3, un pH básico que favorece el crecimiento microbiano si no se controla la humedad y la a_w . Este producto, procedente de la industria conservera puede contener bacterias *Aerobios Mesófilos*, *Anaerobios Mesófilos*, *Clostridium* y *sulfito reductores* (Real Decreto 135/2010 B.O.E. 25/02/2010).

La a_w de los subproductos de champiñón osciló entre el 0,45 en los subproductos y el 0,98 en el control, reduciéndose un 50%, y por tanto inhibiendo el crecimiento microbiano. Se consiguió la misma a_w en un menor tiempo con mayor potencia, y en mayor tiempo utilizando menores potencias. Aunque el menor contenido de a_w se obtuvo con el tratamiento de 4000W.

A continuación, se muestran el contenido de los diferentes compuestos de interés en todos los subproductos de champiñón deshidratados, y su evolución con respecto al tiempo y la potencia de tratamiento. Los compuestos de interés analizados fueron: los

polifenoles y la capacidad antioxidante, la fibra dietética soluble, insoluble, total, la proteína y los betaglucanos.

Capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante se comprobó con tres métodos analíticos, polifenoles totales, ensayo DPPH que muestra la capacidad antioxidante frente a radicales y FRAP que muestra el poder antioxidante en la transferencia de electrones, obteniéndose los resultados que se recogen en la tabla 27.

Tabla 27. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los subproductos de champiñón deshidratados.

Subproducto	Polifenoles totales (mg/kg ácido gálico)	DPPH (μmol trolox inicial /g producto)	FRAP (μmol TE/mg producto)
CT inicial	1171,64 \pm 49,87 ^b	6,02 \pm 0,15 ^b	438,89 \pm 19,62 ^b
ChD 1000-40	247,95 \pm 40,16 ^a	0,93 \pm 0,01 ^a	75,77 \pm 4,38 ^a
ChD 2000-30	250,39 \pm 41,13 ^a	0,87 \pm 0,01 ^a	70,34 \pm 6,04 ^a
ChD 3000-15	280,48 \pm 9,26 ^a	0,86 \pm 0,01 ^a	80,88 \pm 5,04 ^a
ChD 4000-10	282,53 \pm 15,43 ^a	0,84 \pm 0,02 ^a	84,49 \pm 2,73 ^a

Valor medio \pm desviación estándar. Datos expresados en materia seca. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.05$). CT: control. [Champiñón deshidratado (ChD) - potencia emitida en W - tiempo en minutos].

Para los polifenoles, como se muestra en la tabla 27, en los subproductos de champiñón no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos MWD, mientras que con el subproducto control (CT inicial) sin tratar sí que las hubo porque los polifenoles se degradan con el aumento de temperatura tal como demostraron Acevedo Alzate et al. (2017). Por este motivo, el tratamiento óptimo se consideró en el que se utilizó la potencia de 4000W y menor tiempo. La cantidad de polifenoles que se obtuvo osciló entre 247,95 y 282,53 mg/kg ácido gálico. En la capacidad antioxidante DPPH ocurrió lo mismo que en los polifenoles, no encontrándose diferencias significativas entre los tratamientos, pero sí con el subproducto control. En el control se encontró una cantidad de 6,02 μmol trolox inicial/g producto, mientras que tras aplicar los tratamientos la cantidad osciló entre 0,84 y 0,93 μmol trolox inicial/g producto, un 85% menor que en el control. Al igual que en esta tesis doctoral, Xiaokang et al. (2020) obtuvieron que los valores de DPPH en subproductos de hongos disminuyeron cuando la potencia de las microondas aumentó de 200W a 600W.

Sepúlveda y Zapata (2018) encontraron que el aumento de la temperatura provocó la degradación térmica de los compuestos de interés de extractos de *Bixa orellana* L., al igual que lo expuesto anteriormente en este trabajo.

Además, en la tabla 27 se muestran los resultados para la capacidad antioxidante FRAP. Como en los subproductos anteriores, el resultado más alto se obtuvo en el control con 438,89 $\mu\text{mol/ml}$. Si comparamos los resultados obtenidos de los tratamientos MWD, que variaron entre 70,34 y 84,49 $\mu\text{mol TE/mg}$ producto, no se encontraron diferencias significativas.

Con los resultados comentados anteriormente, se puede afirmar que a medida que aumentó la potencia de la MWD disminuyó el tiempo de tratamiento y aumentó la temperatura, como ocurre en el estudio de Xiaokang et al. (2020), aunque obtuvieron valores menores dado que las potencias utilizadas eran menores (200W, 300W, 400W, 500W y 600W).

Contenido en Beta glucanos

El contenido de beta glucanos de cada subproducto es importante porque los champiñones son ricos en esos compuestos de interés (Chakraborty et al., 2019). En la tabla 28 se recoge el contenido de beta glucanos de las migas de champiñón.

Tabla 28. Beta glucanos en los subproductos de champiñón deshidratados.

Subproducto	%
CT inicial	283,03 \pm 48,26 ^c
ChD 1000-40	50,81 \pm 12,80 ^b
ChD 2000-30	39,23 \pm 7,71 ^a
ChD 3000-15	42,22 \pm 0,83 ^a
ChD 4000-10	43,15 \pm 0,87 ^a

Valor medio \pm desviación estándar. Datos expresados en materia seca. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.05$). CT: control. [Champiñón deshidratado (ChD) - potencia emitida en W – tiempo en minutos].

Para el contenido de beta glucanos en los subproductos de champiñón deshidratados existieron diferencias significativas entre el subproducto control y todos los subproductos obtenidos mediante los tratamientos MWD. Además, esas diferencias se mostraron entre el tratamiento con la menor potencia y el resto de tratamientos, obteniéndose el mayor contenido de beta glucanos con 1000W de potencia. Esto mismo se observó en el estudio realizado por Kit Leong et al. (2021) donde llegaron a la conclusión que una potencia de MW excesivamente alta reduce el rendimiento de extracción de polisacáridos, al igual que se muestra en la tabla 28, porque estos compuestos son termolábiles. Kit Leong et al. (2021) estudiaron el efecto de potencia de 500W y 850W en un MW doméstico en diferentes tipos de hongos sin incluir el champiñón pero, aunque no incluyeron el champiñón, la tendencia era la misma, menor contenido de beta glucanos con el aumento de la temperatura.

Contenido en proteínas

Los champiñones son ricos en proteínas, por eso es muy interesante cuantificarlos y comprobar si se conservaron después de la MWD (Qin et al., 2022). El contenido de proteínas en los subproductos de champiñón muestran en la tabla 29.

Tabla 29. Proteínas en los subproductos de champiñón deshidratados.

Subproducto	% proteína bruta
CT inicial	517,23 ± 2,35 ^c
ChD 1000-40	43,83 ± 0,96 ^b
ChD 2000-30	38,03 ± 0,84 ^a
ChD 3000-15	37,91 ± 0,36 ^a
ChD 4000-10	37,14 ± 0,15 ^a

Valor medio ± desviación estándar. Datos expresados en materia seca. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.05$). CT: control. [Champiñón deshidratado (ChD) - potencia emitida en W – tiempo en minutos].

Los resultados que se obtuvieron al analizar las proteínas de los subproductos de champiñón deshidratados mostraron como disminuyó su contenido al aumentar la potencia, ya que el aumento de la temperatura provocó probablemente su desnaturalización. Por este motivo, el tratamiento con el que mejor se conservó el contenido en proteínas fue el de 1000W de potencia. En el estudio de Qin et al. (2022), en el que utilizó MWAE a sólo 150W, se observó que, al aumentar la potencia de las MW aumentó la temperatura y la velocidad de calentamiento, que promovió la rápida liberación de aminoácidos de la muestra, moléculas que se combinan para formar proteínas, y el aumento de la velocidad de extracción. Sin embargo, cuando se aumentó en exceso la temperatura (más de 70°C), estos aminoácidos perdieron su estructura, tal y como ha podido suceder en este caso, al disminuir el contenido de proteínas.

Contenido en fibra dietética (FD)

Los resultados de fibra dietética soluble (SDF), insoluble (IDF) y total (TDF) de los análisis que se realizaron en los subproductos de champiñón se muestran en la tabla 30.

En el caso de la IDF y TDF en los subproductos de champiñón, disminuyó su concentración respecto al control con todos los tratamientos, entre un 25 y un 10%, sobre todo cuando se utilizó 4000W de potencia, observándose valores de entre un 43 y un 56% de IDF. Gil-Ramírez et al. (2019) utilizando 850W de potencia MW y solvente, también obtuvieron valores similares a los que se muestran en la tabla 30, al utilizar tratamientos en los que la temperatura alcanzada fue mayor de 100°C. En ese estudio, los valores que fueron similares a los de la tabla 30, fueron los correspondientes a las

setas: *Craterellus cornucopioides* que contenía un 40,3%, *Amanita caesarea*, *Agrocybe aegerita* o *Hypsizygus marmoreus* que contenían entre un 63,6 y un 68,2%. Con lo cual, parte de la IDF resistió las temperaturas alcanzadas durante los tratamientos de deshidratación.

Tabla 30. Fibra dietética soluble (SDF), insoluble (IDF) y total (TDF) en los subproductos de champiñón deshidratados.

Subproducto	Insoluble (IDF)	Soluble (SDF)	Total (TDF)
CT inicial	67,75 ± 2,41 ^b	2,30 ± 0,45 ^a	70,05 ± 2,60 ^b
ChD 1000-40	46,18 ± 4,95 ^a	5,08 ± 2,62 ^a	51,26 ± 4,07 ^a
ChD 2000-30	56,50 ± 3,40 ^{ab}	3,76 ± 0,81 ^a	60,27 ± 4,08 ^{ab}
ChD 3000-15	56,79 ± 1,00 ^{ab}	3,12 ± 0,49 ^a	59,91 ± 0,80 ^{ab}
ChD 4000-10	43,75 ± 9,53 ^a	1,79 ± 0,51 ^a	45,55 ± 9,77 ^a

Valor medio ± desviación estándar. Datos expresados en g/100g de materia seca. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre los tratamientos ($P < 0.05$). CT: control. [Champiñón deshidratado (ChD) - potencia emitida en W - tiempo en minutos].

Como se muestra en la tabla 30, también se obtuvo SDF, no mostrándose diferencias significativas ni con el control ni entre tratamientos.

Además, Qin et al. (2022), mostraron que con la MWD no solo se pudo extraer eficazmente los aminoácidos libres de los residuos de hongos, sino que también mostró una excelente eficiencia de extracción para las fibras. La extracción de estas aumentó con el tiempo de exposición a las MW, pero a potencias bajas, ya que si aumentó mucho la temperatura estos polisacáridos no se detectaron al perderse la estructura.

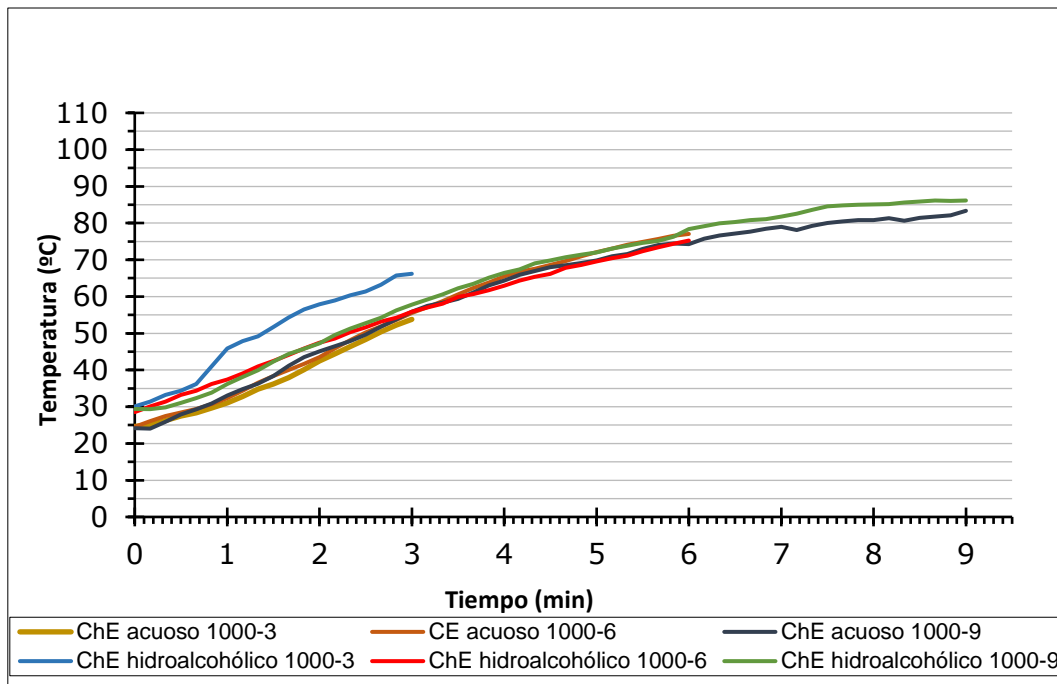
Todo lo expuesto anteriormente, coincide con el estudio de Gong et al. (2020), en el que encontraron en su revisión que mediante el uso de MW a 250W y con solvente, se pudieron revalorizar los residuos de champiñón, obteniéndose ingredientes ricos en compuestos de interés como fibras.

En un estudio reciente, Gallego García et al. (2023) concluyeron que en pocas investigaciones se calculan los datos de consumo de energía en el conjunto del proceso de producción, importante para conocer si es un proceso que se pueda implantar a nivel industrial. Por otro lado, estos equipos son complejos de usar lo que plantea algunas dudas sobre su ampliación para su uso en industrias con altos volúmenes de producción. Por ello hay que seguir investigando esta tecnología.

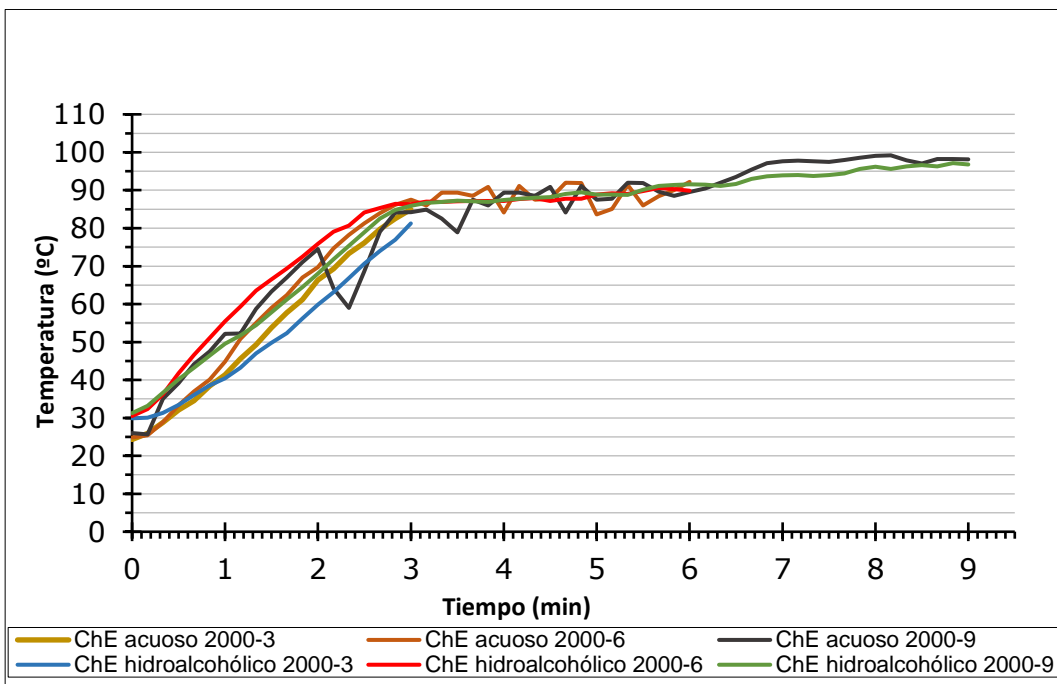
1.3.1.2. Extracción asistida por microondas (MWAE)

En las figuras 31A, 31B, 31C y 31D, se muestran los perfiles de temperatura de los tratamientos MWAE en los que se obtuvieron extractos acuosos e hidroalcohólicos de migas de champiñón.

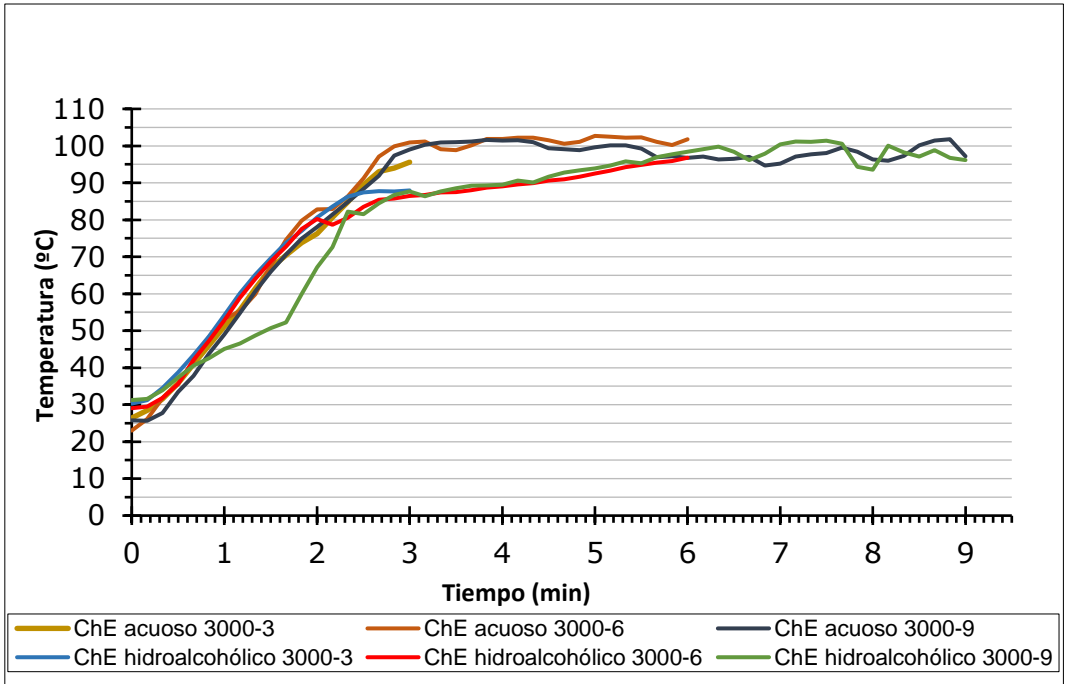
A



B



C



D

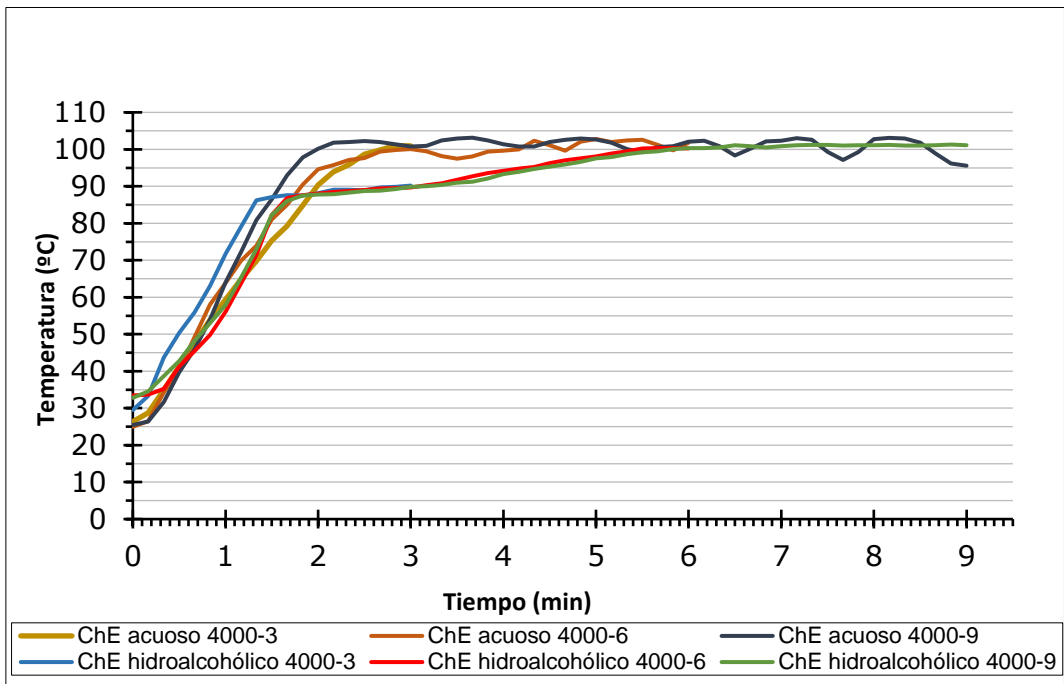


Figura 31. Perfil de temperatura para cada tratamiento de extracción asistida por microondas (MWAE) de residuos de champiñón. A) 1000W, B) 2000W, C) 3000W y D) 4000W. Leyenda: Champiñón extracto (ChE) - disolvente - potencia emitida en W - tiempo en minutos.

Como se muestra en la figura 31A, al obtener los extractos hidroalcohólicos de champiñón con la potencia de 1000W, se observó que la temperatura alcanzada fue más elevada en el tratamiento de menor y mayor duración de tiempo (3 y 9 minutos respectivamente), mientras que en el tratamiento de 6 minutos (intermedio) la temperatura alcanzada fue similar. La temperatura que se alcanzó al conseguir extractos hidroalcohólicos osciló entre 65 y 85°C, entre 10 y 3°C mayor que cuando se obtuvieron los extractos acuosos.

Cuando se utilizó la potencia de 2000W, figura 31B, las temperaturas que se alcanzaron fueron similares en los tratamientos para obtener tanto los extractos acuosos como los hidroalcohólicos. Sin embargo, en el tratamiento de 3 minutos, se alcanzó mayor temperatura al usar sólo agua, consiguiéndose una temperatura de 85°C, mientras que en el hidroalcohólico se alcanzó una temperatura de 80°C.

Observando las figuras 31C y 31D, si se utilizaron potencias de 3000W y 4000W, la temperatura que se alcanzó fue de 100°C, siendo similar en los tratamientos de mayor tiempo. Mientras que en los tratamientos con el menor tiempo la temperatura fue 5°C menor en los tratamientos con el disolvente hidroalcohólico. Esto se debe a que la temperatura de ebullición del etanol es menor que la del agua, con lo cual se evaporó con mayor rapidez (Cornejo Artiaga, 2016).

Como se observa en los extractos acuosos, a medida que aumentó la potencia y el tiempo de tratamiento, aumentó la temperatura. Para el tratamiento de 1000W de potencia durante 3 minutos se alcanzó una temperatura de 53,8°C, mientras que en el tratamiento de mayor potencia y tiempo (4000W de potencia durante 9 minutos) se alcanzó una temperatura de 101,8°C. En los extractos hidroalcohólicos de champiñón las temperaturas oscilaron entre 66,2°C en el tratamiento de 1000W durante 3 minutos y 101,3°C en el tratamiento de 4000W durante 9 minutos.

Si comparamos la temperatura tanto de los tratamientos sólo con agua como los de la mezcla agua-etanol, para los tratamientos en los que se utilizó mayor potencia, no se encontraron diferencias. Sin embargo, en los tratamientos en los que se utilizaron potencias más bajas se observó que en los extractos hidroalcohólicos se aumentó la temperatura hasta 10°C más que en los acuosos. Esto puede ser debido a que con las potencias bajas tardó más en evaporarse el etanol.

Zhu et al. y Smiderle et al. (2021), encontraron que el MWAE es también un método potencialmente eficaz para la extracción, en comparación con el método tradicional de extracción con agua y precipitación con alcohol, ya que la cantidad de disolvente y el tiempo necesarios en el método MWAE son menores, por lo que puede ser utilizado para la extracción de compuestos bioactivos.

A continuación, en la tabla 31 se pueden ver las condiciones de los principales tratamientos empleados para obtener los extractos de los residuos de champiñón mediante MWAE y la densidad energética de esos tratamientos.

Tabla 31. Condiciones de tratamiento y densidad energética aplicada en los diferentes tratamientos de extracción asistida por microondas (MWAE) de los residuos de Champiñón.

Tratamiento	Peso (kg)	Tiempo (h)	Potencia emitida	Potencia reflejada	Potencia absorbida	D.E. (W h/kg)
ChE acuoso 3000-6	0,568	0,10	3000	1386,10	1613,90	284,14
ChE acuoso 3000-9	0,568	0,15	3000	1414,87	1585,13	418,61
ChE acuoso 4000-6	0,568	0,10	4000	1466,07	2533,93	446,11
ChE acuoso 4000-9	0,568	0,15	4000	1459,19	2540,81	670,99
ChEetanólico 3000-6	0,568	0,10	3000	1302,66	1697,34	298,83
ChEetanólico 3000-9	0,568	0,15	3000	1404,15	1595,85	421,44
ChEetanólico 4000-6	0,568	0,10	4000	1386,81	2613,19	460,07
ChEetanólico 4000-9	0,568	0,15	4000	1364,82	2635,18	695,91

[Champiñón extracto (ChE) – disolvente - potencia emitida en W – tiempo en minutos]. D.E.: densidad energética.

En los tratamientos con los que se obtuvieron los extractos hidroalcohólicos la densidad energética fue mayor (entre 14 y 25 W h/kg mayor) que en los tratamientos que se utilizó agua como disolvente porque el solvente mezcla de agua y etanol absorbió mayor energía que el solvente acuoso. La densidad energética al utilizar una potencia de 3000W durante 9 minutos y utilizar una potencia de 4000W durante 6 minutos fue similar. La densidad energética fue mayor a medida que se aumentó el tiempo de tratamiento con la misma potencia, al igual que en el estudio de Galán Lacarra (2011) en un secadero industrial, porque la densidad energética está directamente relacionada con el tiempo y la potencia utilizados, aumentando a medida que aumenta el tiempo y/o la potencia.

Capacidad antioxidante

En la tabla 32, se muestran los resultados de polifenoles y capacidad antioxidante que se obtuvieron al analizar los extractos de migas de champiñón obtenidos mediante MWAE.

Tabla 32. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los extractos de champiñón.

Subproducto	Extracto acuoso			Extracto hidroalcohólico		
	Polifenoles totales (mg/kg ácido gálico)	DPPH (μmol trolox inicial /g producto)	FRAP (μmol TE/mg producto)	Polifenoles totales (mg/kg ácido gálico)	DPPH (μmol trolox inicial /g producto)	FRAP (μmol TE /mg producto)
ChE 1000-3	0,47 \pm 0,02 ^{ab}	0,14 \pm 0,01 ^a	3,91 \pm 0,42 ^a	0,95 \pm 0,46 ^a	0,14 \pm 0,00 ^a	4,25 \pm 0,21 ^a
ChE 1000-6	0,84 \pm 0,24 ^{abc}	0,14 \pm 0,00 ^a	4,77 \pm 0,44 ^b	0,62 \pm 0,05 ^a	0,19 \pm 0,00 ^b	4,38 \pm 0,13 ^{abc}
ChE 1000-9	0,22 \pm 0,21 ^a	0,17 \pm 0,00 ^b	5,37 \pm 0,39 ^c	0,78 \pm 0,21 ^a	0,22 \pm 0,00 ^c	5,35 \pm 0,57 ^{ab}
ChE 2000-3	0,34 \pm 0,12 ^a	0,15 \pm 0,00 ^a	4,75 \pm 0,50 ^b	0,67 \pm 0,43 ^a	0,20 \pm 0,01 ^{bc}	4,45 \pm 0,14 ^{ab}
ChE 2000-6	0,79 \pm 0,48 ^{abc}	0,17 \pm 0,00 ^b	5,15 \pm 0,16 ^b	1,19 \pm 0,11 ^{ab}	0,27 \pm 0,00 ^d	6,69 \pm 0,15 ^{cd}
ChE 2000-9	2,07 \pm 0,14 ^{cde}	0,22 \pm 0,00 ^c	4,59 \pm 0,02 ^b	2,70 \pm 0,46 ^c	0,41 \pm 0,01 ^f	10,72 \pm 0,10 ^e
ChE 3000-3	1,82 \pm 0,36 ^{bcd}	0,18 \pm 0,00 ^b	3,56 \pm 0,27 ^a	1,76 \pm 0,12 ^{abc}	0,22 \pm 0,00 ^c	6,24 \pm 0,39 ^{bcd}
ChE 3000-6	3,39 \pm 0,98 ^{ef}	0,23 \pm 0,01 ^c	4,57 \pm 0,25 ^b	4,94 \pm 0,16 ^d	0,37 \pm 0,00 ^e	11,97 \pm 0,73 ^e
ChE 3000-9	3,49 \pm 0,27 ^f	0,26 \pm 0,00 ^d	5,73 \pm 0,20 ^b	14,55 \pm 2,36 ^f	0,66 \pm 0,01 ^h	22,43 \pm 0,61 ^g
ChE 4000-3	2,11 \pm 0,51 ^{cde}	0,18 \pm 0,00 ^b	3,82 \pm 0,41 ^a	2,59 \pm 0,11 ^{bc}	0,28 \pm 0,01 ^d	7,55 \pm 0,85 ^d
ChE 4000-6	2,61 \pm 0,33 ^{def}	0,23 \pm 0,00 ^c	4,74 \pm 0,28 ^b	8,98 \pm 1,14 ^e	0,58 \pm 0,03 ^g	17,86 \pm 1,22 ^f
ChE 4000-9	6,25 \pm 0,92 ^g	0,39 \pm 0,02 ^e	10,87 \pm 0,53 ^d	20,50 \pm 0,89 ^g	0,86 \pm 0,00 ⁱ	32,57 \pm 3,37 ^h

Valor medio \pm desviación estándar. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.05$). [Champiñón extracto (ChE) - potencia emitida en W - tiempo en minutos].

En la tabla 32, al comparar la concentración de polifenoles de las migas de champiñón, se observó que, para un mismo tratamiento, siempre se encontró mayor concentración de polifenoles en los extractos hidroalcohólicos, coincidiendo con los resultados obtenidos en cardo y alcachofa. Si comparamos los resultados en los extractos acuosos, hubo diferencias significativas entre los tratamientos donde se utilizaron potencias de 1000W y 2000W con las que se utilizaron potencias de 3000W y 4000W, al igual que ocurre al comparar los extractos hidroalcohólicos. Además, en los dos tipos de extractos, la mayor cantidad de polifenoles se encontró en el tratamiento que se utilizó 4000W de potencia durante 9 minutos, siendo 3,3 veces mayor lo recuperado en el extracto hidroalcohólico. Los resultados de capacidad antioxidante DPPH y FRAP en los extractos de champiñón fueron superiores en los extractos hidroalcohólicos, y con el tratamiento de mayor potencia, al igual que ocurrió en los polifenoles totales. En el tratamiento con mayor potencia y tiempo, ChE 4000-9, la cantidad de antioxidantes DPPH fue 2,2 veces mayor en el extracto hidroalcohólico que en el acuoso, y para la capacidad antioxidante FRAP fue 3 veces mayor. Todo esto es debido a que cuando aumentó el tiempo de tratamiento y con lo cual la temperatura de tratamiento, se aumentó la porosidad de la estructura celular, extrayéndose los compuestos polifenoles en el disolvente. En todos

los casos el aumento de la temperatura favoreció la extracción de los compuestos bioactivos de la matriz, porque aumentó la solubilidad de los solutos debido a la menor tensión superficial y a la viscosidad del disolvente (Cornejo Artiaga, 2016).

En el caso de los extractos acuosos, las diferencias significativas para estos dos parámetros no fueron tan notables como en los extractos hidroalcohólicos al utilizar potencias altas. Por lo tanto, los antioxidantes son compuestos que se extraen en mayor concentración con agua-etanol porque tienen más afinidad por el etanol como demostró Muñoz et al. (2015) en extracción de compuestos fenólicos en champá en extractos hidroalcohólicos en proporción 70 etanol :30 agua.

Además, si observamos los resultados en la tabla 32, obtenidos mediante las tres determinaciones, se encuentra un aumento del contenido de antioxidantes en el mismo tiempo de tratamiento cuando se aumenta la potencia a 3000W y 4000W.

Al igual que en esta tesis doctoral, Özyürek et al. (2014) demostraron que al utilizar MWAE con una potencia de 1500 W durante 5 minutos se obtienen extractos de hongos, pero en este caso metanólicos, donde se pueden encontrar antioxidantes, polifenoles totales y DPPH en mayor cantidad que con otros métodos de extracción.

Por otro lado, se ha obtenido la misma variación en los valores de polifenoles totales y DPPH, que encontraron Singh Chouhan et al. (2022) en su estudio sobre seta ostra. Ellos concluyeron que al utilizar una potencia de MW elevada durante un tiempo más corto se produjo la rápida ruptura celular para la lixiviación del extracto acuoso, obteniéndose valores mayores de polifenoles que al utilizar menores potencias. Además, analizaron la metodología DPPH y confirmaron que esa capacidad antioxidante del extracto obtenido por MW se conserva. Esto es debido a que los antioxidantes son más resistentes al aumento de temperatura que al aumento del tiempo de tratamiento.

Contenido en beta glucanos

En los extractos de champiñón también se analizaron los beta glucanos, encontrándose valores bajos, incluso en algunos casos no se detectaron, tal y como se refleja en la tabla 33.

Tabla 33. Beta glucanos en los extractos de champiñón.

Subproducto	Extracto acuoso	Extracto hidroalcohólico
ChE 1000-3	Nd	0,13 ± 0,04 ^a
ChE 1000-6	Nd	0,12 ± 0,00 ^a
ChE 1000-9	Nd	0,16 ± 0,00 ^{ab}
ChE 2000-3	0,09 ± 0,02 ^a	0,19 ± 0,01 ^{abc}
ChE 2000-6	Nd	0,78 ± 0,46 ^{cd}
ChE 2000-9	0,62 ± 0,97 ^a	0,42 ± 0,01 ^{abcd}
ChE 3000-3	0,29 ± 0,08 ^a	0,27 ± 0,06 ^{abc}
ChE 3000-6	0,12 ± 0,03 ^a	0,64 ± 0,06 ^{abcd}
ChE 3000-9	0,49 ± 0,61 ^a	1,06 ± 1,03 ^c
ChE 4000-3	0,12 ± 0,02 ^a	0,43 ± 0,19 ^{abcd}
ChE 4000-6	0,52 ± 0,11 ^a	0,54 ± 0,45 ^{abcd}
ChE 4000-9	Nd	0,76 ± 1,29 ^{bcd}

Valor medio ± desviación estándar. Datos expresados en porcentaje. Codificación: Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.05$). [Champiñón extracto (ChE) - potencia emitida en W - tiempo en minutos]. Nd: no detectado.

En la tabla 33, se muestra que el contenido de beta glucanos fue mayor en los extractos hidroalcohólicos que en los extractos acuosos. En los extractos hidroalcohólicos se mostró mayor concentración de ellos cuando se utilizó la potencia de 4000W durante 9 minutos en comparación con los tratamientos de 1000W durante 3 y 6 minutos. Esto puede deberse a que el tiempo de exposición a las MW fue menor con el tratamiento de 4000W, conservando los beta glucanos.

Además, se observó que en los tratamientos con 2000W de potencia, aumentó la extracción al aumentar el tiempo y la temperatura, hecho demostrado por Gil-Ramírez et al. (2019). Estos autores comprobaron que al aplicar microondas (850 W) a residuos de champiñón disueltos en agua, aumentando el tiempo y la temperatura, aumentaba el contenido de polisacáridos, en concreto beta glucanos.

Gong et al. (2020) comprobaron al igual que otros autores, como Zhu et al., que utilizando una potencia de 280W sobre una mezcla masa:agua, con la cual se alcanzaban 70°C, se obtuvieron beta glucanos en el extracto.

A diferencia de los autores anteriormente mencionados, en la experimentación que se desarrolló para esta tesis doctoral, las potencias fueron mayores, aumentando en mayor grado la temperatura y la proporción agua/etanol de solvente utilizado fue diferentes. Por este motivo, el contenido de compuestos obtenido no fue el mismo.

Al igual que en esta tesis doctoral, Sharad Mali y Kumar (2023) consiguieron obtener polifenoles y otros compuesto a partir de residuos de vegetales mediante MWAE, obteniendo un mayor rendimiento que con la extracción convencional. Sin embargo, se deben realizar más estudios para mejorar la obtención de estos extractos.

1.3.2. Extracción asistida por pulsos eléctricos de intensidad moderada (PEFAE)

Para este subproducto de champiñón también se analizaron los polifenoles y las capacidades antioxidantes DPPH y FRAP (tablas 34 y 35).

- Subproductos líquidos:

Tabla 34. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los subproductos de champiñón obtenidos mediante extracción asistida por pulsos eléctricos (PEFAE).

Subproducto	Líquidos		
	Polifenoles totales (mg/kg ácido gálico)	DPPH (μ mol trolox inicial /g producto)	FRAP (μ mol TE/mg producto)
0,5 kV/cm 10 p	0,45 \pm 0,06 ^b	0,04 \pm 0,00 ^a	1,17 \pm 0,01 ^c
0,5 kV/cm 25 p	0,47 \pm 0,13 ^b	0,05 \pm 0,00 ^a	1,16 \pm 0,01 ^c
1 kV/cm 10 p	0,41 \pm 0,07 ^b	0,04 \pm 0,00 ^a	1,16 \pm 0,01 ^c
1 kV/cm 25 p	0,42 \pm 0,02 ^b	0,05 \pm 0,00 ^a	1,12 \pm 0,02 ^b
2 kV/cm 10 p	0,21 \pm 0,14 ^a	0,09 \pm 0,00 ^b	1,07 \pm 0,00 ^a
2 kV/cm 25 p	0,51 \pm 0,05 ^b	0,05 \pm 0,00 ^a	1,16 \pm 0,01 ^c

Valor medio \pm desviación estándar. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre los tratamientos con Pulsos eléctricos ($P < 0.05$). p: pulsos.

Como se puede observar en la tabla 34, tanto para polifenoles, DPPH y FRAP se encontraron diferencias significativas entre el tratamiento de 2 kV/cm 10 p, mientras en el resto de los tratamientos no afectó el número de pulsos aplicados, siendo su valor menor en FRAP y polifenoles, pero mayor en DPPH, al igual que Kit Leong et al. (2021) que usaron 1 kV/cm en diferentes tipos de setas comestibles. Lo mencionado es debido a que la aplicación de 2 kV/cm es la intensidad que provoca la ruptura de las células para los radicales determinados por DPPH.

- Subproductos sólidos:

También se analizaron los antioxidantes de la parte sólida como se puede ver en la tabla 35.

Tabla 35. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los subproductos de champiñón obtenidos mediante extracción asistida por pulsos eléctricos (PEFAE).

Subproducto	Sólidos		
	Polifenoles totales (mg/kg ácido gálico)	DPPH (μmol trolox inicial /g producto)	FRAP (μmol TE/mg producto)
0,5 kV/cm 10 p	119,22 \pm 4,63 ^b	5,17 \pm 0,09 ^c	161,75 \pm 3,54 ^d
0,5 kV/cm 25 p	51,71 \pm 5,21 ^a	5,70 \pm 0,14 ^d	154,74 \pm 5,15 ^{bc}
1 kV/cm 10 p	64,06 \pm 8,88 ^a	4,87 \pm 0,0 ^b	149,21 \pm 1,28 ^b
1 kV/cm 25 p	99,09 \pm 19,21 ^b	4,80 \pm 0,10 ^b	155,55 \pm 2,03 ^c
2 kV/cm 10 p	122,55 \pm 38,23 ^b	4,75 \pm 0,05 ^{ab}	143,48 \pm 3,26 ^a
2 kV/cm 25 p	110,10 \pm 10,75 ^b	4,54 \pm 0,25 ^a	155,55 \pm 2,36 ^c

Valor medio \pm desviación estándar. Datos expresados en materia seca. Codificación: Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre los tratamientos con Pulsos eléctricos ($P < 0.05$).

En los subproductos sólidos que se obtuvieron al tratar los residuos de champiñón con PEFAE, se mantuvieron los compuestos bioactivos tal y como se muestra en la tabla 35. Si observamos las diferencias significativas en los polifenoles totales, en el primer tratamiento los valores fueron similares a los de los tratamientos de mayor intensidad y número de pulsos. Sin embargo, para la capacidad antioxidante, según las diferencias significativas, el mayor valor se obtuvo con el tratamiento de menor intensidad. Esto significa que para los subproductos de champiñón tratados con PEFAE al aplicar 0,5 kV/cm y 10 p se obtuvieron los mayores valores de polifenoles y capacidad antioxidante. Los valores obtenidos fueron los siguientes: 119,2 mg/kg ácido gálico de polifenoles, 5,7 μmol trolox inicial /g producto de capacidad antioxidante DPPH y 161,7 μmol TE/mg producto de capacidad antioxidante FRAP. Por lo tanto, los tratamientos PEFAE utilizados con la mayor intensidad tendieron a disminuir la capacidad antioxidante de los subproductos sólidos porque se extrajeron en el líquido.

Al estudiar otros autores, Kit Leong et al. (2021) encontraron, al igual que en el presente trabajo, que al aplicar las PEFAE (10 – 100 kV/cm con una duración de 100 – 1000 μs) sobre hongos, se pueden obtener compuestos cuando la intensidad no es muy alta.

Actualmente Zhang et al. (2023) encontraron algunas limitaciones a la obtención de PEFAE, como que es difícil inactivar los microorganismos y que la conductividad varía dependiendo de la composición del alimento. Sin embargo, también encontraron ventajas como que es una tecnología más eficiente con costos de procesamiento reducidos que permite la extracción de sustancias que son difíciles de obtener mediante procedimientos de extracción estándar.

1.3.3. Combinación de las dos tecnologías (PEFAE y MWD)

En los subproductos de champiñón que se obtuvieron mediante la combinación del tratamiento PEFAE con MWD, 0,5 kV/cm 10p 4000W 10 min, se analizó la α_w , dando un valor de 0,2775 y la humedad con un valor de 0,97%. El resultado de antioxidantes cuando se combinaron estas dos tecnologías (0,5 kV/cm 10p 4000W 10 min) fue de 151,09 mg/kg ácido gálico para polifenoles totales, 0,87 μmol trolox inicial /g producto para DPPH y 49,04 μmol TE/mg producto para FRAP. Valores mayores para polifenoles, pero menores en DPPH y FRAP en comparación con lo obtenido en los sólidos tratados con PEFAE (tabla 35).

Para el champiñón se obtuvo más cantidad de polifenoles en los subproductos tratados con MWD (tabla 27). Se obtiene el doble de polifenoles comparado con el tratamiento con PEFAE (tabla 35) y 1,86 veces más que en la combinación de los dos. Sin embargo, la capacidad antioxidante en los subproductos de champiñón se conservó mejor en los tratamientos con PEFAE, porque la temperatura afecta más a las moléculas analizadas por la capacidad antioxidante que a los polifenoles. Para la capacidad antioxidante DPPH fue 4,8 μmol trolox inicial /g producto mayor con respecto a la MWD y la combinación de las tecnologías, mientras que para la capacidad antioxidante FRAP fue similar con respecto a MWD y 106 μmol TE/mg producto mayor con respecto a la combinación de las dos tecnologías.

Una vez analizadas las diferentes técnicas y tecnologías de extracción, se puede concluir que para champiñón la tecnología MWD es la más adecuada teniendo en cuenta el resultado de los compuestos y el tiempo de tratamiento, al igual que concluyeron Bachtler y Bart, 2021 al comparar diferentes tecnologías como inmersión y percolación y ultrasonidos con microondas.

En el año 2024, Punia Bangar et al. demostraron que la combinación de MW con tecnología no térmica como los USAE como método de pretratamiento aumentó significativamente el rendimiento de aceites esenciales de cáscara de lima.

1.3.4. Extracción asistida por ultrasonidos (USAE)

A continuación, en la tabla 36 se muestra el contenido de proteína bruta que se conservó en los subproductos de champiñón sólidos después de ser tratados mediante USAE. No se analizaron las proteínas en el líquido porque las proteínas de los champiñones no son solubles al no tener una estructura globular (Luque Guillén, 2009).

Tabla 36. Proteínas en los subproductos de champiñón tratados mediante extracción asistida por ultrasonidos (USAE).

Subproducto	% proteína bruta
P1-400W-10	40,3 ± 4,52 ^b
P2- 400W-20	46,4 ± 0,93 ^b
P3-400W-30	30,95 ± 2,75 ^a

Valor medio ± desviación estándar. Datos expresados en materia seca. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre los tratamientos con Pulsos eléctricos ($P < 0.05$). [Nº prueba – potencia emitida en W - tiempo en minutos].

El contenido de proteínas en el subproducto de champiñón disminuyó al aumentar el tiempo de tratamiento de 20 a 30 minutos, con lo cual fueron extraídas por el disolvente utilizado para la extracción. En cambio, cuando se aumentó el tiempo de tratamiento de 10 a 20 minutos, no se encontraron diferencias significativas. Al igual que en esta tesis doctoral, Stumpf et al. (2020) demostraron que se pueden obtener antioxidantes de residuos tratados con metodologías no térmicas como los ultrasonidos, y que esas tecnologías son más respetuosas, aunque no estudiaron la extracción de proteínas.

Por otro lado, Umaña et al. (2020) y Yi-Ching et al. (2012) demostraron que al utilizar metodologías no térmicas como los ultrasonidos se pueden obtener antioxidantes a partir de residuos de hongos.

Cem Ozsefil y Ziylan-Yavas (2023) investigaron el uso de la biomasa de residuos de té como fuente alternativa de polifenoles y fibra. Mediante USAE a varias frecuencias (20, 35 y 200 kHz), demostrando que la USAE a 20 kHz, la misma frecuencia que se ha estudiado en esta tesis, obtuvo altas tasas de recuperación en 30 min para los residuos de fibra y polifenoles, pero que esto disminuía si se combinaba con tecnología térmicas. Además, en comparación con la convencional la ultrasonicación consigue rendimientos similares en mucho menos tiempo y de forma rentable. Por lo tanto, este estudio ha demostrado que es posible utilizar la USAE para la extracción de polifenoles y fibra siendo respetuosa con el medio ambiente, rápida y eficaz.

Sin embargo, en el mismo año Ghulam Nabi et al. (2023) concluyeron que es crucial evaluar los residuos de frutas y verduras para la recuperación y caracterización de compuestos bioactivos mediante USAE, y explorar su uso en productos químicos, nutracéuticos y como ingredientes alimentarios. Además, debería analizarse lo seguros que son estos nuevos ingredientes.

1.4. Subproductos obtenidos de residuos de tomate

En este apartado se muestran y discuten los resultados obtenidos de tratar los residuos de tomate, descritos en el apartado 1 de Materiales y métodos, mediante MW para su deshidratación y para la obtención de extractos, además de los resultados obtenidos de la aplicación de PEFAE y la combinación de ambas tecnologías.

1.4.1. Efectos de los tratamientos con microondas (MW)

1.4.1.1. Deshidratación (MWD)

Al emitir la potencia de MW durante el tratamiento se consiguió el deshidratado de los residuos gracias a la temperatura que se alcanzó. En el tratamiento que se utilizó la potencia de 1000W, la temperatura que se alcanzó fue de 90°C en 2 minutos, manteniéndose estable durante el resto del tratamiento, mientras que para los tratamientos de 2000W, 3000W y 4000W se alcanzaron aproximadamente los 100°C de temperatura en un minuto, como se muestran en la figura 32.

Como puede observarse en la figura 32, la temperatura máxima del tratamiento se alcanzó con rapidez en todos los tratamientos, pero con las potencias de 2000W y 3000W a medida que transcurrió el tratamiento hubo fluctuaciones de temperatura.

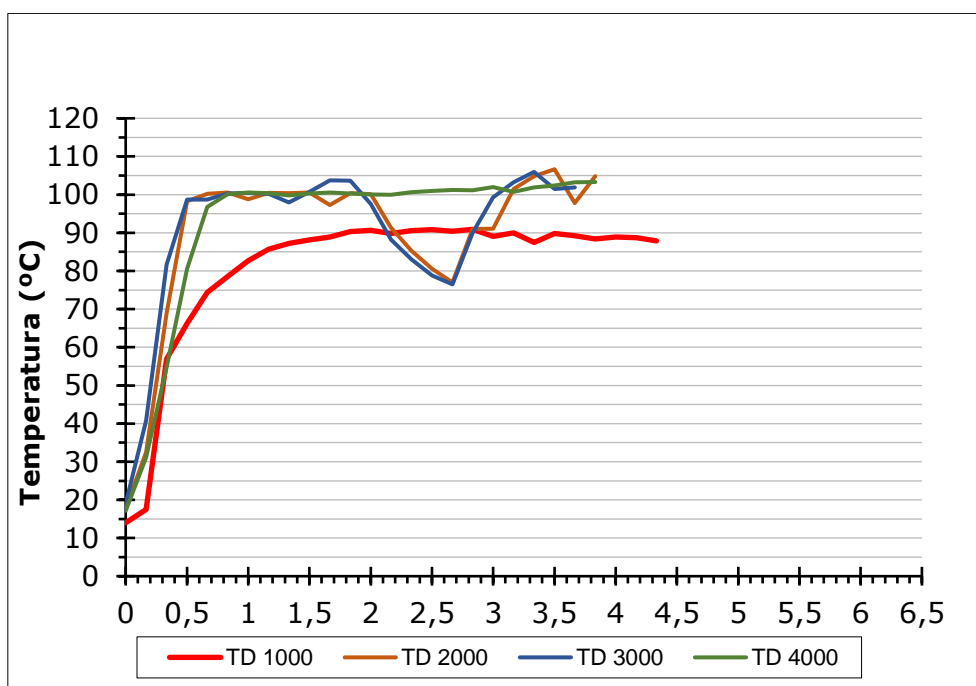


Figura 32. Perfil de temperatura durante los tratamientos de deshidratado mediante microondas (MWD) de residuos de tomate. Leyenda: Tomate deshidratado (TD) - potencia emitida en W.

Los resultados obtenidos por Miccio et al. (2020) que utilizaron MW con una temperatura de 50, 60 y 70°C, coinciden con este trabajo, en comparación con el secado convencional, 24 a 48 horas a 60-80°C (Gascón et al., 2013), el MWD permite reducir el tiempo de secado hasta el mismo contenido de humedad final deseado. Además, al igual que en la figura 41, obtuvieron unas curvas de temperatura con picos y que alcanzaron un valor máximo, consecuencia directa de las fluctuaciones de temperatura en la muestra debido a la distribución desigual del campo electromagnético dentro de la cámara.

La densidad energética de cada tratamiento, junto con las condiciones de tratamiento MWD se muestran en la tabla 37.

Tabla 37. Condiciones de tratamiento y densidad energética aplicada en los diferentes tratamientos con microondas para deshidratar (MWD) los residuos de tomate.

Tratamiento	Peso (kg)	Tiempo (h)	Potencia emitida	Potencia reflejada	Potencia absorbida	D.E. (W h/kg)
TD 1000-35	0,117	0,58	1000	629,76	370,24	1840,89
TD 2000-10	0,118	0,17	2000	1708,22	291,78	411,52
TD 3000-5	0,119	0,08	3000	1845,14	1154,86	803,19
TD 4000-4	0,120	0,07	4000	2551,75	1448,25	803,51

[Tomate deshidratado (TD) - potencia emitida en W – tiempo en minutos]. D.E.: densidad energética.

Como se puede observar en la tabla 37, en los tratamientos de MWD de los residuos de tomate se obtuvo una mayor densidad energética con el tratamiento de 1000W de potencia, fue de 1840W h/kg, ya que se utilizó durante más tiempo, entre 11 y 25 minutos más que en los otros casos. En los tratamientos de 3000W y 4000W se obtuvieron valores similares, de 803W h/kg de densidad energética. Mientras que en el tratamiento con 2000W de potencia se obtuvo la menor densidad energética con 411W h/kg. Tal y como se mencionó en el trabajo de Bobby Shekarau et al. (2023) de secado por MW de col blanca, la densidad energética aumentó en proporción al aumento de la potencia o el tiempo de tratamiento.

Por lo tanto, teniendo en cuenta el tiempo y la densidad energética de los 4 tratamientos, el que mejor resultado mostró fue el de 2000W de potencia.

Humedad

A medida que transcurre el tiempo en los diferentes tratamientos se tomaron muestras del residuo, para comprobar la evolución de la humedad, como se ve en la figura 33. En el tratamiento de 1000W de potencia se tomaron a los 5, 15, 25 y 35 minutos, en el de 2000W a los 5y 10 minutos, en el de 3000W a los 2, 4 y 5 minutos y en el de 4000W minutos a los 2, 3 y 4 minutos.

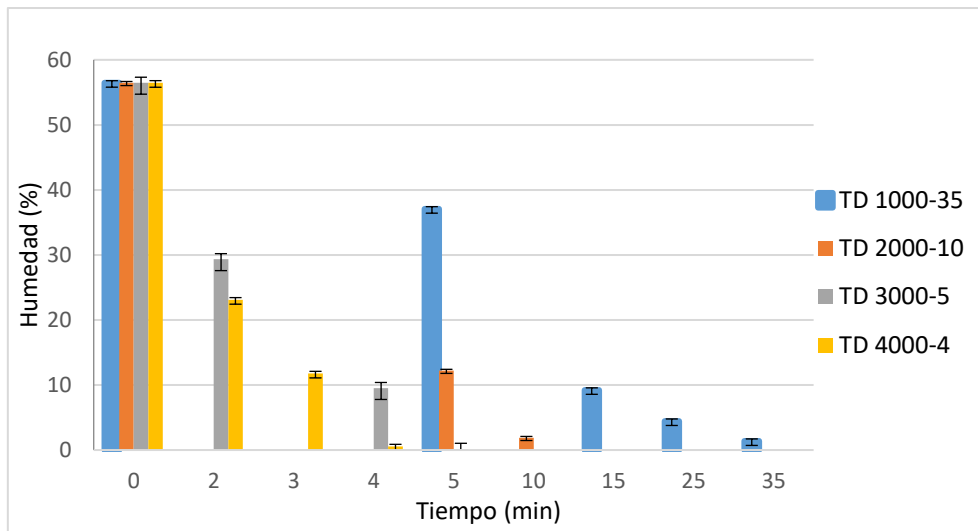


Figura 33. Evolución de la humedad para cada tratamiento de deshidratado mediante microondas (MWD) de los subproductos de tomate. Leyenda: Tomate deshidratado (TD) - potencia emitida en W - tiempo en minutos.

La humedad inicial del residuo de tomate fue de 56,5% y, como se puede observar en la figura 33, en todos los casos se redujo considerablemente, llegándose a alcanzar humedades entre 1,9 y 0,1%. A partir de 2000W de potencia se redujeron de manera importante los tiempos de tratamiento, entre 25 y 31 minutos, para obtener una humedad reducida, ya que se aumentó a velocidad de deshidratado porque al aumentar la potencia se elevó la temperatura del tratamiento.

Çetin (2022) identificó que el MWD en un horno MW con las condiciones: potencia 200W y una temperatura del aire por convección de 60°C, fue el sistema más eficiente en términos de eficiencia térmica en comparación con el secado al sol y la liofilización. Esto es así por la menor duración de sus tratamientos de secado, que requieren un menor consumo de energía para eliminar el contenido de humedad de los tomates, lo que resulta en una mejor eficiencia de secado.

El tratamiento en el que se utilizaron 1000W de potencia se descartó teniendo en cuenta que a la industria alimentaria pretende utilizar el menor tiempo posible de tratamiento, y en este caso es inviable deshidratar durante 35 minutos un residuo pudiendo aumentar la potencia sin que afecte a las características y compuestos bioactivos, tal y como se muestra a continuación.

Color

En la figura 43, se observa que, para conseguir secar la muestra, aunque se oscureció el color al aumentar la potencia de los diferentes tratamientos, todos fueron eficaces sin llegar a carbonizarla. Tal y como se hizo patente con los resultados de medida instrumental de color recogidos en la tabla 34.

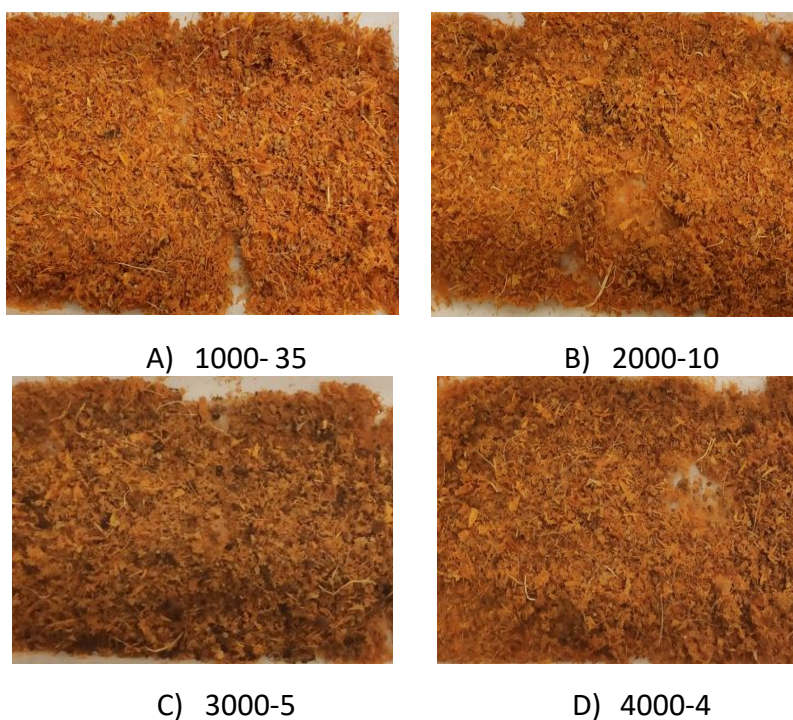


Figura 34. Aspecto de los subproductos de tomate después de los tratamientos de deshidratado mediante microondas (MWD). Leyenda: Potencia emitida en W - tiempo en minutos.

Tabla 38. Parámetros de color de los subproductos de tomate deshidratados.

Subproducto	L*	a*	b*	C	h	ΔE
CT inicial	60,74 \pm 0,07 ^c	7,28 \pm 0,11 ^a	26,77 \pm 0,60 ^a	387,62 \pm 21,25 ^a	1,31 \pm 0,01 ^c	-
TD 1000-35	56,75 \pm 2,28 ^{ab}	18,02 \pm 0,73 ^b	52,16 \pm 0,81 ^b	1527,59 \pm 42,72 ^b	1,23 \pm 0,01 ^b	388,52 \pm 0,02 ^a
TD 2000-10	55,63 \pm 1,06 ^a	18,07 \pm 0,43 ^b	51,78 \pm 0,95 ^b	1504,37 \pm 53,36 ^b	1,23 \pm 0,01 ^b	384,98 \pm 0,01 ^a
TD 3000-5	56,71 \pm 2,26 ^{ab}	19,31 \pm 1,36 ^c	53,19 \pm 1,52 ^c	1608,67 \pm 98,09 ^c	1,22 \pm 0,01 ^a	433,88 \pm 0,03 ^b
TD 4000-4	57,47 \pm 0,85 ^b	18,77 \pm 0,95 ^{bc}	51,79 \pm 0,33 ^b	1511,57 \pm 24,45 ^b	1,23 \pm 0,01 ^b	380,44 \pm 0,00 ^a

Valor medio \pm desviación estándar. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.05$). CT: control. [Tomate deshidratado (TD) - potencia emitida en W - tiempo en minutos]. L*: luminosidad (L=0 rendimientos negro y L=100 indica blanca). a*: posición entre magenta y verde (+a= magenta, frente a -a= verde). b*: posición entre amarillo y azul (+b = amarillo frente a -b= azules). ΔE : diferencia de color. C: croma. h: tono.

En la tabla 38 la luminosidad, L^* , fue mayor en el subproducto control que en los subproductos resultantes de los distintos tratamientos, no mostrándose diferencias significativas entre los mismos. El valor de a^* mostró diferencias significativas entre el control y los subproductos obtenidos mediante MWD. Además, para el valor de a^* se ve que aumentó la intensidad de rojo a medida que aumentó la potencia de tratamiento porque se encontraron diferencias significativas entre el tratamiento de 3000W con los de 1000W y 2000W. Para el valor b^* ocurrió lo mismo que para el valor de a^* , aumentando la intensidad de color del tratamiento de 3000W de potencia. Indicando que el MWD oscureció la muestra, y que ese oscurecimiento fue mayor a medida que se aumentó la potencia de tratamiento.

El croma (C), como se observa en la tabla 38, aumentó a medida que aumentó la intensidad de la potencia de tratamiento de 2000W a 3000W, pero con 4000W disminuyó porque la luminosidad fue mayor en ese tratamiento. El tono (h) fue similar en todos los tratamientos excepto en el tratamiento que se usaron 3000W de potencia que fue ligeramente menor. Además, si comparamos h en los subproductos deshidratados con el control, este obtuvo un valor mayor porque el control fue menos negro, pero más intenso en color que los subproductos.

En general, la diferencia de color (ΔE) frente al control fue similar en los tratamientos de 1000W, 2000W y 4000W, pero mayor con el tratamiento de 3000W. Todo esto se da porque al aumentar la potencia el color del tomate tiende a oscurecerse por el pardeamiento enzimático al igual que en el estudio de Martínez- Girón y Ordóñez-Santos (2015) del efecto del procesamiento térmico sobre pimiento rojo.

Todos los parámetros de color nos permitieron ver la evolución de este en los diferentes subproductos con el cambio de potencia y tiempo, demostrando que se oscureció al aumentar la temperatura de tratamiento.

Los tratamientos que se seleccionaron en base a la humedad, el tiempo de tratamiento y la densidad energética fueron tres: 2000W durante 10 minutos, 3000W durante 5 minutos y 4000W durante 4 minutos. En los productos obtenidos cuando se aplicaron, se determinó su capacidad antioxidante, licopeno y fibra.

Actividad de agua

Además de la humedad se analizó la a_w (tabla 39), parámetros que nos indican si en el subproducto puede existir crecimiento microbiano.

Tabla 39. Actividad de agua de los subproductos de tomate deshidratados.

Subproducto	a_w
CT inicial	0,9500 ± 0,02
TD 1000-35	0,4706 ± 0,00
TD 2000-10	0,4702 ± 0,00
TD 3000-5	0,472 ± 0,01
TD 4000-4	0,4691 ± 0,00

Valor medio ± desviación estándar. Los datos del control inicial (CT inicial) y de los tratamientos microondas se presentan en actividad de agua (a_w) que no tiene unidades. [Tomate deshidratado (TD) - potencia emitida en W - tiempo en minutos].

El tomate tiene un pH de alrededor de entre 4 y 4,5, y es ácido, aunque puede tener crecimiento de *S. aureus*, *Salmonella*, *Clostridium perfringens*, *Listeria monocytogenes* y *Bacillus cereus*, tal y como marca el Real Decreto 135/2010 B.O.E. 25/02/2010, con lo cual, hay que disminuir la humedad y la a_w para evitar la proliferación de esos microorganismos en el almacenamiento.

Como se ve en la tabla 39, la a_w de cada subproducto de tomate deshidratarlo mediante MWD, fue aproximadamente 0,47. Con esta a_w se consiguió que no fuera posible el crecimiento microbiano.

Capacidad antioxidante

Para comprobar que se mantuvieron los compuestos bioactivos en los subproductos deshidratados por MWD, se analizó la capacidad antioxidante, obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla 40.

Tabla 40. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los subproductos de tomate deshidratados.

Subproducto	Polifenoles totales (mg/kg ácido gálico)	DPPH (μmol trolox inicial /g producto)	FRAP (μmol TE /mg producto)
CT inicial	325,16 ± 33,40 ^c	2,02 ± 0,06 ^b	175,25 ± 8,75 ^c
TD 1000-35	166,65 ± 12,40 ^a	0,87 ± 0,02 ^a	60,95 ± 2,59 ^a
TD 2000-10	214,79 ± 7,56 ^b	0,89 ± 0,04 ^a	80,97 ± 5,26 ^b
TD 3000-5	155,53 ± 1,63 ^a	0,88 ± 0,03 ^a	56,14 ± 5,61 ^a
TD 4000-4	160,88 ± 0,80 ^a	0,88 ± 0,01 ^a	63,17 ± 1,95 ^a

Valor medio ± desviación estándar. Datos expresados en materia seca. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.05$). CT: control. [Tomate deshidratado (TD) - potencia emitida en W - tiempo en minutos].

En la tabla 40 se observa que, cualquiera de los tratamientos produjo una reducción muy significativa de la capacidad antioxidante del subproducto con respecto al control sin tratar, indicativo de que el aumento de temperatura destruyó los compuestos antioxidantes que son termolábiles porque se destruyen a partir de 60°C (Quiñones et al., 2012). En el contenido de polifenoles totales, se observaron diferencias significativas entre el tratamiento en el que se utilizaron 2000W de potencia, 214,79 mg/kg ácido gálico, y el resto de tratamientos. Los demás tratamientos dieron un resultado menor, entre 155 y 166 mg/kg ácido gálico de polifenoles. Se debe a que los polifenoles se vieron afectados por el aumento rápido de temperatura. Baltacıoglu et al. (2021) encontraron que el contenido de polifenoles totales (TPC) del control, tomate fresco, fue de $345,61 \pm 0,69$ mg ácido gálico /kg, valor muy cercano a lo que se ha analizado en esta tesis doctoral, mostrándose que los polifenoles se reducen con la temperatura alcanzada por el tratamiento de deshidratado.

En cuanto a la capacidad antioxidante FRAP, también se observaron en la tabla 40, diferencias significativas entre el tratamiento de 2000W de potencia y los demás tratamientos. En este caso, los resultados que se obtuvieron fueron: en el tratamiento de 1000W, 60,95 $\mu\text{mol TE/mg}$ producto, en el de 2000W, 80,97 $\mu\text{mol TE/mg}$ producto, en el de 3000W, 56,14 $\mu\text{mol TE/mg}$ producto y en el de 4000W, 63,17 $\mu\text{mol TE/mg}$ producto. El mayor resultado se dio en el tratamiento con 2000W de potencia. Al igual que en los polifenoles, el poder antioxidante en la transferencia de electrones se vio comprometido por el aumento de temperatura al utilizar las potencias más altas. Por otra parte, al analizar la capacidad antioxidante DPPH, los resultados de los tratamientos oscilaron entre 0,87 y 0,89 $\mu\text{mol trolox inicial/g}$ producto, no mostrándose diferencias significativas entre los tratamientos. Se vio que la capacidad antioxidante frente a radicales no estuvo afectada por el aumento de temperatura ni por el tiempo de tratamiento. Además, Çetin (2022), también demostró que, al utilizar el microondas a 200W sólo o esos mismos vatios junto con una temperatura de aire de 60°C, los tiempos de tratamiento se redujeron, y eso llevó a que se conservó la capacidad antioxidante FRAP y el contenido en polifenoles, de los que obtuvieron valores de 214 mg/kg ácido gálico, al igual que en el mejor tratamiento de la tabla 40.

En los valores de polifenoles y capacidad antioxidante de los subproductos de tomate se encontró una diferencia menor con respecto al control, que en los subproductos de cardo, alcachofa y champiñón. Esto es porque la humedad inicial del residuo de tomate fue 56% y de los otros residuos de 80-90%, utilizando tiempos de tratamiento mayores cuando la humedad inicial fue más elevada.

Contenido en licopeno

En la tabla 41 se muestran los resultados de licopeno que se obtuvieron al analizar los subproductos de tomate.

Tabla 41. Licopeno en los subproductos de tomate deshidratados.

Subproducto	mg/kg
CT inicial	32,36 ± 1,73 ^{ab}
TD 1000-35	25,90 ± 2,38 ^a
TD 2000-10	36,52 ± 13,36 ^{ab}
TD 3000-5	41,48 ± 3,50 ^c
TD 4000-4	42,48 ± 3,97 ^c

Valor medio ± desviación estándar. Datos expresados en materia seca. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.05$). CT: control. [Tomate deshidratado (TD) - potencia emitida en W – tiempo en minutos].

Para el contenido en licopeno, como puede observarse en la tabla 41, se obtuvieron los mayores resultados al aplicar las potencias de MWD más altas (3000W y 4000W). Entre esos dos tratamientos no se encontraron diferencias significativas, por lo que los dos fueron tratamientos óptimos. Todo debido a que la temperatura favoreció la rotura de las células para disminuir el tiempo de tratamiento y aumentar la evaporación del agua celular, pero manteniéndose el licopeno al ser un tiempo corto de tratamiento. Esto lo comprobó también Çetin (2022) al secar residuos de tomate con microondas a 200W o híbrido aire convectivo a 60°C y 200W microondas, observando que el contenido de licopeno disminuyó en todos los métodos de secado de tiempo prolongado.

En esta tesis doctoral se estudiaron potencias más elevadas que las estudiadas en otros estudios para comprobar que con esas potencias se reduce el tiempo de deshidratado pero que se conservaron los compuestos como el licopeno.

Contenido en fibra dietética (FD)

Al igual que en otros subproductos también se analizó el contenido de FD obteniéndose los siguientes resultados (tabla 42):

Tabla 42. Fibra dietética soluble (SDF), insoluble (IDF) y total (TDF) en los subproductos de tomate deshidratados.

Subproducto	IDF	SDF	TDF
CT inicial	73,92 ± 5,39 ^b	1,20 ± 0,74 ^b	74,60 ± 5,67 ^b
TD 1000-35	51,78 ± 2,85 ^{ab}	0,31 ± 0,11 ^a	52,11 ± 3,63 ^{ab}
TD 2000-10	44,89 ± 9,51 ^{ab}	0,54 ± 0,12 ^a	45,43 ± 9,59 ^{ab}
TD 3000-5	30,14 ± 3,71 ^a	0,65 ± 0,32 ^a	30,78 ± 3,53 ^a
TD 4000-4	42,55 ± 2,83 ^{ab}	0,59 ± 1,53 ^a	43,14 ± 2,77 ^{ab}

Valor medio ± desviación estándar. Datos expresados en g/100g peso de materia seca. Codificación: Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre los tratamientos (P < 0.05). CT: control. [Tomate deshidratado (TD) – potencia emitida en W - tiempo en minutos].

En la tabla 42, se observa que en el residuo de tomate sin tratar se encontró una mayor concentración de FD que en los sometidos a MWD, disminuyendo a medida que se aumentó la potencia del tratamiento. La biodisponibilidad de TDF osciló de 74,6 g/100g de peso en el control a 30,7g/100g de peso en el menor de los casos, que corresponde a un 44% menos de TFD biodisponible. La IDF se vio afectada por la temperatura, disminuyendo en proporción al aumento de esta.

Además de la IDF, en la tabla 42 se puede ver que se obtuvo SDF, la cual se mantuvo sin mostrar diferencias significativas entre tratamientos, porque se vio afectada de igual manera por el aumento de tiempo y de temperatura de los diferentes tratamientos. Sin embargo, si comparamos con el control, esta SDF se encontró en menor medida en todos los subproductos porque se vio afectada por el aumento de la temperatura con los tratamientos MWD.

Al igual que en esta tesis doctoral, Miccio et al. (2020), investigaron el secado de los residuos de la industria del tomate como paso previo a su valorización. Para ello utilizaron MW que alcanzó una temperatura de 50, 60 y 70°C, una tecnología interesante por su capacidad de reducir el tiempo de extracción, demostrando que es capaz de conservar los compuestos.

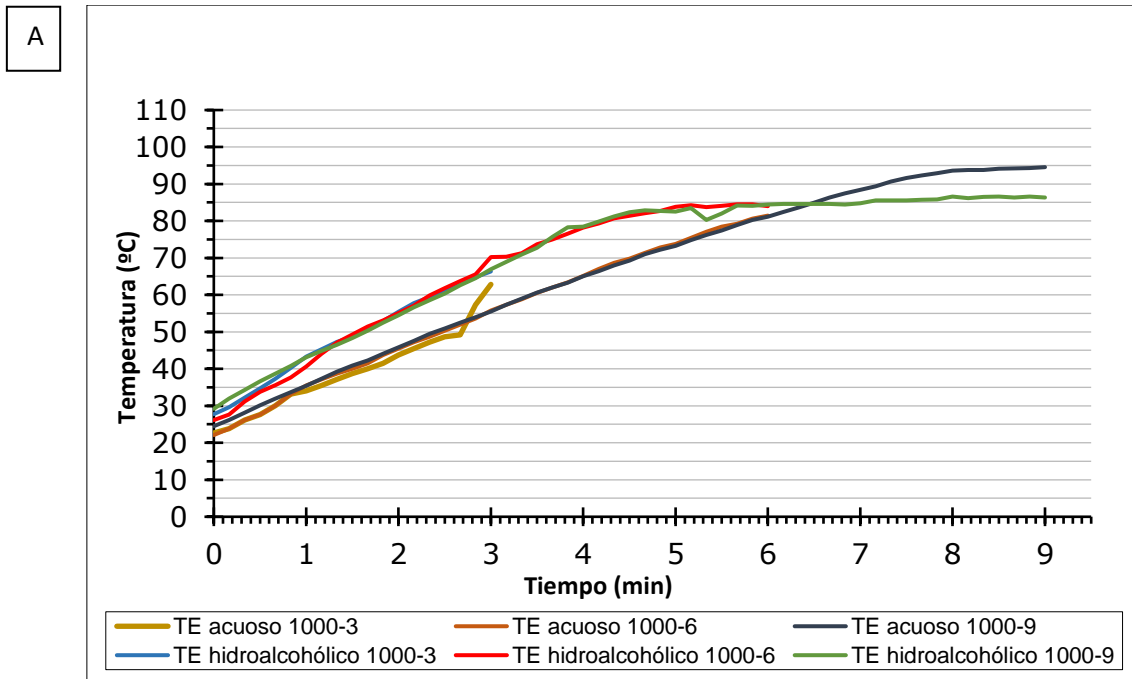
Para la FD no se encontraron diferencias significativas en el contenido, mientras que en los antioxidantes se conservaron en mayor contenido con el tratamiento de 4000W, por lo tanto, estos compuestos se conservaron en mayor concentración al disminuir el tiempo de tratamiento, aunque aumentó la temperatura hasta 110°C.

Actualmente se considera que la tecnología MW tienen un alto potencial para transformar desperdicios de alimentos y residuos lignocelulósicos, pero que esa transformación sigue siendo un desafío (Gallego García et al., 2023). En este sentido, es

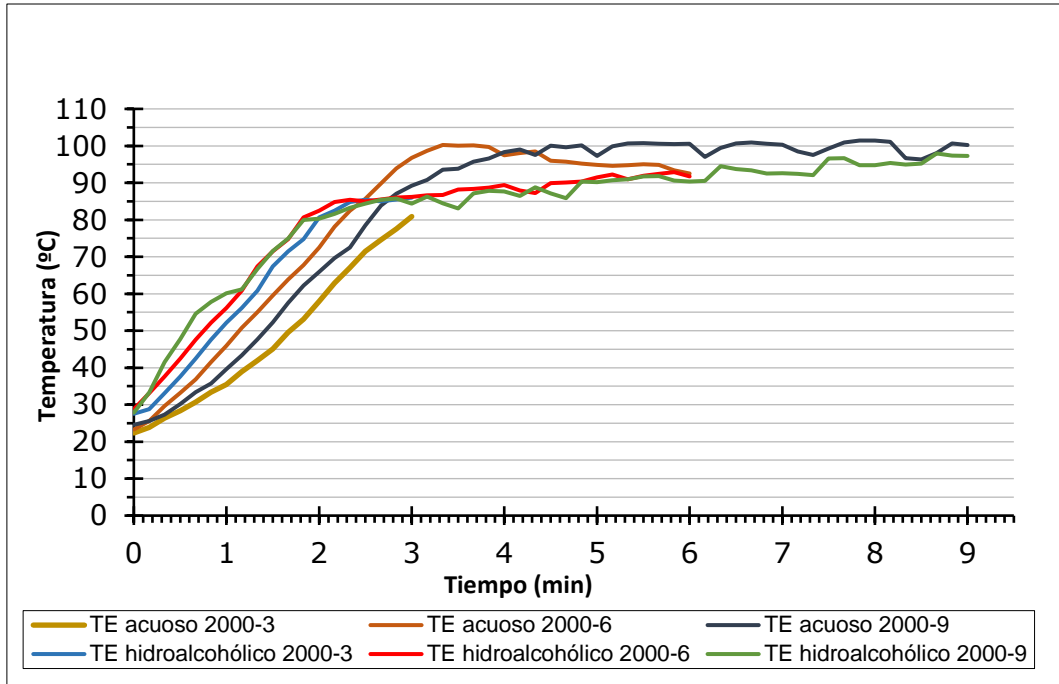
fundamental estudiar los parámetros que se vayan a utilizar, el impacto ambiental y el impacto económico del proceso.

1.4.1.2. Extracción asistida por microondas (MWAE)

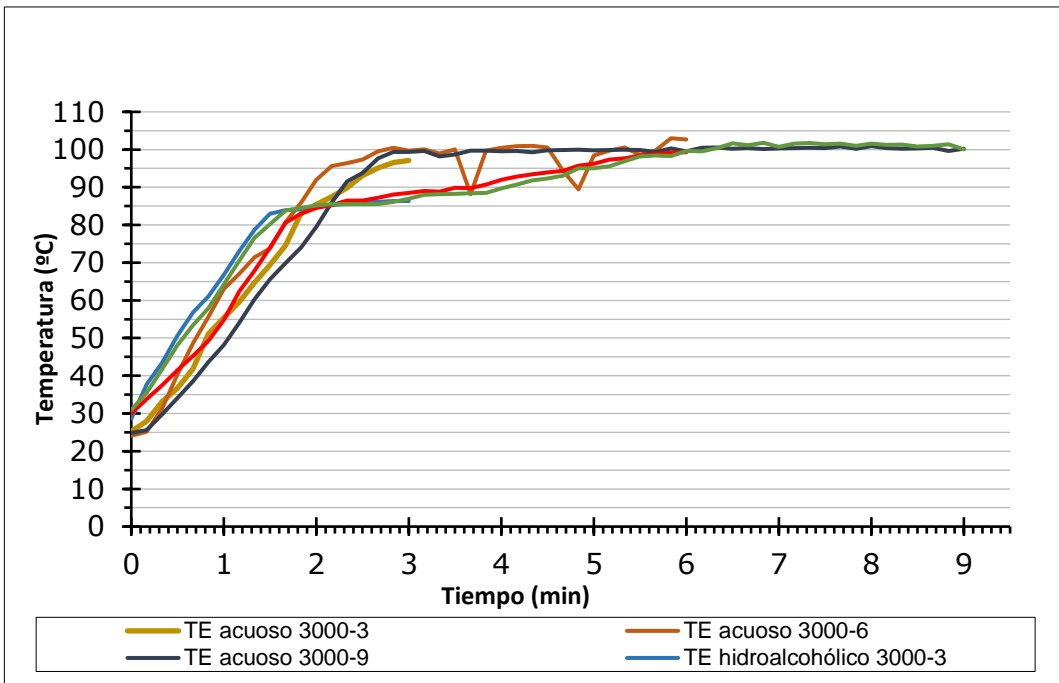
Como se ve en figuras 35A, 35B, 35C y 35D, se midió la temperatura de cada tratamiento MWAE para la obtención de extractos de residuos de tomate. Cuando se utilizaron las potencias de 1000W (t^a entre 63 y 95°C) y 2000W (t^a entre 81 a 100°C), en la mayoría de los casos la temperatura de tratamiento fue mayor al utilizar disolvente acuoso, aproximadamente 5°C mayor, que hidroalcohólico. Excepto cuando se utilizaron esas potencias con el mínimo tiempo, 3 minutos.



B



C



D

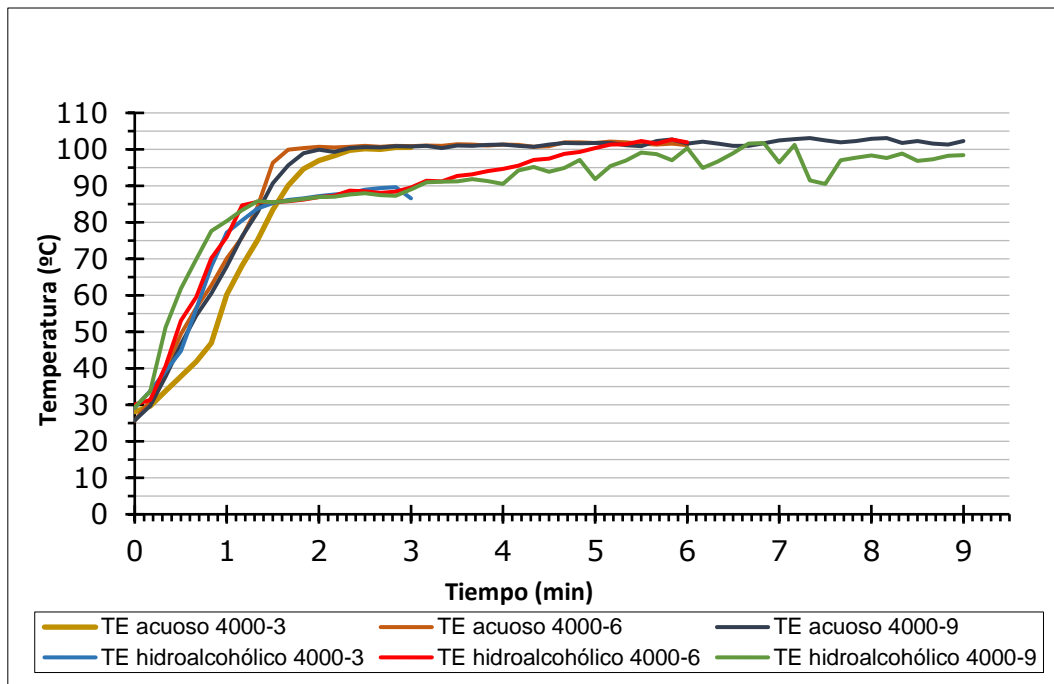


Figura 35. Perfil de temperatura para cada tratamiento de extracción asistida mediante microondas (MWAE) a 4000W de residuos de tomate. Leyenda: Tomate extracto (TE) – disolvente - potencia emitida en W - tiempo en minutos.

Sin embargo, cuando se utilizaron las potencias de 3000W y 4000W, mostradas en las figuras 35B y 35C, las temperaturas fueron de 89-90°C para obtener el extracto hidroalcohólico durante 3 minutos, mientras que en el resto de tratamientos la temperatura alcanzada fue similar, 100-102°C.

Cuando se aplicaron los tratamientos MWAE, la temperatura aumentó a medida que aumentó el tiempo y la potencia de tratamiento.

En los extractos acuosos de tomate se alcanzaron unas temperaturas de entre 62,8°C en la primera prueba (1000W potencia 3 minutos) y 103°C en la última prueba (4000W potencia 9 minutos). Mientras que en los extractos hidroalcohólicos de tomate la temperatura que se alcanzó fue de 66,3°C al utilizar 1000W de potencia durante 3 minutos y 101,2°C al utilizar 4000W de potencia durante 9 minutos.

Si comparamos las temperaturas que se alcanzaron en el mismo tratamiento para el extracto acuoso e hidroalcohólico, se observa que en los tratamientos de menor potencia la temperatura llegó a ser hasta 3°C más elevada en los extractos hidroalcohólicos, mientras que a medida que se aumentó la potencia la temperatura fue hasta 2°C más elevada en los extractos acuosos. Esto fue debido a que la temperatura de ebullición del etanol (78°C) es menor que la del agua, con lo cual se evaporó antes (Velasco, 2014).

En la tabla 43, se muestra las condiciones de tratamiento y la densidad energética de los tratamientos que mostraron mayor contenido de compuestos de interés al ser tratados mediante MWAE los residuos de tomate.

Tabla 43. Condiciones de tratamiento y densidad energética aplicada en los diferentes tratamientos de extracción asistida mediante microondas (MWAE) de los residuos de Tomate.

Tratamiento	Peso (kg)	Tiempo (h)	Potencia emitida	Potencia eflorada	Potencia absorbida	D.E. (W h/kg)
TE acuoso 2000-9	0,55	0,15	2000	1258,93	741,07	202,11
TE acuoso 3000-9	0,550	0,15	3000	1480,04	1519,96	414,53
TE acuoso 4000-6	0,55	0,10	4000	1561,80	2438,20	443,31
TE acuoso 4000-9	0,55	0,15	4000	1637,92	2362,08	644,20
TE etanólico 2000-9	0,55	0,15	2000	1361,78	638,22	174,06
TE etanólico 3000-9	0,55	0,15	3000	1653,52	1346,48	367,22
TE etanólico 4000-6	0,55	0,10	4000	1678,12	2321,88	422,16
TE etanólico 4000-9	0,55	0,15	4000	1718,70	2281,30	622,17

[Tomate extracto (TE) – disolvente - potencia emitida en W – tiempo en minutos]. D.E.: densidad energética.

Como se muestra en la tabla 43, a medida que aumentó la potencia del tratamiento aumentó la densidad energética, al igual que en los experimentos realizados por Bobby Shekarau et al. (2023) en el secado convectivo y por MW de col blanca. La densidad energética fue mayor en los ensayos para obtener extractos acuosos que en los ensayos para obtener extractos hidroalcohólicos, viéndose diferencias de entre 21 y 48 W h/kg más de densidad energética en los extractos acuosos. Debido a que el binomio tiempo/temperatura que se necesitó para evaporar el agua fue mayor y por lo tanto se utilizó mayor energía.

Capacidad antioxidante

De los extractos obtenidos se determinó la cantidad de polifenoles y la capacidad antioxidante DPPH y FRAP (tabla 44).

Tabla 44. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los extractos de tomate.

Subproducto	Extracto acuoso			Extracto hidroalcohólico		
	Polifenoles totales (mg/kg ácido gálico)	DPPH (μmol trolox inicial /g producto)	FRAP (μmol TE/mg producto)	Polifenoles totales (mg/kg ácido gálico)	DPPH (μmol trolox inicial /g producto)	FRAP (μmol TE/mg producto)
TE 1000-3	0,63 \pm 0,03 ^a	0,19 \pm 0,00 ^b	4,13 \pm 0,04 ^{ab}	0,03 \pm 0,01 ^a	0,18 \pm 0,01 ^a	4,14 \pm 0,04 ^a
TE 1000-6	0,77 \pm 0,13 ^a	0,19 \pm 0,01 ^{bc}	4,43 \pm 0,05 ^{bc}	0,12 \pm 0,05 ^a	0,20 \pm 0,01 ^{ab}	4,86 \pm 0,18 ^a
TE 1000-9	1,19 \pm 0,12 ^{ab}	0,21 \pm 0,00 ^d	4,70 \pm 0,16 ^c	0,33 \pm 0,05 ^a	0,25 \pm 0,00 ^{bc}	6,27 \pm 0,04 ^a
TE 2000-3	1,76 \pm 1,45 ^{abc}	0,18 \pm 0,00 ^b	4,08 \pm 0,13 ^a	0,04 \pm 0,02 ^a	0,16 \pm 0,01 ^a	3,87 \pm 0,05 ^a
TE 2000-6	2,19 \pm 1,02 ^{bcd}	0,23 \pm 0,00 ^e	5,37 \pm 0,13 ^d	1,76 \pm 1,58 ^a	0,34 \pm 0,01 ^d	8,58 \pm 0,28 ^a
TE 2000-9	3,62 \pm 1,83 ^e	0,32 \pm 0,01 ^g	8,20 \pm 0,51 ^h	8,32 \pm 0,25 ^a	0,53 \pm 0,01 ^e	14,80 \pm 1,21 ^a
TE 3000-3	1,30 \pm 0,63 ^{ab}	0,19 \pm 0,00 ^{bc}	5,95 \pm 0,36 ^e	2,66 \pm 0,50 ^a	0,28 \pm 0,01 ^{cd}	6,92 \pm 0,67 ^a
TE 3000-6	2,84 \pm 0,41 ^{cde}	0,29 \pm 0,00 ^f	6,97 \pm 0,04 ^f	5,01 \pm 0,21 ^a	0,48 \pm 0,02 ^e	12,31 \pm 0,56 ^a
TE 3000-9	5,64 \pm 0,74 ^f	0,41 \pm 0,01 ^h	10,16 \pm 0,00 ⁱ	10,02 \pm 0,30 ^a	0,64 \pm 0,02 ^e	17,31 \pm 0,66 ^a
TE 4000-3	1,29 \pm 0,12 ^{ab}	0,20 \pm 0,00 ^c	4,73 \pm 0,01 ^c	7,27 \pm 0,19 ^a	0,32 \pm 0,01 ^d	8,91 \pm 0,85 ^a
TE 4000-6	3,19 \pm 0,49 ^{de}	0,31 \pm 0,00 ^g	7,78 \pm 0,11 ^g	7,84 \pm 0,72 ^a	0,53 \pm 0,02 ^e	17,17 \pm 2,53 ^a
TE 4000-9	5,19 \pm 0,08 ^f	0,41 \pm 0,00 ^h	10,64 \pm 0,07 ^j	21,46 \pm 4,24 ^b	2,05 \pm 0,12 ^f	24,68 \pm 3,53 ^b

Valor medio \pm desviación estándar. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.05$). [Tomate extracto (TE) - potencia emitida en W - tiempo en minutos].

En el caso de los polifenoles que se determinaron en los extractos acuosos de tomate, vistos en la tabla 44, se encontraron diferencias significativas entre los extractos obtenidos con las potencias bajas y medias y los extractos obtenidos con potencias altas cuando se aumentó el tiempo de tratamiento sobre todo a 9 minutos. Por ejemplo, no existen diferencias entre los valores de los tratamientos de 3000W y 4000 W durante 9 minutos, ni en el caso de los que el tiempo de tratamiento fue de 6 minutos utilizando potencias de 2000W, 3000W y 4000W. Sin embargo, en los extractos hidroalcohólicos, no se encontraron diferencias significativas excepto con el tratamiento de 4000W de potencia durante 9 minutos, que fue el que mayor resultado mostró. Este extracto hidroalcohólico de tomate tuvo 4,3 veces más polifenoles que el de mayor contenido de los acuosos. Porque los polifenoles por sus enlaces moleculares, enlaces covalentes, reaccionan más con el etanol-agua, que sólo con agua.

Además, en la tabla 44 se observa que, hasta el tratamiento de 2000W 6 minutos, mostraron mayor contenido de polifenoles los extractos acuosos, pero que, a partir de ese tratamiento, a medida que aumentó la potencia se recuperaron más polifenoles en los extractos hidroalcohólicos.

Como puede observarse en la tabla 44, para la capacidad antioxidante DPPH, tanto los extractos hidroalcohólicos como los extractos acuosos tuvieron contenidos similares, excepto con el tratamiento de potencia de 4000W durante 9 minutos, que es con el que más se extrajo, 19,6 veces mayor que en su homólogo acuoso.

Sin embargo, para la capacidad antioxidante FRAP, los valores fueron similares entre los extractos acuosos e hidroalcohólicos hasta que se utilizó la potencia de 2000W, viéndose una mayor extracción en los compuestos hidroalcohólicos. Esta diferencia se vio sobre todo en el tratamiento con potencia más alta, en el que la capacidad antioxidante FRAP fue 2,3 veces mayor en el hidroalcohólico.

Además, en todos los casos mostrados en la tabla 44, con la misma potencia, al aumentar el tiempo se vio un aumento del contenido de polifenoles y actividad antioxidante. Tanto lo expuesto anteriormente para FRAP como DPPH, es debido al efecto que tuvo el aumento del tiempo y por ende de la temperatura en ese tratamiento, que consiguió la ruptura de la célula.

Si comparamos los antioxidantes al utilizar cada potencia con el mismo tiempo se observa en la tabla 44, como en los extractos acuosos al utilizar 2000W, 3000W y 4000W se encontraron diferencias al aumentar el tiempo a 6 y 9 minutos. Sin embargo, en los extractos hidroalcohólicos se extrajeron más antioxidantes al aumentar en todos los tiempos de tratamiento la potencia, excepto en el caso del FRAP, que se mantuvo sin diferencias significativas hasta el tratamiento de 4000W 9 minutos.

Baltacıoglu et al. (2021) utilizaron MWAE con unas potencias de 360W, 600W y 900 W y tiempos de 30, 60 y 90 s sobre tomate fresco, obteniendo las mismas conclusiones ya que con el método MWAE los polifenoles totales y la capacidad antioxidante DPPH y FRAP aumentaron a medida que se incrementó la potencia y el tiempo durante la extracción.

Contenido en licopeno

Los resultados del contenido en licopeno de los residuos de tomate se reflejan a continuación, en la tabla 45.

Tabla 45. Licopeno en los extractos de tomate.

Subproducto	Extracto acuoso	Extracto hidroalcohólico
TE 1000-3	0,49 ± 0,09 ^a	0,52 ± 0,55 ^a
TE 1000-6	0,84 ± 0,14 ^{bc}	0,63 ± 0,54 ^a
TE 1000-9	0,48 ± 0,26 ^a	0,79 ± 0,90 ^a
TE 2000-3	0,71 ± 0,06 ^{ab}	0,29 ± 0,37 ^a
TE 2000-6	1,09 ± 0,19 ^c	1,40 ± 0,62 ^a
TE 2000-9	1,53 ± 0,24 ^d	3,86 ± 0,21 ^{ab}
TE 3000-3	0,94 ± 0,16 ^{bc}	0,88 ± 0,53 ^a
TE 3000-6	1,04 ± 0,06 ^c	3,25 ± 0,43 ^{ab}
TE 3000-9	1,98 ± 0,10 ^e	6,43 ± 0,40 ^b
TE 4000-3	0,40 ± 0,06 ^a	1,91 ± 0,59 ^a
TE 4000-6	0,99 ± 0,15 ^{bc}	7,62 ± 0,76 ^b
TE 4000-9	2,41 ± 0,46 ^f	13,53 ± 1,02 ^c

Valor medio ± desviación estándar. Datos expresados en mg/kg. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos (P < 0.05). [Tomate extracto (TE) – número potencia en W - tiempo en minutos].

Para el licopeno como se muestra en la tabla 45, tanto en los extractos acuosos como hidroalcohólicos, no se encontraron diferencias significativas excepto con el tratamiento de 4000W de potencia en el mayor tiempo. Esto quiere decir que hubo una mayor extracción con los tiempos más largos y potencias altas. Además, se encontró una mayor extracción en los extractos hidroalcohólicos. Si comparamos la extracción de licopeno a 4000W de potencia durante 9 minutos, en el extracto hidroalcohólico se encontraron 5,6 veces más cantidad de licopeno que en el extracto acuoso de tomate porque el disolvente mezcla agua etanol favorece la extracción de polifenoles.

Por otro lado, en todos los casos, se aumentó la extracción con la misma potencia a medida que se aumentó el tiempo de tratamiento, por lo que el licopeno se vio afectado por la potencia y por el tiempo de aplicación de MWAE.

Autores como Ho et al. (2015) pudieron extraer mediante MWAE 0,13593 mg/g de licopeno de residuos de tomate. Valores mayores que en este estudio, porque utilizaron como solvente acetato de etilo y hexano, y una potencia MW de 400W, mucho menor que las estudiadas en la presente tesis doctoral. En el mismo estudio al utilizar 1600W durante 30 segundos se obtuvieron 0,092 mg/g, valor mayor porque el tiempo de tratamiento es mucho más corto. Pero al igual que en este trabajo, se demostró que con el MWAE se puede obtener licopeno con diferentes solventes, aunque en

concentraciones bajas dependiendo del disolvente utilizado. Además, Ho et al.; 2015, llegaron a la conclusión de que el sobrecalentamiento de los componentes celulares polares mejoró la migración del licopeno al disolvente de extracción, mientras que los cortos tiempos de tratamiento limitaron la exposición al calor de los componentes no polares.

Esta tecnología es eficaz para la extracción de compuestos bioactivos como el quitosano de desechos de camarón, aunque afectaban considerablemente a las propiedades fisicoquímicas de los productos. Por lo que hay que optimizar los procesos de extracción mediante MWAE a 650W durante 6 u 8 minutos (Mohammadi et al., 2023).

1.4.2. Extracción asistida por pulsos eléctricos de intensidad moderada (PEFAE)

Tanto en los subproductos líquidos de tomate como en los sólidos que se obtuvieron mediante PEFAE se analizaron los polifenoles, las capacidades antioxidantes DPPH y FRAP, y el licopeno.

- Subproductos líquidos:

Capacidad antioxidante

Todos los resultados de capacidad antioxidante se pueden ver en la tabla 46.

Tabla 46. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los subproductos de tomate obtenidos mediante extracción asistida por pulsos eléctricos (PEFAE).

Subproducto	Líquidos		
	Polifenoles totales (mg/kg ácido gálico)	DPPH (μmol trolox inicial /g producto)	FRAP (μmol TE/mg producto)
0,5 kV/cm 10 p	0,05 \pm 0,03 ^a	0,17 \pm 0,00 ^b	3,75 \pm 0,02 ^b
0,5 kV/cm 25 p	0,01 \pm 0,00 ^a	0,05 \pm 0,00 ^a	1,06 \pm 0,02 ^a
1 kV/cm 10 p	0,76 \pm 0,62 ^b	0,17 \pm 0,00 ^b	3,87 \pm 0,10 ^b
1 kV/cm 25 p	0,14 \pm 0,18 ^a	0,05 \pm 0,00 ^a	1,09 \pm 0,01 ^a
2 kV/cm 10 p	0,17 \pm 0,02 ^a	0,05 \pm 0,00 ^a	1,06 \pm 0,00 ^a
2 kV/cm 25 p	0,12 \pm 0,02 ^a	0,05 \pm 0,00 ^a	1,03 \pm 0,01 ^a

Valor medio \pm desviación estándar. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre los tratamientos con Pulsos eléctricos ($P < 0.05$). p: pulsos.

Como se puede observar en la tabla 46, tanto para polifenoles como para DPPH y FRAP, se encontró mayor capacidad antioxidante al utilizar una intensidad media/baja de pulsos. Cuando se aumentó la cantidad de pulsos a 25 con intensidad 1 kV/cm o se aumentó la intensidad de pulso a 2 kV/cm se disminuyó la capacidad antioxidante de los

subproductos. Hecho que se dio porque a mayor intensidad de campo eléctrico y número de pulsos los compuestos antioxidantes se destruyeron. Kit Leong et al. (2021), descubrieron que para la extracción de los compuestos fue mejor utilizar una potencia media/baja y que otros autores consiguieron extraer antioxidantes utilizando intensidades de pulso entre 0,8 y 1 kV/cm en hongos, pero con un número de pulsos de 2.

Contenido en licopeno

El licopeno se comportó igual que los antioxidantes, como se refleja en la tabla 47.

Tabla 47. Licopeno en los subproductos de tomate obtenidos mediante extracción asistida por pulsos eléctricos (PEFAE).

Subproducto	Líquidos
0,5 kV/cm 10 p	0,09 ± 0,05 ^b
0,5 kV/cm 25 p	0,02 ± 0,01 ^a
1 kV/cm 10 p	0,13 ± 0,04 ^b
1 kV/cm 25 p	0,01 ± 0,00 ^a
2 kV/cm 10 p	0,02 ± 0,00 ^a
2 kV/cm 25 p	0,09 ± 0,04 ^a

Valor medio ± desviación estándar. Datos expresados en mg/kg. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre los tratamientos con Pulsos eléctricos (P < 0.05). p: pulsos.

Tanto en la capacidad antioxidante como en el licopeno de los subproductos líquidos de tomate extraídos mediante PEFAE, el tratamiento que mostró diferencias significativas con todos fue el de 1 kV/cm 10 p, con valores superiores en cada uno de los casos. Cuando se aumentó la intensidad del campo eléctrico, el contenido en licopeno disminuyó, de igual modo que lo comentado anteriormente con los polifenoles y demostrado por Kit Leong et al. (2021), algo que no ocurría al tratar el tomate con MW.

- Subproductos sólidos:

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de los análisis de capacidad antioxidante y licopeno que se obtuvieron en los subproductos sólidos de tomate obtenidos mediante PEFAE, utilizados para la combinación del tratamiento PEFAE con MWD.

Capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante se analizó en los residuos sólidos del PEFAE (tabla 48).

Tabla 48. Polifenoles totales, actividad antioxidante DPPH y FRAP en los subproductos de tomate obtenidos mediante extracción asistida por pulsos eléctricos (PEFAE).

Subproducto	Sólidos		
	Polifenoles totales (mg/kg ácido gálico)	DPPH (μmol trolox inicial /g producto)	FRAP (μmol TE/mg producto)
0,5 kV/cm 10 p	43,71 \pm 5,37 ^a	2,60 \pm 0,04 ^a	93,41 \pm 1,87 ^a
0,5 kV/cm 25 p	39,15 \pm 20,28 ^a	3,60 \pm 0,09 ^e	112,03 \pm 4,07 ^d
1 kV/cm 10 p	66,73 \pm 1,42 ^b	3,08 \pm 0,09 ^c	98,67 \pm 2,91 ^{ab}
1 kV/cm 25 p	31,53 \pm 6,84 ^a	3,38 \pm 0,10 ^d	108,15 \pm 7,66 ^{cd}
2 kV/cm 10 p	62,61 \pm 1,39 ^b	2,86 \pm 0,06 ^b	105,95 \pm 0,94 ^{bcd}
2 kV/cm 25 p	49,27 \pm 2,80 ^{ab}	2,82 \pm 0,04 ^b	102,74 \pm 4,75 ^{bc}

Valor medio \pm desviación estándar. p: pulsos. Datos expresados en materia seca. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre los tratamientos con Pulsos eléctricos ($P < 0.05$).

En la tabla 48, al comparar los polifenoles totales y la capacidad antioxidante DPPH; en los diferentes tratamientos, con sus diferencias significativas, se observó que aumentó su contenido al aumentar la potencia de 0,5 a 1 kV/cm, aunque cuando se aumentó de 1 a 2 kV/cm no se mejoró su contenido porque se mejoró la extracción de los compuestos al líquido. Sin embargo, si se observaron diferencias significativas en la capacidad antioxidante FRAP, el valor aumentó al aumentar el número de pulsos en la misma intensidad de pulso, hasta que la intensidad fue de 2 kV/cm, que provocó disminución del contenido. Lo expuesto anteriormente es debido a que al aumentar la intensidad y el número de pulsos se afectó a los compuestos negativamente.

Por lo tanto, con lo que se muestra en la tabla anterior, al aplicar los PEFAE en los subproductos de tomate, se encontraron los mayores resultados de polifenoles y capacidad antioxidante, en los tratamientos que se aplicaron 0,5 kV/cm 10 p y 1 kV/cm 10 p, con valores de 66,7 mg/kg ácido gálico en polifenoles, 3,4 μmol trolox inicial /g producto en la capacidad antioxidante DPPH y 108,1 μmol TE/mg producto en la capacidad antioxidante FRAP. Hecho demostrado por Andreou et al. (2020), que encontraron 56,16 mg de ácido gálico/kg de polifenoles en los subproductos de tomate

tratados con PEFAE, valor muy similar al que se muestra en la tabla 48, pero utilizando intensidad y número de pulsos diferentes, 2kV/cm y 200 pulsos.

Contenido en licopeno

Al igual que en los demás subproductos de tomate, en este también se analizó el licopeno, obteniéndose los siguientes resultados (tabla 49).

Tabla 49. Licopeno en los subproductos de tomate obtenidos mediante extracción asistida por pulsos eléctricos (PEFAE).

Subproducto	Sólidos
0,5 kV/cm 10 p	80,61 ± 29,94 ^{bc}
0,5 kV/cm 25 p	53,67 ± 7,20 ^{abc}
1 kV/cm 10 p	85,35 ± 30,23 ^c
1 kV/cm 25 p	39,82 ± 9,92 ^a
2 kV/cm 10 p	52,96 ± 15,28 ^{abc}
2 kV/cm 25 p	48,10 ± 3,80 ^{ab}

Valor medio ± desviación estándar. Datos están expresados en mg/kg en materia seca. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre los tratamientos con Pulsos eléctricos ($P < 0.05$). p: pulsos.

El mayor contenido en licopeno mostrado en la tabla 49, al igual que los polifenoles, se encontró en la parte sólida que se obtiene al aplicar los PEFAE en los residuos de tomate. Además, la extracción fue mayor cuando se utilizó un mayor número de pulsos y estos fueron de mayor intensidad, porque al aplicar 25 pulsos o usar una intensidad de 2 kV/cm se disminuyó el contenido de esa sustancia en el sólido, viéndose el mayor resultado al aplicar 1 kV/cm 10 p (85,35 mg/kg). Demostrando que la intensidad y el número de pulsos más elevado afectó a la estructura celular y provocó la extracción de los compuestos al solvente.

Otros autores también estudiaron la extracción de licopeno de residuos de tomate mediante PEFAE. Por ejemplo, Méndez-Carmona et al. (2022) en su review, encontraron que Andreou et al. (2020), que estudiaron potencias entre 1–5 kV/cm, y 0-500 pulsos, a diferencia de los valores obtenidos en esta tesis doctoral, en la que sí aumentó hasta un punto concreto, obtuvieron mayores valores de licopeno con las condiciones de PEFAE más intensas. Sin embargo, Pataro et al. (2018) y Andreou, et al. (2020), corroboran los resultados de la tabla 49, porque mejoraron la extracción de licopeno con 0,5 kV/cm y 1 kV/cm, viéndose una disminución a medida que aumentó la intensidad del pulso. La diferencia de los tratamientos de estos autores fue que utilizaron intensidades entre 0,25 y 5 kV/cm y números de pulsos variados desde 2 hasta 200.

Dukic et al. (2023) estudiaron la PEFAE con agua como disolvente verde, representando una nueva y prometedora técnica no térmica para la extracción de proteínas de hojas

de remolacha, que se pueden utilizar para la incorporación en alimentos. Aunque esta tecnología es menos eficiente que los USAE. Por tanto, encontraron que el desarrollo de nuevos productos a partir de residuos no sólo reduciría el problema de la escasez de alimentos en el mundo, sino que también reduciría el impacto nocivo sobre el medio ambiente.

1.4.3. Combinación de las dos tecnologías (PEFAE y MWD)

En los subproductos de tomate obtenidos mediante la combinación del tratamiento PEFAE con MWD, 0,5 kV/cm 10p y 1 kV/cm 10p 3000W 5 minutos, se analizó la α_w , dando un valor de 0,85 y 0,82 respectivamente y valores de humedad de 7,65% y 18,08%. Valores mayores que en los subproductos tratados sólo con MWD, que mostraron que no inhiben del crecimiento microbiano. Esto puede ser debido al cambio estructural que han podido producir los PEFAE en el subproducto.

El resultado de antioxidantes cuando se combinaron estas dos tecnologías fue de 131,59 mg/kg ácido gálico para polifenoles totales, 0,89 μmol trolox inicial /g producto para DPPH, 61,49 μmol TE/mg producto para FRAP y 34,04 mg/kg para el licopeno si mezclamos los tratamientos de 0,5 kV/cm 10p 3000W 5 min. Mientras que al combinar los tratamientos de 1kV/cm 10p 3000W 5 min los resultados obtenidos fueron 162,05 mg/kg ácido gálico para polifenoles totales, 0,98 μmol trolox inicial /g producto para DPPH, 72,84 μmol TE/mg producto para FRAP y 31,57 mg/kg para el licopeno.

La cantidad de polifenoles fue mayor en el subproducto obtenido mediante la combinación de las dos tecnologías en comparación con los resultados obtenidos del subproducto sólido de PEFAE (tabla 48), mientras que el contenido de licopeno, DPPH y FRAP fue menor como se muestra en las tablas 48 y 49. Porque los polifenoles fueron más resistentes al aumento de temperatura por su estructura molecular.

En el subproducto de tomate ocurrió lo mismo que en los residuos tratados anteriormente, se obtuvo el mayor contenido de polifenoles mediante el tratamiento MWD (tabla 40). Este resultado fue 3,24 veces mayor que con los PEFAE (tabla 48), y 1,4 veces mayor que en la combinación de tratamientos. Sin embargo, al evaluar la capacidad antioxidante de los subproductos de tomate, se observó que se conservó en mayor medida con los tratamientos en los que se utilizó sólo PEFAE. Para la capacidad antioxidante DPPH fue 2,7 μmol trolox inicial /g producto mayor con respecto a la MWD y la combinación de ambas, mientras que para la capacidad antioxidante FRAP fue 31 μmol TE/mg producto mayor con respecto a MWD y 40 μmol TE/mg producto con respecto a la combinación de las dos tecnologías. Con el aumento de temperatura en el MWD, el contenido en licopeno, al ser termolábil, se redujo. Por ello se obtuvo un mayor resultado en licopeno al aplicar sólo PEFAE. Esto pudo ser debido a que los polifenoles

son los compuestos que mejor resisten al aumento de temperatura, y que la intensidad de los tratamientos PEFAE no fue suficiente para su extracción.

Por tanto, teniendo en cuenta el contenido de antioxidantes y los tiempos de tratamiento el mejor tratamiento fue el de MWD, aunque con los PEFAE se conservó mejor la capacidad antioxidante, pero en menor medida que los polifenoles. Además, mediante el tratamiento MWD se permitió el almacenamiento del subproducto durante más tiempo sin crecimiento microbiano, por su bajo contenido en humedad y α_w .

Según Nandhu Lal et al. (2021) y Punia Bangar et al. (2024) la combinación de tecnologías no térmicas como la PEFAE con MWD, permitió una mayor extracción de compuestos de interés como las pectinas o aceites esenciales, siendo técnicas seguras y respetuosas con el medio ambiente; y reduciendo el tiempo de procesamiento y la dependencia de solventes dañinos.

1.5. Efecto del tratamiento con microondas para la deshidratación (MWD) del alperujo

Durante el tratamiento de deshidratación se tomó la temperatura alcanzada por el alperujo, para poder realizar el perfil de temperatura mostrado en la figura 36. Cuando se utilizó la potencia de 1000W se observó que la temperatura máxima se alcanzó en 18 minutos, mientras que con la potencia de 4000W se redujo el tiempo hasta 4,5 minutos, un 75% menos de tiempo. Según la gráfica el tiempo de tratamiento se redujo a medida que se aumentó la potencia del microondas.

Por otro lado, en esa misma figura, se muestra como el tratamiento que mayor temperatura alcanzó fue el de 4000W de potencia, alcanzando aproximadamente 200°C, mientras que en los tratamientos con las potencias de 3000W y 2000W de potencia se alcanzaron unos 150-160°C, y en el de 1000W de potencia 115°C. Las temperaturas tan elevadas alcanzadas, se deben a que el producto se ha carbonizado porque se ha evaporado todo el agua disponible y la temperatura sigue subiendo, tal y como demostró Bo-Lin et al. (2023) en su estudio de deshidratación de piña.

Además, como se observa en esta gráfica la subida de temperatura fue lineal sin mostrar muchas fluctuaciones.

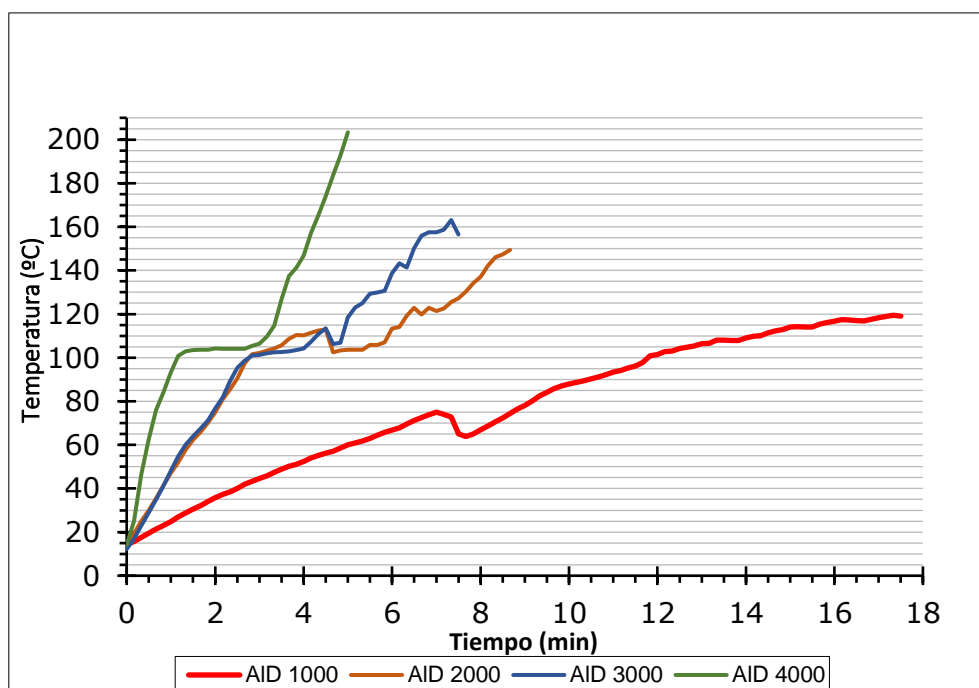


Figura 36. Perfil de temperatura durante los tratamientos de deshidratado mediante microondas (MWD) de alperujo. Leyenda: Alperujo deshidratado (AID) - potencia emitida en W.

La toma de muestras en el tratamiento de 1000W durante 45 minutos se realizó a 15, 30 y 45 minutos, en el de 2000W 15 minutos a los 5, 10 y 15 minutos, en el de 3000W 10 minutos a los 5 y 10 minutos y en el de 4000W 5 minutos a los 5 minutos. En la figura 37 se puede ver la evolución de la humedad del subproducto durante los diferentes tratamientos, calculada con los resultados de las muestras.

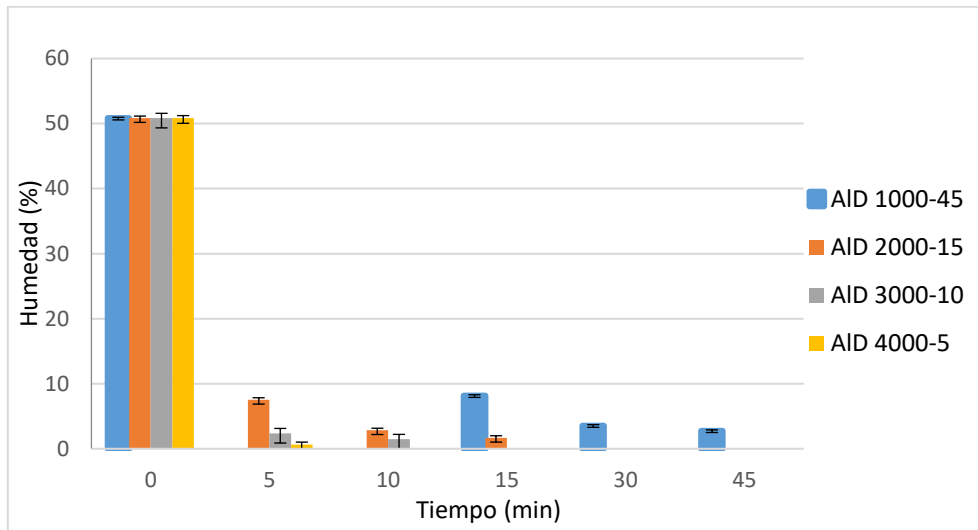


Figura 37. Evolución de la humedad para cada tratamiento de deshidratado mediante microondas (MWD) en el Alperujo. Leyenda: Alperujo deshidratado (AID) - potencia emitida en W - tiempo en minutos.

Los tratamientos que permitieron conseguir un menor tiempo y menor humedad fueron utilizando 3000W y 4000W de potencia, donde se consiguió reducir la humedad inicial del 50,8 % a 1,5% y 0,6% respectivamente. Además, cuando se usó la potencia de 4000W, se encontró un punto en el que la subida de la temperatura fue muy rápida y no se pudo controlar la bajada de humedad, con lo cual el resultado de humedad fue muy bajo (0,6%) en 5 minutos.

Para la deshidratación del alperujo por debajo del 5% de humedad los 4 tratamientos seleccionados fueron: 1000 W durante 45 minutos, 2000 W durante 15 minutos, 3000 W durante 10 minutos y 4000 W durante 5 minutos.

A continuación, se muestra en la figura 38 el aspecto de los subproductos del alperujo tratados mediante MWD.

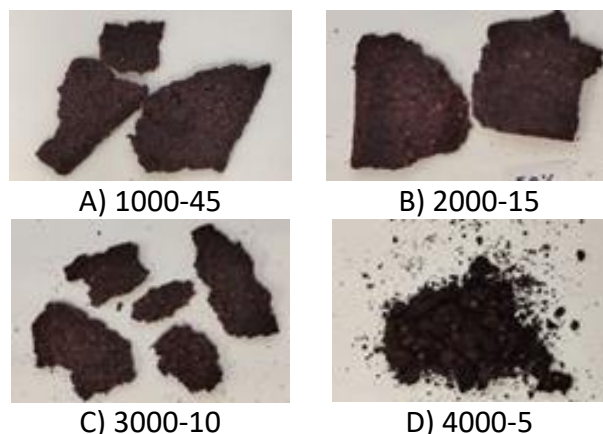


Figura 38. Aspecto de los subproductos del alperujo después del tratamiento de deshidratado mediante microondas (MWD). Leyenda: Potencia emitida en W - tiempo en minutos.

Independientemente de la potencia utilizada, el alperujo, con un contenido de grasa entre 8% y 10% (INTA, 2015), se carbonizó durante los anteriores tratamientos MWD, porque se alcanzaron temperaturas por encima de 115°C. Tanto en el estudio de Abu Tayeh et al. (2020) en que utilizó el pretratamiento con MWD a 140°C durante 10 minutos y utilizó solventes como ácido fórmico 0,6 M en agua desionizada (DW) o ácido sulfúrico, como en el de Padilla et al. (2021) que utilizó MWD alcanzando los 200 o 170°C con o sin solvente 0.2 M FeCl₃, se demostró que se podía obtener compuestos del alperujo pero utilizando solventes, aunque se generaron compuestos no deseados. Esto quiere decir que sin solventes se destruyeron los compuestos de interés, y además se formaron compuestos perjudiciales como el ácido acético o el furfural como demostraron Abu Tayeh et al., 2020; y Cecchi et al., 2023.

La industria alimentaria tiende a reutilizar los residuos agroalimentarios, pero ante la imposibilidad de destinar muchos recursos a los residuos con poco valor económico, necesita mejorar para llegar a llevar a cabo una economía circular. Para deshidratar el alperujo habría que utilizar potencias menores, pero mucho tiempo, inviable en una industria, porque aumentaría el coste del proceso de producción, es por este motivo, que el alperujo se descartó como residuo para tratar con la tecnología microondas.

Al utilizar el microondas para secar el alperujo se alcanzaron temperaturas mayores de 120°C y tal y como encontraron Esparza et al. (2016) en su estudio del efecto de la temperatura sobre los antioxidantes de zumo de mandarina, los compuestos de interés, como los polifenoles, se degradan más que con temperaturas menores, por lo que no tiene sentido caracterizar.

1.6. Efecto del tratamiento con microondas para la deshidratación (MWD) de la fresa

En la figura 39, se ve que cuando se utilizaron potencias de 1000W y 2000W la temperatura máxima se alcanzó en aproximadamente 20 minutos, mientras que si se utilizaron potencias de 3000W y 4000W se redujo el tiempo hasta en 10 minutos.

Además, la temperatura alcanzada durante el tratamiento con microondas para el residuo de fresa osciló entre 100°C con la potencia de 1000W y 163°C con la potencia del 4000W. Cuando se utilizó la mayor potencia el calentamiento fue demasiado rápido, provocando un incremento térmico que carbonizó la fruta, al igual que en el estudio realizado por Jiang et al., 2021. Una vez se evaporó el agua (100°C), se empezó a carbonizar, así que si la temperatura se aumentó por encima de 120°C fue normal que se carbonizara.

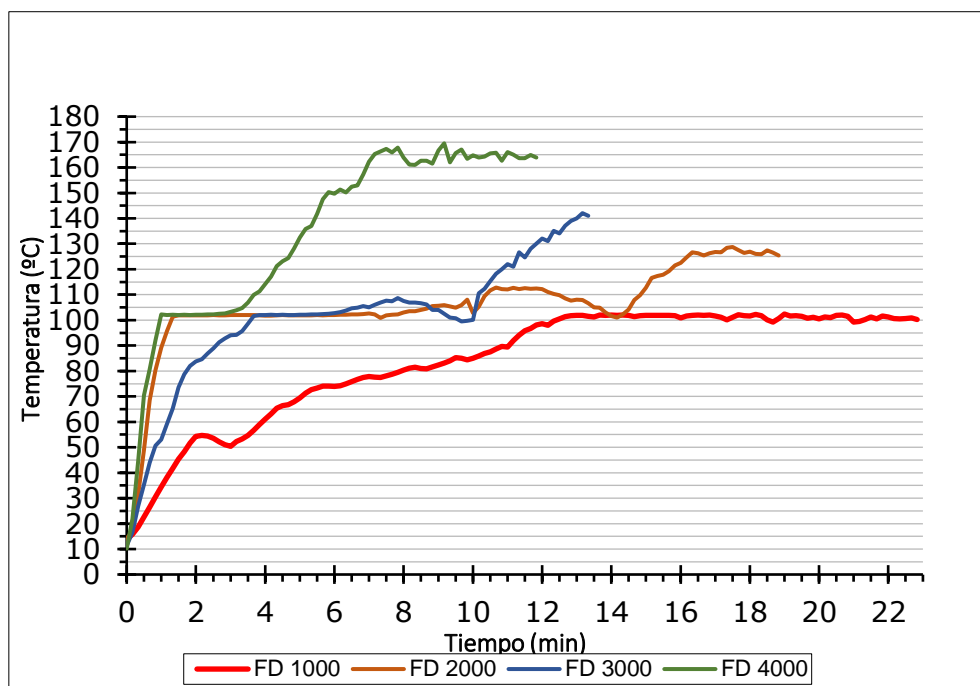


Figura 39. Perfil de temperatura durante los tratamientos de deshidratado mediante microondas (MWD) de residuos de fresa. Leyenda: Fresa deshidratada (FD) - potencia emitida en W.

En los tratamientos de 1000W, 2000W y 3000W se necesitó un tiempo elevado para deshidratar el residuo: 50, 40 y 40 minutos respectivamente, mientras que con 4000W disminuyó en gran medida el tiempo de tratamiento, 8 min, aumentando la pérdida de agua al igual que lo mostrado en el estudio de Jiang et al. (2021) en su liofilización mediante microondas en el que no sobrepasaron los 60°C.

En la figura 40 se muestra la evolución de la humedad durante los tratamientos MWD. Los tiempos en los que se cogió la muestra para calcular esa evolución fueron: en el tratamiento de 1000W durante 50 minutos se tomaron a 25, 40 y 50 minutos, en el de 2000W 40 minutos a los 15, 25 y 40 minutos, en el de 3000W 40 minutos a los 15, 25 y 40 minutos y en el de 4000W 8 minutos a los 8 minutos.

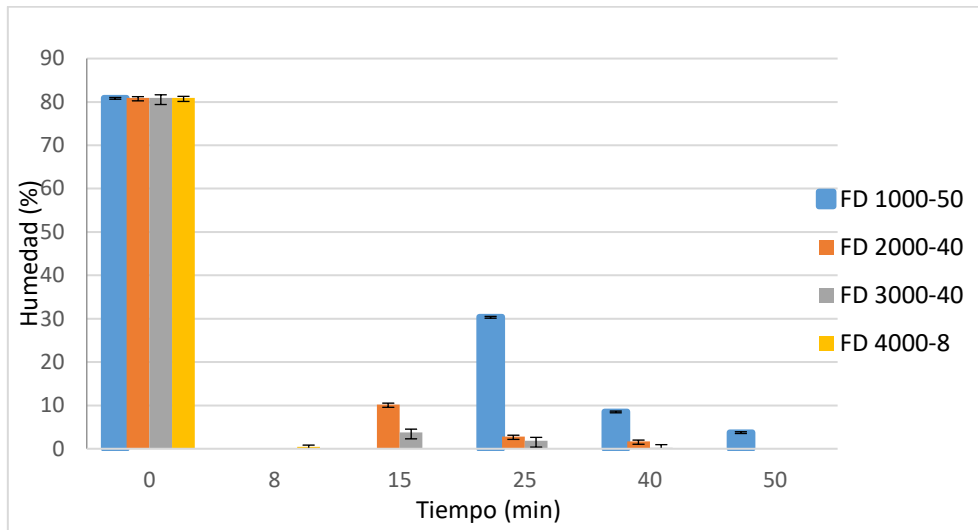


Figura 40. Evolución de la humedad para cada tratamiento de deshidratado mediante microondas (MWD) en los residuos de fresa. Leyenda: Fresa deshidratada (FD) - potencia emitida en W - tiempo en minutos.

Para los residuos de fresa se consiguió reducir la humedad del 80,9% inicial, a valores de entre 3,8 y 0,2 %, observándose que en el tratamiento en el que se utilizó menor tiempo y se alcanzó un menor valor de humedad, fue el tratamiento de 4000W de potencia.

Con menor potencia, 1000W, el tiempo de tratamiento fue largo, 50 minutos, pero no se elevó excesivamente la temperatura y se redujo en gran medida la humedad de la fresa minimizando el riesgo de sobrecalentamiento de la muestra.

En todas las pruebas al tratar el residuo de fresa con el microondas se observó (figura 41) un oscurecimiento y olor desagradable, características que aumentaron a medida que aumentó la potencia del tratamiento. Esto se puede deber a que los azúcares que contienen los residuos de fresa: 2,6% de glucosa, 2,3% de fructosa y 1,3% de sacarosa (Chordi et al. 2013) se carbonizaron, ya que los azúcares comienzan a quemarse a partir de una temperatura de 40°C (Jiang et al., 2021).

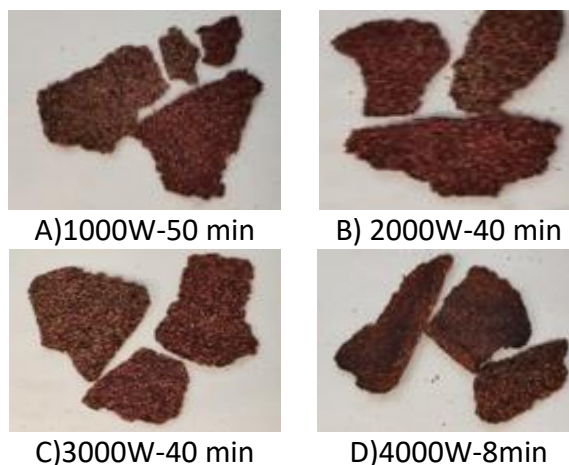


Figura 41. Aspecto de los subproductos de fresa después del tratamiento de deshidratado mediante microondas (MWD). Leyenda: Potencia emitida en W - tiempo en minutos.

Se descartó secar los residuos de fresa, porque al deshidratarlos mediante MWD perdieron su aroma característico. Para lograr un buen secado habría que aplicar potencias bajas, tiempos altos y tratamiento intermitente para evitar la carbonización del producto. Por lo tanto, no se puede utilizar un mayor aporte de energía de microondas en todo momento, cuando el contenido de humedad de la fruta es menor, la potencia de las microondas debe reducirse. Una solución a este problema sería, empezar con potencias altas cuando el contenido de humedad es alto, y reducir la potencia según se va secando la muestra. A nivel industrial podría construirse un equipo microondas con varias cavidades que apliquen microondas con diferentes potencias y que tengan unas palas en los espacios intermedios que homogenicen la muestra, todo ello en una línea continua.

2. Incorporación de los subproductos en alimentos

Con los subproductos vegetales obtenidos y seleccionados en la etapa anterior, se desarrollaron diferentes productos alimenticios.

Para cada desarrollo se muestra la composición nutricional analizada en el laboratorio en materia húmeda. Además, se analizó el color y la textura a nivel instrumental y se realizó una evaluación sensorial de cada producto.

2.1. Tomate y Kétchup

Con los subproductos de tomate como se muestra en la figura 42, se desarrollaron dos tipos de productos, una salsa de tomate y un kétchup.



Figura 42. Subproducto de tomate utilizado (A) y salsas obtenidas (B): kétchup (izquierda) y salsa de tomate (derecha).

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos de la caracterización nutricional de los productos elaborados siguiendo una receta estándar (control) y sustituyendo parte del concentrado de tomate por subproducto de tomate en los productos enriquecidos.

Tabla 50. Composición nutricional de la salsa de tomate y Kétchup.

	Salsa tomate control	Salsa tomate	Kétchup control	Kétchup
Aporte energético (Kj/100g)	279,0	370,4	309,0	466,2
Aporte energético (Kcal/100g)	67,0	88,5	74,0	111,4
Grasa total (%)	10,1	2,7	2,7	3,3
Hidratos carbono totales (% glucosa)	9,1	11,5	12	17,1
Hidratos carbono insolubles (%)	-	2,5	-	5,7
Azúcares totales solubles (% glucosa)	26,6	9,0	11,4	11,4
Fibra alimentaria (%)	1,9	5,7	0,6	6,0
Proteína Bruta (%)	2,9	4,2	0,8	3,0
Compuestos fenólicos totales (mg ácido gálico/kg)	-	96,2	-	132,8

Datos expresados en porcentaje (g/ 100g) en peso húmedo excepto la humedad (porcentaje en peso fresco) y Energía (kcal/ 100 g peso seco), y los compuestos fenólicos totales (mg ácido gálico/kg).

Si comparamos con los controles en la tabla 50 se muestra que, las salsas elaboradas con subproductos tuvieron mayor aporte energético, de fibra y proteína, pero menor aporte de grasas y azúcares.

Los dos productos elaborados con subproducto tuvieron un bajo aporte de grasas, pero con un buen contenido en fibra y proteína. Además, conservaron parte de los polifenoles que se encontraban en el subproducto, lo que indicó que se mantuvieron estables durante el procesado.

En el caso de la fibra, en los desarrollos con subproductos se cumplió la alegación, (contenido de una sustancia en un alimento que está legalizado para que aparezca en el etiquetado del alimento, de fuente de fibra, 3g/100g).

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de color y textura en la salsa de tomate y en el Kétchup (tabla 51).

Tabla 51. Parámetros de color y textura de la salsa de tomate y del ketchup.

Muestra	Color						Textura
	L*	a*	b*	C	h	ΔE	Consistencia (g)
Control salsa tomate	53,00 ± 0,20	80,00 ± 0,00	51,00 ± 0,20	4500,50 ± 0,00	0,57 ± 0,00	-	12,55 ± 1,30
Salsa Tomate	41,12 ± 0,40	21,46 ± 0,30	22,56 ± 0,70	485,16 ± 20,95	0,81 ± 0,01	2188,45	16,44 ± 1,10
Control Ketchup	53,00 ± 0,00	80,00 ± 0,10	63,00 ± 0,00	5184,50 ± 0,00	0,67 ± 0,00	-	10,31 ± 0,10
Ketchup	36,02 ± 1,20	21,98 ± 0,80	10,82 ± 1,40	301,41 ± 29,85	0,46 ± 0,04	2601,73	8,24 ± 1,30

Valor medio ± desviación estándar. Control elaborado en la cocina experimental. L*: luminosidad (L=0 rendimientos negro y L=100 indica blanca). a*: posición entre magenta y verde (+a= magenta, frente a -a= verde). b*: posición entre amarillo y azul (+b = amarillo frente a -b= azules). ΔE : diferencia de color. C: croma. h: tono.

El ketchup tuvo un color menos luminoso y tendió menos al color amarillo que la salsa de tomate, sin embargo, con respecto al color rojo tuvieron un color similar, como se muestra en la tabla 51. Si los comparamos con un control, el valor de la luminosidad y del color rojo fue menor en los productos elaborados en esta tesis. El croma (C), en los dos casos fue mayor en el control que en los productos desarrollados para esta tesis. Mientras que el tono, h, fue mayor en la salsa de tomate y menor en el Ketchup. La diferencia de color (ΔE) fue similar entre los dos productos y el control. Esto pudo deberse a que en los desarrollos donde se utilizaron los subproductos se disminuyó la cantidad de concentrado de tomate, ingrediente que aumenta el color rojo y la luminosidad.

Ramírez-Rosas et al. (2019) también analizaron ketchup comerciales en los cuales obtuvieron los siguientes valores para las coordenadas de color: luminosidad de 24, a de 28 y b entre 27 y 21. Si los comparamos con los valores de nuestras salsas la luminosidad fue mayor en las salsas elaboradas en esta tesis, mientras que el color rojo fue más pronunciado en las salsas comerciales y el color amarillento fue similar entre nuestra salsa de tomate y las comerciales pero menor en el ketchup elaborado en esta tesis. Eso podría deberse al color aportado por el residuo de tomate.

En cuanto a la consistencia el ketchup mostró valores más elevados con respecto a la salsa de tomate como cabía esperar, porque es una salsa más espesa. Sin embargo, la consistencia en el control de la salsa de tomate fue mayor que en la salsa de tomate elaborada con subproductos, pero ocurrió lo contrario con el ketchup, posiblemente por la concentración de agua utilizada para la elaboración.

Además, las dos muestras se analizaron sensorialmente, obteniéndose los valores que se presentan en la tabla 52 y en la figura 43.

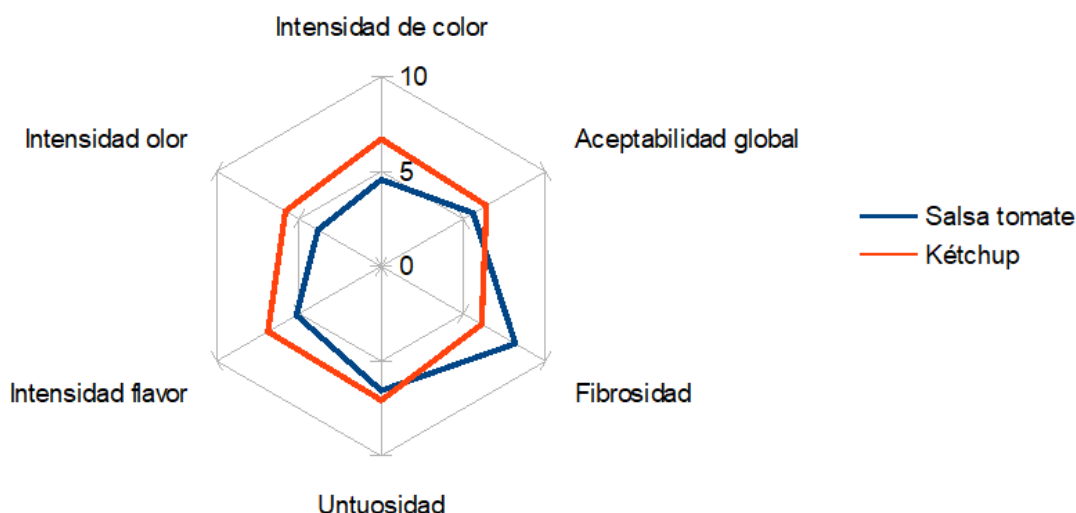


Figura 43. Perfil sensorial de la salsa de tomate y del ketchup

En la figura 43, se puede observar cómo los atributos tuvieron un valor menor en la salsa de tomate, excepto en la fibrosidad que el valor fue mayor en el ketchup.

En la salsa de tomate todos los parámetros analizados se puntuaron con valores aceptables, excepto el de fibrosidad que fue alto. Ello se debió a las fibras aportadas por el subproducto, no obstante, el producto fue apto porque se asemejó a una salsa mezclada con hierbas aromáticas, salsas que también existen en el mercado.

El Ketchup obtuvo valores medios en todos los parámetros, con lo cual se encontró dentro de los rangos de un producto aceptable.

Tabla 52. Test hedónico de la salsa de tomate y del ketchup.

	Salsa tomate	Ketchup
¿Cuánto te gusta el aspecto del producto?	6,9 ± 0,3	7,5 ± 0,5
¿Cuánto te gusta el color de este producto?	6,1 ± 0,1	7,8 ± 0,4
¿Cuánto te gusta el olor de este producto?	5,4 ± 0,5	7,0 ± 0,4
¿Cuánto te gusta el sabor de este producto?	6,2 ± 0,1	6,6 ± 0,5
¿Cuánto te gusta la textura de este producto?	4,3 ± 0,7	5,2 ± 0,6
¿Cuánto te gusta globalmente?	5,6 ± 0,1	6,4 ± 0,5

Valor medio ± desviación estándar.

Como puede observarse en la tabla 52, el tomate gustó en todos los parámetros excepto en la textura, mientras que el ketchup fue mejor valorado, aprobando en todos los parámetros estudiados.

El uso del subproducto de tomate con porcentajes de 6,4 en la salsa de tomate y de 5,1 en el Ketchup, permite obtener productos viables con mejora nutricional.

2.2. Hamburguesa vegana

Con los subproductos que se han obtenido al tratar los residuos de cardo con microondas, se decidió elaborar hamburguesas veganas (figura 44), que aporten fibra y antioxidantes.



Figura 44. Subproducto de cardo utilizado (A) y hamburguesa vegana obtenida: hamburguesa vegana sin cocinar (B) y hamburguesa vegana cocinada (C).

En la tabla 53, se muestra la composición nutricional, para conocer el aporte energético y de nutrientes que aportan las hamburguesas veganas al ingerirlas.

Tabla 53. Composición nutricional de la hamburguesa vegana.

	Control	Con subproducto
Aporte energético (Kj/100g)	1465,0	1534,1
Aporte energético (Kcal/100g)	350,0	366,6
Grasa total (%)	19,5	23,3
Hidratos carbono totales (% glucosa)	12,4	17,1
Hidratos carbono insolubles (%)	-	11,2
Azúcares totales solubles (% glucosa)	2,3	5,9
Fibra alimentaria (%)	0,1	11,7
Proteína Bruta (%)	17,5	22,0
Compuestos fenólicos totales (mg ácido gálico/kg)	-	129,4

Datos expresados en porcentaje (g/ 100g) en peso húmedo excepto la humedad (porcentaje en peso fresco) y Energía (kcal/ 100 g peso seco), y los compuestos fenólicos totales (mg ácido gálico/kg).

Tal y como se observa en la tabla 53, las hamburguesas con subproducto tuvieron un bajo aporte de azúcares, aunque mayor que el control, pero mostraron un alto contenido en fibra y proteína, mayor que el control.

Con respecto a la fibra, cumplió condiciones para alegar alto contenido en fibra >6g/100g. Además, aportaron polifenoles, los cuales se encontraban en el subproducto.

Al igual que en los productos cárnicos elaborados por Rabetafika et al. (2014), elaborados con subproductos de manzana, al analizar la composición nutricional de las hamburguesas veganas desarrolladas en esta tesis doctoral, se encontraron polifenoles.

Tabla 54. Parámetros de color y textura de la hamburguesa vegana.

Muestra	Color						Textura
	L*	a*	b*	C	h	ΔE	Dureza (g)
Control	58,1 ± 1,2	8,6 ± 0,4	16,9 ± 1,1	179,79 ± 0,00	1,10 ± 0,00	-	400,4 ± 0,5
Hamburguesa	51,7 ± 7,1	11,3 ± 3,2	31,1 ± 5,8	566,76 ± 9,1	1,22 ± 0,11	124,95	1270,11 ± 8,4

Valor medio ± desviación estándar. Control elaborado en la cocina experimental. L*: luminosidad (L=0 rendimientos negro y L=100 indica blanca). a*: posición entre magenta y verde (+a= magenta, frente a -a= verde). b*: posición entre amarillo y azul (+b = amarillo frente a -b= azules). ΔE: diferencia de color. C: croma. h: tono.

Con respecto al control en la tabla 54 se muestra que, la hamburguesa con subproducto de cardo tuvo valores de luminosidad, L y a* menores, fue más oscuro, pero menos verde que el control. Mientras que el valor de b* fue mayor, más amarilla que el control. En la diferencia de color, ΔE, y el croma C se apreciaron diferencias entre el control y la hamburguesa vegana, mientras que en el tono (h) tuvieron valores similares. Todo esto pudo ser debido a la incorporación del polvo en la masa.

Contreras-López y Salvá Ruiz (2018) analizaron el color superficial de hamburguesas de llama con cáscara de sanky cocinadas con una composición: fibra 0,88, grasas 16,5 y proteína 48,71. La L de las hamburguesas de llama con cáscara de sanky fue de 47,00, a* fue de 11,71 y b* fue de 7,86. Si compramos esos datos con la hamburguesa que se ha desarrollado en la presente tesis doctoral, los valores de los parámetros de L y b* fueron mayores en nuestra hamburguesa, esto puede ser debido por los colorantes que hemos utilizado, mientras que el de a* fue menor en nuestra hamburguesa debido a que la grasa utilizada es diferente a la grasa propia de la carne.

Además, fue más dura la hamburguesa vegana desarrollada en la presente tesis doctoral que la hamburguesa control, pudiendo deberse a la fibra aportada por el subproducto.

Cheng-Rong y Yung-Kai (2022) obtuvieron unos datos de dureza de bistec compuesto por albúmina de huevo, proteína de guisante, alginato sódico y subproductos de arrozales, de 2515,62g, dato mayor que las hamburguesas desarrolladas en esta tesis doctoral. Pudo deberse a que la carne tiene mayor dureza que las proteínas vegetales.

También se realizó un estudio organoléptico por un panel de expertos, con los que se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 55 y en la figura 45.

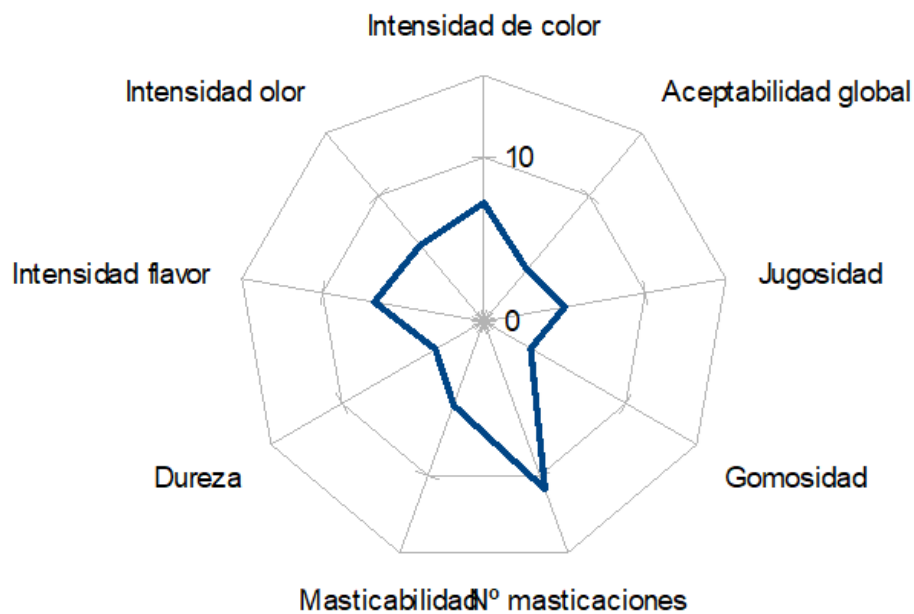


Figura 45. Perfil sensorial de la hamburguesa.

Como se observa en la figura 45, todos los parámetros se encontraron en unos valores similares excepto el número de masticaciones que fue más elevado. Diferencia que se dio porque es un valor muy subjetivo.

La hamburguesa obtuvo un valor alto en la intensidad de color, un valor medio en los parámetros de intensidad de olor, intensidad de flavor, masticabilidad y jugosidad, y una valoración baja en los parámetros de dureza y gomosidad, como ocurrió en los productos cárnicos elaborados con fibra de manzana por Rabetafika et al. (2014), aunque dentro del rango de la aceptabilidad. Teniendo en cuenta los parámetros anteriores, en la hamburguesa habría que mejorar la dureza a valores medios, mientras que los demás parámetros se encontraron dentro de los valores aceptables.

Tabla 55. Test hedónico de la hamburguesa.

¿Cuánto te gusta el aspecto del producto?	6,7 ± 1,57
¿Cuánto te gusta el color de este producto?	6,6 ± 1,71
¿Cuánto te gusta el olor de este producto?	4,6 ± 2,50
¿Cuánto te gusta el sabor de este producto?	3,5 ± 2,01
¿Cuánto te gusta la textura de este producto?	4,3 ± 2,06
¿Cuánto te gusta globalmente?	4,1 ± 2,13

Valor medio ± desviación estándar.

La hamburguesa tuvo baja puntuación en el olor, el sabor y la textura, mientras que a los catadores les gustó el aspecto y el color, como se muestra en la tabla 55. Esto produjo que el producto no obtuviera una buena valoración global.

Para este prototipo será necesario reformular y buscar estrategias de formulación como encapsulación o aromas, que permitan incorporar estos subproductos para obtener prototipos aptos desde el punto de vista sensorial.

2.3. Bizcocho

En la figura 46 se muestran, los bizcochos que se desarrollaron con los subproductos de alcachofa deshidratados, puesto que contienen fibra y antioxidantes, considerados como ingredientes muy interesantes para este tipo de productos.



Figura 46. Subproducto de alcachofa utilizado (A) y bizcocho obtenido: parte exterior (B) y parte interior (C).

Además, se analizó el valor nutricional de los bizcochos elaborados con subproductos de alcachofa deshidratados como sustitutos de la harina.

Tabla 56. Composición nutricional del bizcocho.

	Control	Con subproducto
Aporte energético (Kj/100g)	1532,0	1759,6
Aporte energético (Kcal/100g)	367,0	420,5
Grasa total (%)	26,4	30,4
Hidratos carbono totales (% glucosa)	26,8	25,7
Hidratos carbono insolubles (%)	-	14,2
Azúcares totales solubles (% glucosa)	24,0	11,5
Fibra alimentaria (%)	2,8	3,5
Proteína Bruta (%)	8,6	10,9
Compuestos fenólicos totales (mg ácido gálico/kg)	-	122,0

Datos expresados en porcentaje (g/ 100g) en peso húmedo excepto la humedad (porcentaje en peso fresco) y Energía (kcal/ 100 g peso seco), y los compuestos fenólicos totales (mg ácido gálico/kg).

Tal y como se muestra en la tabla 56, los bizcochos con subproducto aportaron mayor cantidad de fibra, proteína y polifenoles, siendo fuente de fibra porque aportaron 3g/100g.

Al igual que en los productos de panadería como pan, pasteles, galletas, muffins y bollos horneados, con harinas de subproductos ricos en fibra obtenidos de los residuos de manzana elaborados por Rabetafika et al. (2014) y Di Nunzio et al. (2020), el polvo obtenido en la presente tesis doctoral aportó fibra, polifenoles y color en los productos finales. Añadiéndose en torno a un 2% de subproducto deshidratado se mejoraron las propiedades de la masa como la absorción de agua, la estabilidad y la tenacidad, es decir, la resistencia a la extensión de la masa.

También se analizó el color y la textura de este producto (tabla 57) con los resultados que se muestran a continuación.

Tabla 57. Parámetros de color y textura de los bizcocho.

Muestra	Color						Textura
	L*	a*	b*	C	h	ΔE	Dureza (g)
Control	28,00 ± 0,20	-27,01 ± 0,1	25,02 ± 0,2	677,00 ± 0,00	2,39 ± 0,00	-	55,44 ± 3,53
Bizcocho	35,60 ± 2,60	7,50 ± 1,40	17,10 ± 2,10	176,49 ± 37,81	1,15 ± 0,08	655,21	56,37 ± 3,57

Valor medio ± desviación estándar. Control elaborado en la cocina experimental. Codificación: L*: luminosidad (L=0 rendimientos negro y L=100 indica blanca). a*: posición entre magenta y verde (+a= magenta, frente a -a= verde). b*: posición entre amarillo y azul (+b = amarillo frente a -b= azules). ΔE: diferencia de color. C: croma. h: tono.

Tal y como se muestra en la tabla 57, el bizcocho con subproducto de alcachofa presentó mayor luminosidad (L) que el control, aunque fue un producto oscuro, y mayor valor de a^* , menos verde que el control. Mientras que el valor b^* fue menor que en el control, por lo que fue menos amarillo. Se muestra diferencia de color (ΔE) y el croma (C) entre las dos muestras, además el tono (h) fue más oscuro en el control. Esto ocurrió por la sustitución de la harina por subproducto más oscuro, procedente de la harina estabilizada.

Alvarez-Ramirez et al. (2020) encontraron que, para el color de los bizcochos elaborados con harina de trigo y leche, los valores fueron de $L= 87,51$, $a^*= 6,82$ y $b^*= 10,91$. L y el valor b^* en sus bizcochos fue mayor que en los elaborados en esta tesis doctoral, mientras que el valor de a^* fue menor.

Otros autores Mirab et al. (2020), elaboraron bizcochos con harina de trigo y extracto de cáscara de granada, con una humedad del 33, proteína 8,1 y grasa 21,3, y obtuvieron valores de color de $L= 53$, $a^*=20$ y $b^*=38,3$. En este estudio todos los valores de color fueron mayores que en los bizcochos de esta tesis doctoral.

No obstante, es difícil comparar de modo objetivo los valores de color de diferentes bizcochos porque todo depende de la composición de cada uno de ellos.

La dureza fue similar en ambas muestras porque la dureza en los bizcochos depende de proceso de horneado y del contenido en fibra, a mayor cantidad de fibra y mayor tiempo de horneado mayor dureza.

Alvarez-Ramirez et al. (2020) y Mirab et al. (2020) también analizaron la dureza en sus bizcochos, dando valores de 29,61 y 5 respectivamente. Valores menores de dureza que en los bizcochos de esta tesis doctoral, esto fue así por el diferente tiempo de cocción.

A continuación, se muestran los resultados que se obtuvieron al ser analizados los bizcochos por el panel de cata.

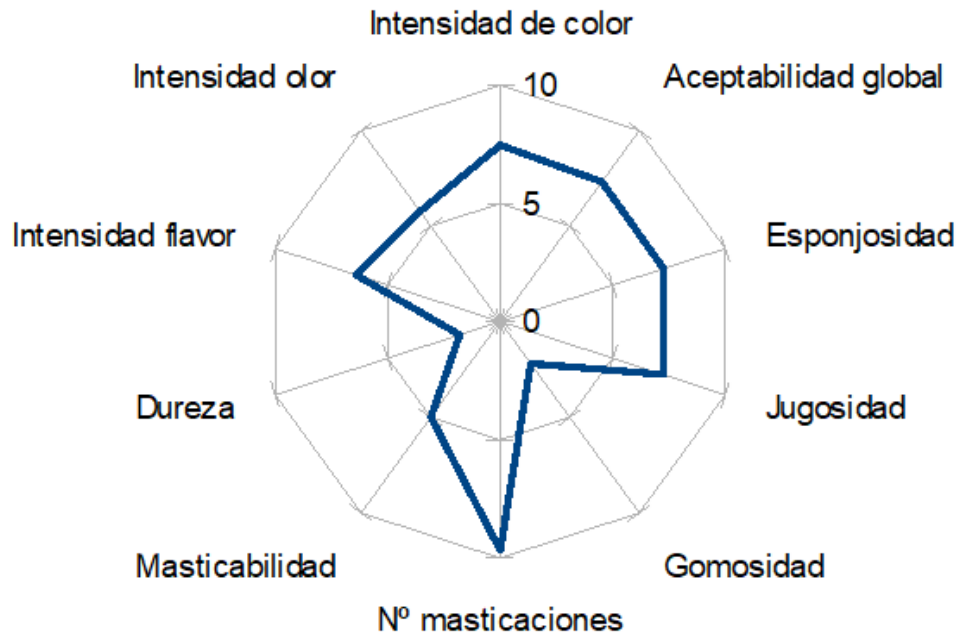


Figura 47. Perfil sensorial del bizcocho.

En la figura 47, se puede observar como todos los valores se encontraron dentro de un mismo rango de datos excepto la dureza, la gomosidad y el número de masticaciones. Valores dentro del rango normal porque un bizcocho no debe ser duro y gomoso.

Para el bizcocho se puntuó con valores altos la intensidad de color, la jugosidad y la esponjosidad, mientras que con valores medios intensidad de olor, intensidad de flavor y la masticabilidad, y con valores bajos la dureza y la gomosidad. En el bizcocho todos los valores se puntuaron dentro de los rangos deseados.

Tabla 58. Test hedónico del bizcocho.

¿Cuánto te gusta el aspecto del producto?	7,4 ± 0,58
¿Cuánto te gusta el color de este producto?	6,7 ± 0,64
¿Cuánto te gusta el olor de este producto?	6,9 ± 0,20
¿Cuánto te gusta el sabor de este producto?	7,4 ± 0,35
¿Cuánto te gusta la textura de este producto?	7,2 ± 0,55
¿Cuánto te gusta globalmente?	7,3 ± 0,42

Valor medio ± desviación estándar.

El bizcocho obtuvo valoraciones positivas, entre 6,7 y 7,4. Los parámetros que más gustaron fueron el sabor, la textura y el aspecto.

El uso del subproducto de alcachofa en un porcentaje de 1,8 permitió obtener prototipos de bizcocho aptos desde el punto de vista sensorial y mejorados nutricionalmente respecto al control.

2.4. Pasta fresca

También se elaboraron prototipos de pasta fresca con subproductos de champiñón tal y como se muestra en este apartado.

La pasta fresca se elaboró con los subproductos de champiñón deshidratados.



Figura 48. Subproducto de champiñón utilizado (A) y pasta fresca obtenida (B).

A la pasta fresca se le realizó un análisis de composición nutricional para conocer el aporte de energía, las grasas, los hidratos de carbono, la proteína, la fibra y los polifenoles totales. Todo ello se muestra en la tabla 48.

Tabla 59. Composición nutricional de la pasta fresca.

	Control	Con subproducto
Aporte energético (Kj/100g)	1004,0	850,0
Aporte energético (Kcal/100g)	241,0	203,1
Grasa total (%)	5,5	4,5
Hidratos carbono totales (% glucosa)	40,5	32,5
Hidratos carbono insolubles (%)	-	31,3
Azúcares totales solubles (% glucosa)	38,3	1,2
Fibra alimentaria (%)	2,2	3,0
Proteína Bruta (%)	8,7	7,9
Compuestos fenólicos totales (mg ácido gálico/kg)	-	58,7

Datos expresados en porcentaje (g/ 100g) en peso húmedo excepto la humedad (porcentaje en peso fresco) y Energía (kcal/ 100 g peso seco), y los compuestos fenólicos totales (mg ácido gálico/kg).

Como puede observarse en la tabla 59, la pasta fresca tuvo un bajo aporte de grasa, al igual que el control, aunque alto de hidratos de carbono, pero en un contenido menor que el control. También aportó fibra (alegación de fuente de fibra), proteína y polifenoles.

En las elaboraciones realizadas por Biswas et al. (2015) de obleas de carne de ave elaboradas con subproductos de manzana y plátano, también se comprobó que al usar subproductos se conservaron en los productos alimenticios los polifenoles, la capacidad antioxidante y la calidad nutricional.

Además, se analizó el color y la elasticidad de este producto.

Tabla 60. Parámetros de color y textura de la pasta fresca

Muestra	Color					ΔE	Textura
	L*	a*	b*	C	h		Elasticidad (g)
Control	60,10 ± 0,21	5,02 ± 0,22	27,36 ± 0,20	385,15 ± 0,05	1,39 ± 0,00	-	14,20 ± 5,91
Pasta fresca	53,90 ± 5,82	2,6 ± 0,31	16,33 ± 0,60	137,09 ± 10,15	1,42 ± 0,02	82,60	14,11 ± 3,75

Valor medio ± desviación estándar. Control elaborado en la cocina experimental. Codificación: L*: luminosidad (L=0 rendimientos negro y L=100 indica blanca). a*: posición entre magenta y verde (+a= magenta, frente a -a= verde). b*: posición entre amarillo y azul (+b = amarillo frente a -b= azules). ΔE : diferencia de color. C: croma. h: tono.

El control, mostrado en la tabla 60, presentó todos los valores de color por encima de los espaguetis con subproducto. La pasta fresca son subproducto de champiñón deshidratado fue más oscuro, y tendió más a rojo y amarillo que el control. Todo esto se debió a la harina utilizada, la cual tenía color más marrón.

Samir Vedia-Quispe V. et al. (2016) analizaron el color en tallarines de trigo donde obtuvieron los valores L 72,09, a* 1,10 y b* 16,22, mientras que Folashade Bolarinwa et al. (2021) analizan unos tallarines de arroz donde sus valores fueron L de 75,76, a* de 8,94 y b* de 25,22.

Con respecto a la textura, la elasticidad fue similar en ambas muestras, con lo cual la harina de champiñón no aportó dureza con respecto a la harina de trigo, y fue un buen ingrediente para la pasta fresca.

Para los espaguetis se obtuvieron, según el panel de cata, los siguientes resultados mostrados en la tabla 61 y en la figura 49.

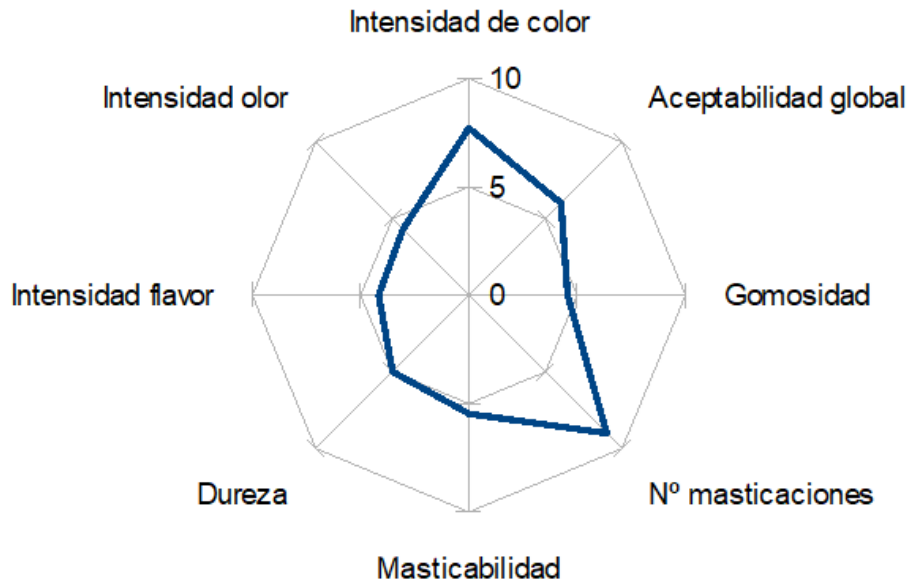


Figura 49. Perfil sensorial de la pasta fresca.

En la pasta fresca todos los valores se encontraron cercanos a 5 excepto el número de masticaciones y la intensidad de color, como se observa en la figura 49.

La pasta fresca obtuvo una puntuación alta (7,72) para la intensidad de color, aunque para los demás valores la puntuación fue media, oscilando entre el 4,1 a 5,4. La pasta fresca tuvo un color intenso porque se elaboró con subproductos de champiñón, los cuales le dotaron de ese color característico. Los demás parámetros fueron muy bien valorados.

Gull et al. (2015) elaboraron pasta con harina de mijo y orujo de zanahoria, en los que obtuvieron valores de humedad 11,43, grasa 1,60, proteína 12,4, fibra 2,03 y carbohidratos 72,23 todo en gramos /100g, y obtuvieron una firmeza de 5,94, valor similar al de la pasta fresca elaborada con polvo de champiñón, al igual que en el estudio de Folashade Bolarinwa et al. (2021) que obtuvieron en tallarines de arroz una dureza de 4,96. Esto se debió al tiempo de cocinado de los espaguetis, y a la cantidad de harina que se utilizó para la elaboración.

Tabla 61. Test hedónico de la pasta fresca.

¿Cuánto te gusta el aspecto del producto?	6,0 ± 0,21
¿Cuánto te gusta el color de este producto?	5,3 ± 0,95
¿Cuánto te gusta el olor de este producto?	5,6 ± 0,96
¿Cuánto te gusta el sabor de este producto?	6,2 ± 0,14
¿Cuánto te gusta la textura de este producto?	5,7 ± 0,70
¿Cuánto te gusta globalmente?	6,0 ± 0,56

Valor medio ± desviación estándar.

En el test de aceptación sobre la pasta fresca, tabla 61, los resultados fueron medios, entre 5,3 y 6,2, obteniéndose los mejores valores en el aspecto y el sabor.

El subproducto de champiñón es un buen ingrediente para usarlo en 5,5% en la elaboración de pasta fresca.

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en la presente tesis doctoral y de su interpretación, se obtienen las siguientes conclusiones:

- La utilización de MW para la obtención de subproductos deshidratados en todas las condiciones de trabajo ensayadas, 1000W-4000W durante 4-40 minutos, permitió reducir la humedad entre un 97% y un 99%, con independencia de la humedad inicial de los residuos. En lo relativo a la a_w los subproductos obtenidos tras la MWD mostraron valores similares, entre 0,46 y 0,45. Evaluando los resultados de a_w y humedad, se puede concluir que la MWD permitió obtener subproductos estables.
- En todas las condiciones de MWD aplicadas a los diferentes residuos, los contenidos en polifenoles, fibra dietética, licopeno, y beta glucanos en los subproductos fue menor que en los residuos sin tratar. En todos los casos, esta reducción fue de un 80-95% en los contenidos de antioxidantes, licopeno y beta glucanos, mientras que la concentración de fibra dietética se mantuvo en valores similares con respecto al control inicial.
- La disminución de compuestos con propiedades antioxidantes en los subproductos estuvo acompañada, en todos los tratamientos de MWD, por un descenso de su capacidad antioxidante DPPH al aumentar la potencia del tratamiento debido al aumento de la temperatura hasta 100°C, que provocó la destrucción de compuestos antioxidantes.
- El cardo deshidratado fue el subproducto con mayor contenido en fibra dietética, entre 42,3% y 62,5% en materia seca, lo que se logró al utilizar potencias medias/bajas de MW, 1000W y 2000W durante 30 minutos. Esto fue debido a que los residuos de cardo control tenían mayor contenido de fibra dietética que el resto, y a que este contenido inicial se vio menos afectado por la temperatura y el tiempo de tratamiento que los demás.
- Los extractos obtenidos mediante MWAE presentaron mayor propiedad antioxidante, entre 1,5 y 113 mg/kg ácido gálico para los polifenoles, entre 0,2 y 1,6 μmol trolox inicial /g producto para DPPH, y entre 1 y 30 μmol TE /mg producto para FRAP, al utilizar como disolvente una mezcla de agua:etanol (60:40), y aplicando potencias elevadas de MW, 3000W y 4000W, que provocan una mayor rotura de las células. El etanol utilizado en la mezcla de disolvente aporta mayor afinidad por los enlaces de los compuestos a extraer que el agua.
- Cuando se realizó una PEFAE, con campos eléctricos de 0,5, 1 o 2 kV/cm, y 10 o 25 pulsos, en los subproductos sólidos de todos los residuos, se conservó mayor

capacidad antioxidante DPPH en comparación con los tratamientos en los que se aplicaron MWD, porque la PEFAE no afectó negativamente a los compuestos antioxidantes por no producir un aumento de temperatura. En el subproducto de cardo se observó la mayor diferencia de capacidad antioxidante DPPH con valores hasta 125 μmol trolox inicial/g producto más elevados, mientras que en su determinación como FRAP, fue el subproducto de alcachofa el que presentó un incremento significativo en una cantidad de hasta 1012 μmol TE/mg producto.

- El aumento de la intensidad de campo en los tratamientos de PEFAE de 0,5 a 1 y 2 kV/cm, no aumentó la extracción de los compuestos estudiados. Sin embargo, en el caso de los subproductos de alcachofa, la capacidad antioxidante aumentó al incrementarse el número de pulsos de 10 a 25 en un 30%.
- La a_w varió en mayor medida en los subproductos obtenidos con la combinación de los tratamientos con PEFAE y MWD (cardo: 1kV/cm 10p y 4000W 6 min a_w 0,45, alcachofa: 1kV/cm 10p 4000W 10min a_w 0,45, champiñón: 0,5 kV/cm 10p 4000W 10 min a_w 0,27, y tomate: 0,5 kV/cm 10p y 1 kV/cm 10p 3000W 5 minutos a_w 0,82 y 0,85), además se mantuvo mayor nivel de humedad (cardo: 5,88%, alcachofa: 0,84%, champiñón: 0,97% y tomate: 7,65% y 18,08%) que en los tratamientos en los que sólo se utilizó MWD. Esta combinación de tratamientos no mejoró el rendimiento de extracción de antioxidantes.
- Se ha demostrado que la tecnología MWD fue un método viable para el aprovechamiento de los subproductos de cardo, alcachofa, champiñón y tomate, ya que se conservaron la mayor concentración de antioxidantes, licopeno y beta glucanos, en comparación con los contenidos obtenidos en los extractos tras el uso de PEFAE y la combinación de las dos tecnologías. En los subproductos deshidratados mediante MW se conservaron polifenoles, proteínas, fibra dietética, beta glucanos y licopeno, viéndose que en el subproducto de alcachofa fue el que mayor contenido de polifenoles presentaba, hasta 2747,35 mg/kg ácido gálico.
- Los US aplicados a 400W fueron eficaces para la extracción de proteína bruta en un 40 y 46% en los tratamientos con una duración de 10 minutos y 20 minutos respectivamente. Sin embargo, cuando se aumentó el tiempo de tratamiento a 30 minutos, disminuyó el contenido de proteína bruta un 16% con respecto al tratamiento de 20 minutos y un 10% con respecto al de 10 min en todos los extractos.

- Con todos los subproductos obtenidos mediante MWD, se desarrollaron productos alimenticios, específicamente, salsa de tomate y Kétchup con el subproducto de tomate, bizcochos con el subproducto de alcachofa, hamburguesas veganas con el subproducto de cardo y pasta fresca con el subproducto de champiñón, cuyo valor nutricional y sensorial se evaluó una vez elaborados. Resultaron ser aceptables según el panel de cata, obteniendo una puntuación entre 4,1 y 7,3, y de un valor nutricional superior. Los productos alimentarios desarrollados con los subproductos añadidos presentaron mayor contenido en fibra dietética, entre un 2,2% y un 10% mayor, y un contenido de 58 a 132 mg/kg ácido gálico de compuestos fenólicos, en comparación con los controles correspondientes. Además, se redujo entre un 1,8% y un 14,4 %, el desperdicio alimentario, al sustituir parte de la harina por el subproducto deshidratado en los bizcochos, pasta fresca y hamburguesas veganas y parte del concentrado de tomate en la salsa de tomate y el Kétchup por la inclusión del subproducto deshidratado de tomate.
- Las conclusiones de esta tesis doctoral contribuyen a un mejor conocimiento del uso de las tecnologías MW (MWD y MWAE), PEFAE y USAE para la revalorización de residuos vegetales de la industria alimentaria, que puede repercutir positivamente en la producción de productos alimenticios con mejores propiedades nutricionales y la reducción del desperdicio alimentario con el consiguiente impacto medioambiental.
- En futuros estudios sería interesante la evaluación de una batería mayor de pruebas, con la utilización de otras potencias y tiempos para comprender como afectan a los compuestos y determinar en qué momento aparecen las diferencias entre tratamientos.
- Todo lo estudiado en esta tesis, puede ayudar a las empresas a cumplir con la nueva ley española contra el desperdicio alimentario implantada en este año 2024 por el Gobierno de España. Las empresas de la industria alimentaria deberán contar con un plan de prevención para que, a partir de un autodiagnóstico, adopten medidas para minimizar las pérdidas conforme a una jerarquía de usos en la que tendrá prioridad el consumo humano. Gracias a la aprobación de esta ley, se avanza en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) incluidos en la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), que establece la aspiración de “reducir a la mitad el desperdicio de alimentos per cápita mundial en la venta al por menor y a nivel de los consumidores y reducir las pérdidas de alimentos en las cadenas de producción y suministro, incluidas las pérdidas posteriores a la cosecha”.

BIBLIOGRAFÍA

- Abd El-Aziz, N. M.; EldinAwad, O. M.; Shehata, M. G.; El-Sohaimy, S. A.; (2021). Antioxidant and anti-acetylcholinesterase potential of artichoke phenolic compounds. *Food Bioscience*, 41; 101006.
- Abu Tayeh, H. N.; Azaizeh, H.; Gerchman, Y.; (2020). Circular economy in olive oil production – Olive mill solid waste to ethanol and heavy metal sorbent using microwave pretreatment. *Waste Management*, 113; 321-328.
- Acevedo Alzate, L. K.; Mejía Díaz, D. P.; Acosta Otálvaro, E. V.; Valencia Gallego, W. G.; Penagos Vélez, L.; (2017). Efecto de la temperatura del conchado sobre los polifenoles en un chocolate semi-amargo. *Alimentos hoy*,31; Vol 25, Nº 41.
- Aguilo-Aguayo, I.; Walton, J.; Vinas, I.; Tiwari, B. K.; (2017). Ultrasound assisted extraction of polysaccharides from mushroom by-products. *LWT - Food Science and Technology*, 77; 92-99.
- Alur, M.D.; Venugopal, V.; (1999). DRIED FOODS, *Encyclopedia of Food Microbiology*, Elsevier, Pages 530-537.
- Alvarez-Ramirez, J.; Vernon-Carter, E. J.; Carrera-Tarel, Y.; Garcia, A.; Roldan-Cruz, C.; (2020). Effects of candelilla wax/canola oil oleogel on the rheology, texture, thermal properties and in vitro starch digestibility of wheat sponge cake bread. *LWT – Food Science and Technology*, 130; 109701.
- Amaya-Cruz, D.M.; Perez-Ramirez, I. F.; Delgado-Garcia, J.; Mondragon-Jacobo, C.; Dector-Espinoza, A.; Reynoso-Camacho, R.; (2019). An integral profile of bioactive compounds and functional properties of prickly pear (*Opuntia ficus indica* L.) peel with different tonalities. *Food Chemistry*, 278; 568-578.
- Analisis-sensorial.-metodologia.-guia-general. <https://revista.une.org/12>.
- Andreou, V.; Dimopoulos, G.; Dermesonlouoglou, E.; Taoukis, P.; (2020). Application of pulsed electric fields to improve product yield and waste valorization in industrial tomato processing. *Journal of Food Engineering*, 270; 109778.
- Arpagaus, C.; Collenberg, A.; Rützi, D.; Assadpour, E.; Jafari, S. M.; (2018). Nano spray drying for encapsulation of pharmaceuticals. *International Journal of Pharmaceutics*, 546; 194-214.
- Bachtler, S.; Bart, H.-J.; (2021). Increase the yield of bioactive compounds from elder bark and annatto seeds using ultrasound and microwave assisted extraction technologies. *Food and Bioproducts Processing*, 125; 1-13.

- Baltacıoğlu, H.; Baltacıoğlu, C.; Okur, I.; Tanrıvermiş, A.; Yalıcı, M.; (2021). Optimization of microwave-assisted extraction of phenolic compounds from tomato: Characterization by FTIR and HPLC and comparison with conventional solvent extraction. *Vibrational Spectroscopy*, 113; 103204.
- Barrientos, T.; Rosemary, S.; (2018) Efecto de la temperatura de secado en los compuestos bioactivos y capacidad antioxidante del nispero (*Mespilus germánica* L.). Tesis para optar el título de Ingeniero en Industrias Alimentarias. Universidad Nacional del Centro del Perú - Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias - Huancayo – Perú.
- Barron-García, O.Y.; Nava-Alvarez, B.; Gaytan-Martínez, M.; Gonzalez-Jasso, E.; Morales-Sanchez, E.; (2022). Ohmic heating blanching of *Agaricus bisporus* mushroom: Effects on polyphenoloxidase inactivation kinetics, color, and texture. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 80; 103105.
- Bazana Maiara, T.; Codevilla Cristiane, F.; and de Menezes Cristiano, R.; (2019). Nanoencapsulation of bioactive compounds: challenges and perspectives. *Science Direct*, 26; 47–56.
- Bernaert, N.; Droogenbroeck, B. V.; Pamel, E. Van.; De Ruyck, H.; (2019). Innovative refractance window drying technology to keep nutrient value during processing. *Trends in Food Science & Technology*, 84; 22-24.
- Bhushan Singh Chouhan, K.; Tandey, R.; Kumar Sen, K.; Mehta, R.; Mandal, V.; (2020). Microwave hydrodiffusion and gravity model with a blend of high and low power microwave firing for improved yield of phenolics and flavonoids from oyster mushroom. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 17; 100311.
- Birtic, S.; Régis, S.; Le Bourvellec, C.; Renard Catherine M.G.C.; (2019). Impact of air-drying on polyphenol extractability from apple pomace. *Food Chemistry*, 296; 142-149.
- Biswas, A. K.; Beura, C.K.; Yadav, A.S.; Pandey, N.K.; Mendiratta, S.K.; Kataria, J.M.; (2015). Influence of novel bioactive compounds from selected fruit by-products and plant materials on the quality and storability of microwave-assisted cooked poultry meat wafer during ambient temperature storage. *LWT Food Science and Technology*, 62; 727-733.
- Bobby Shekarau, L., Queen Msurshima, V.; Shianya Audu, N.; Jummai Mactony, M.; Riyang, Z.; Taitiya Kenneth, Y.; Meriem, A.; (2023). Convective and microwave drying kinetics of white cabbage (*Brassica oleracea* var *capitata* L.): Mathematical modelling, thermodynamic properties, energy consumption and reconstitution kinetics. *Journal of Agriculture and Food Research*, 12; 100605.

- Bocker, R.; Keven Silva, E.; (2022). Pulsed electric field assisted extraction of natural food pigments and colorings from plant matrices. *Food Chemistry: X* 15; 100398.
- Bolarinwa, I. F.; Oyesiji, O. O.; (2021). Gluten free rice-soy pasta: proximate composition, textural properties and sensory attributes. *Heliyon*, 7; e06052.
- Bo-Lin, C., Guan-Syun, Lin; Mohammad, A; Wei-Mon, Y; (2023). Microwave-assisted freeze drying of pineapple: Kinetic, product quality, and energy consumption. *Case Studies in Thermal Engineering*, 41; 102682.
- Brummelhaus de Menezes, B.; Mironuk Frescura, L.; Duarte, R.; Villetti, M. A.; Barcellos da Rosa, M.; (2021). A critical examination of the DPPH method: Mistakes and inconsistencies in stoichiometry and IC50 determination by UVeVis spectroscopy. *Analytica Chimica Acta*, 1157; 338398.
- Calleja-Gomez, M.; Pallares, N.; Salgado-Ramos, M.; Barba, Francisco J.; Berrada, H.; Castagnini, J. M.; (2024). Sustainable processing of food side streams and underutilized leftovers into high-added-value chemicals assisted by pulsed electric fields- and high-pressure processing-based technologies. *Trends in Analytical Chemistry*, 171; 117506.
- Cecchi, L.; Khatib, M.; Bellumori, M.; Civa, V.; Domizio, P.; Innocenti, M.; Balli, D.; Mulinacci N.; (2023). Industrial drying for agrifood by-products re-use: Cases studies on pomegranate peel (*Punica granatum L.*) and stoned olive pomace (pate, *Olea europaea L.*). *Food Chemistry*, 403; 134338.
- Cem Ozsefil, I.; Ziylan-Yavas, A.; (2023). Green approach for polyphenol extraction from waste tea biomass: Single and hybrid application of conventional and ultrasound-assisted extraction. *Environmental Research*, 235; 116703.
- Ctic Cita; (2019). Nuevas tecnologías de procesamiento de alimentos para preservar sus valores nutricionales. Informe de vigilancia tecnológica. <http://ctic-cita.es/>.
- Çetin, N.; (2022). Comparative assessment of energy analysis, drying kinetics, and biochemical composition of tomato waste under different drying conditions. *Scientia Horticulturae*, 305; 111405.
- Chakraborty, I.; Sen, I.K.; Mondal, S.; Rout, D.; Bhanja, S.K.; Maity, G.N.; Maity, P.; (2019). Bioactive polysaccharides from natural sources: A review on the antitumor and immunomodulating activities, Biocatalysis and Agricultural Biotechnology.
- Chanoti, S.; Tzia, C.; (2018). Extraction of phenolic compounds from olive pomace by using natural deep eutectic solvents and innovative extraction techniques. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 48; 228-239.

- Chen, L.; Opara Umezuruike, L.; (2013). Texture measurement approaches in fresh and processed foods: A review. *Food Research International*, 51; 823-835.
- Cheng-Rong, T.; Yung-Kai, L.; (2022). Artificial steak: A 3D printable hydrogel composed of egg albumen, pea protein, gellan gum, sodium alginate and rice mill by-products. *Future Foods*, 5; 100121.
- Cheung, Y.; Siu, K.; Liu, Y.; Wu, J.; (2012). Molecular properties and antioxidant activities of polysaccharide–protein complexes from selected mushrooms by ultrasound-assisted extraction. *Process Biochemistry*, 47; 892-895.
- Chihoub, W.; Dias, M. I.; Barros, L.; Calhelha, R. C.; Alves, M. J.; Harzallah-Skhiri, F.; Ferreira, I. C. F. R.; (2019). Valorisation of the green waste parts from turnip, radish and wild cardoon: Nutritional value, phenolic profile and bioactivity evaluation. *Food Research International*, 126; 108651.
- Chitrakar, B.; Zhang, M.; Devahastin, S.; Adhikari, B.; Zhang, X.; (2022). Valorization of Asparagus leafy by-product by ionic-liquid extraction and characterization of bioactive compounds in the extracts. *Food Bioscience*, 46; 101600.
- Chordi Barrufet, S.; Oliva Fortuny, R. C.; (2023). Contenido fenólico y capacidad antioxidante de fresa mínimamente procesada sometida a tratamientos de conservación por pulsos de luz de alta intensidad. Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Lleida.
- Comité técnico CTN; (2017). Análisis sensorial: Metodología. Guía general para establecer un perfil sensorial (ISO 13299:2016) 87.
- Consilium; (2022). Reducir la pérdida y el desperdicio de alimentos (europa.eu).
- Contreras-López, E.; y Salvá Ruiz, B.K. (2018). Caracterización Sensorial de hamburguesa de llama con cáscara de sanky. *Rev. investig. Altoandin.* vol.20 n°2.
- Cornejo Arteaga, M. L.; (2016). Compuestos orgánicos y sus reacciones. Área Académica Química Paz.
- Cuvertino Calderón (2004). Comportamiento de secado de pulpa de Murta (*Ugni MolinaeTurcz*) y estimación del consumo energético en la deshidratación de una lámina de fruta. Tesis doctoral. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela de Ingeniería en alimentos.
- De los Santos, B.; Brenes, M.; García, P.; Aguado, A.; Medina, E.; Romero, C.; (2019). Effect of table olive wastewaters on growth and yield of cucumber, pepper, tomato and strawberry. *Scientia Horticulturae*, 256; 108644.

- Díaz, A.; Bomben, R.; Dini, C.; Vina, S. Z.; Garcia, M. A.; Ponzi, M.; Comelli, N.; (2019). Jerusalem artichoke tuber flour as a wheat flour substitute for biscuit elaboration. *LWT – Food Science and Technology* 108; 361,369.
- Di Nunzio, M.; Picone, G.; Pasini, F.; Chiarello, E.; Caboni, M. F.; Capozzi, F.; Gianotti, A.; Bordoni, A.; (2020). Olive oil by-product as functional ingredient in bakery products. Influence of processing and evaluation of biological effects. *Food Research International*, 131; 108940.
- Downes, F.P.; Ito, K.; (2001). *Compendium of Methods for the Microbiological Examination of Foods*. APHA, Washington, p 515, 533, 561.
- Dukic, J.; Kospic, K.; Kelava, V.; Mavric, R.; Nutrizio, M.; BalenB.; Butorac, A.; Halil Oztop, M.; Rezek Jambrak. A.; (2023). Alternative methods for RuBisCO extraction from sugar beet waste: A comparative approach of ultrasound and high voltage electrical discharge. *Ultrasonics Sonochemistry*, 99; 106535.
- ENAC, Entidad Nacional de Acreditación (2018). *Guía para la acreditación de laboratorios de análisis sensorial*. G-ENAC-02 Rev. 2 Serie 1.
- El Kantar, S.; Boussetta, N.; Rajha, H. N.; Maroun, R. G.; Louka, N.; Vorobiev, E.; (2018). High voltage electrical discharges combined with enzymatic hydrolysis for extraction of polyphenols and fermentable sugars from orange peels. *Food Research International*, 107; 755-762.
- Escutia-López, K. N.; González-Montoya, M.; Cruz-Ortiz, R.; Cano-Sampedro, E.; Rodríguez- Rivero, Y.; Sánchez-Pardo, M. E.; (2020). Efecto de la capacidad antioxidante y antiglicación in vitro del extracto acuoso de *Stevia rebaudiana* Bertoni. *o. Revista Bio Ciencias*, 7, e875.
- Esin Celik, S.; Özyürek, M.; Güclü, K.; Apak, R.; (2010). Solvent effects on the antioxidant capacity of lipophilic and hydrophilic antioxidants measured by CUPRAC, ABTS/persulphate and FRAP methods. *Talanta*, 81, 1300-1309.
- Esparza-Martínez, F. J.; Miranda-López, R.; Guzmán-Maldonado, S. H.; (2016). Efecto de la temperatura sobre los compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante en el residuo de la producción de jugo de mandarina (*Citrus reticulata* Satsuma). *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos* Vol. 1, No. 1; 843-850.
- Falleh, H.; Ksouri, R.; Chaieb, K.; Karray-Bouraoui, N.; Trabelsi, N.; Boulaaba, M.; Abdelly, C.; (2008). Phenolic composition of *Cynara cardunculus* L. organs, and their biological activities. *Comptes Rendus Biologies*, 331; 372-379.
- Francia Verde, R.; Pérez-Matute, P.; (2013). Investigación e innovación al servicio de la alimentación en La Rioja: avances en el campo de la enología y en otros productos riojanos. *Revista de ciencia Zubía, Monográfico Núm. 25*.

- Ganhão, R.; Morcuende, D.; Estévez, M.; (2010). Protein oxidation in emulsified cooked burger patties with added fruit extracts: Influence on colour and texture deterioration during chill storage. *Meat Science*, 85; 402-409.
- Galán Lacarra, N; Marín, J.M.; (2011). Optimización energética de un secadero industrial. Proyecto final de carrera. Centro Politécnico Superior. Departamento de Máquinas y Motores Térmicos.
- Gallego-García, M.; Moreno, A. D.; Manzanares, P.; Negro, M. J.; Duque, A.; (2023). Recent advances on physical technologies for the pretreatment of food waste and lignocellulosic residues. *Bioresource Technology*, 369; 128399.
- Gascón, A.; Muravnick, N.; Andreuccetti, C. P.; (2015). Desección y deshidratación de vegetales. Manual y Esquemas de las Elaboraciones Industriales, Industrias Agrarias 5.
- Ghulam Nabi, B.; Mukhtar, K.; S. Ansar, Ali Hassan, S.; Adnan Hafeez, M.; Bhat, Z.F.; Mousavi Khaneghah, A.; Ul Haq, A.; Muhammad Aadil, R.; (2023). Application of ultrasound technology for the effective management of waste from fruit and vegetable. *Ultrasonics Sonochemistry*.
- Gil-Ramírez, A.; Ribeiro Smiderle, F.; Morales, D.; Iacomini, M.; Soler-Rivas, C.; (2019). Strengths and weaknesses of the aniline-blue method used to test mushroom (1→3)-β-D-glucans obtained by microwave-assisted extractions. *Carbohydrate Polymers*, 217; 135-143.
- Guija Poma, E.; Inocente Camones, M. A.; Ponce Pardo, J.; Zarzosa Norabuena, E.; (2015). Evaluación de la técnica 2,2-Difenil-1-Picrilhidrazilo (DPPH) para determinar capacidad antioxidante. *Horiz Med* 15 (1): 57-60.
- Gong, P.; Wang, S.; Liu, M.; Chen, F.; Yang, W.; Chang, X.; Liu, N.; Zhao, Y.; Wang, J.; Chen, X.; (2020). Extraction methods, chemical characterizations and biological activities of mushroom polysaccharides: A mini-review. *Carbohydrate Research*, 494; 108037.
- González-González, R. M.; Barragán-Mendoza, L.; Peraza-Campos, A. L.; Muñiz-Valencia, R.; Ceballos-Magaña, S. G.; Parra-Delgado, H.; (2019). Validation of an HPLC-DAD method for the determination of plant phenolics. *Revista Brasileira de Farmacognosia*.
- Gull, A.; Prasad, K.; Kumar, P.; (2015). Effect of millet flours and carrot pomace on cooking qualities, color and texture of developed pasta. *LWT – Food Science and Technology*, 63; 470-474.
- Hiba, N. A. T.; Hassan, A.; Yoram, G.; (2020). Circular economy in olive oil production – Olive mill solid waste to ethanol and heavy metal sorbent using microwave pretreatment. *Waste Management*, 113; 321-328.

- Ho, K.K.H.Y.; Ferruzzi, M.G.; Liceaga, A.M.; San Martín-Gonzalez, M.F.; (2015). Microwave-assisted extraction of lycopene in tomato peels: Effect of extraction conditions on all-trans and cis-isomer yields. *LWT – Food Science and Technology*, 62; 160-168.
- IFolashade Bolarinwa, I.; Oluwaseun Oyesiji, O.; (2021). Gluten free rice-soy pasta: proximate composition, textural properties and sensory attributes. *Heliyon*, 7; e06052.
- Innograin 2020. Calidad de harinas 1. <https://innograin.uva.es/autor/innograin/>
- Ivanovs, K.; Blumberga, D.; (2017). Extraction of fish oil using green extraction methods: a short review. *Energy Procedia*, 128; 477–483.
- Jiang, J.; Zhang, M.; Devahastin, S.; Yu, D.; (2021). Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatments on drying and quality characteristics of pulsed fluidized bed microwave freeze-dried strawberries. *LWT*, 145; 111300.
- Kaderides, K.; Papai konomou, L.; Serafim, M.; Goula, A. M.; (2019). Microwave-assisted extraction of phenolics from pomegranate peels: Optimization, kinetics, and comparison with ultrasounds extraction. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 137; 1-11.
- Kit Leong, Y.; Yang, F.; Chang, J.; (2021). Extraction of polysaccharides from edible mushrooms: Emerging technologies and recent advances. *Carbohydrate Polymers*, 251; 117006.
- Lama-Muñoz, A.; Rubio-Senent, F.; Bermúdez-Oria, A.; Fernández-Bolaños, J.; Fernández Prior, A.; Rodríguez-Gutiérrez, G.; (2019). The use of industrial thermal techniques to improve the bioactive compounds extraction and the olive oil solid waste utilization. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 55; 11-17.
- Lehoux Dubois, C.; Boudreau, V.; Potter, K. J.; Colomba, J.; Lavoie, A.; Mailhot, M.; Desjardins, K.; Rabasa-Lhoret, R.; (2023). Acute soluble fiber supplementation has no impact on reducing post-prandial glucose excursions in adults with cystic fibrosis and glucose intolerance. *Annales d' Endocrinologie*, 1482; 1-6.
- Levate Macedo, L.; Gomes Corrêa, J. L.; Petri Júnior, I.; da Silva Araújo, C.; Costa Vimercati, W.; (2022). Intermittent microwave drying and heated air drying of fresh and isomaltulose (Palatinose) impregnated strawberry. *LWT*, 155; 112918.
- Li, Y.; Fabiano-Tixier, A. S.; Tomao, V.; Cravotto, G.; Chemat, F.; (2013). Green ultrasound-assisted extraction of carotenoids based on the bio-refinery concept

- using sunflower oil as an alternative solvent. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20; 12-18.
- Liang-Yu, C.; Chien-Wei, C.; Ji-Yuan, L.; (2015). Effect of esterification condensation on the Folin–Ciocalteu method for the quantitative measurement of total phenols. *Food Chemistry* 170; 10-15.
 - Lombardo, S.; Pandino, G.; Mauromicale, G.; Knodler, M.; Carle, R.; Schieber, A.; (2010). Influence of genotype, harvest time and plant part on polyphenolic composition of globe artichoke [*Cynara cardunculus* L. var. *scolymus* (L.) Fiori]. *Food Chemistry*, 119; 1175-1181.
 - Luque Guillén, M. V.; (2009). Estructura y propiedades de las proteínas. Universidad de Valencia.
 - Luna, J. C.; Barreto, J. A.; Marín, Z. T.; (2016). Desarrollo de un modelo matemático que permita predecir el cambio del contenido de polifenoles en una matriz alimentaria sometida a tratamientos térmicos con diferentes condiciones. *Alimentos hoy*. Vol 24, No 39.
 - Mabeau, S.; Baty-Julien, C.; Chodosas, O.; Surbled, M.; Chesné, C.; Mekideche, K.; Metra, P.; Durand, D.; Morice, G.; (2007). Book in *Acta horticulturae*.
 - Mandima, F.; Petropoulos, S. A.; Dias, M. I.; Pinela, J.; Kostic, M.; Soković, M.; Santos-Buelga, C.; Ferreira, I. C.F.R.; Barros, L.; (2021). Seasonal variation in bioactive properties and phenolic composition of cardoon (*Cynara cardunculus* var. *altilis*) bracts. *Food Chemistry*, 336; 127744.
 - Mannozi, C.; Fauster, T.; Haasa, k.; Tylewicz, U.; Romani, S.; Dalla Rosa, M.; Jaeger, H.; (2018). Role of thermal and electric field effects during the pre-treatment of fruit and vegetable mash by pulsed electric fields (PEF) and ohmic heating (OH). *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 48; 131-137.
 - MAPAMA (2019). Fruta de Pepita Campaña 2018-19 Previsión Producción. Precios Comercio Exterior BOLETÍN 5/2018-19MES DE MAYO 2019.
 - Marića, M.; Grassino, A. N.; Zhuc, Z.; Barbad, F. J.; Brnčićb, M.; Brnčić, S. R.; (2018). An overview of the traditional and innovative approaches for pectin extraction from plant food wastes and by-products: Ultrasound, microwaves-, and enzyme-assisted extraction. *Trends in Food Science & Technology*, 76; 28-37.
 - Martínez- Girón, J.; Ordóñez- Santos, L.E.; (2015). Efecto del procesamiento térmico sobre el color superficial del pimentón rojo (*Capsicum annuum*) Variedad “Nataly”. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, Vol 13, No. 2; 104-113.

- Maupoey, P. F.; Andrés Grau, A. M.; Barat Baviera, J. M.; Abors Sorolla, A. M.; (2001). Introducción al secado de alimentos por aire caliente. Universitat Politècnica de Valencia. Ref: 4092_02_01_03.
- Mejía-Reyes, J. D.; García-Cabrera, K. E.; Velázquez-Ovalle, G.; Vázquez-Ovando, A.; (2021). Capacidad antioxidante: conceptos, métodos de cuantificación y su aplicación en la caracterización de frutos tropicales y productos derivados Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales Volumen 9 (1): 9-33.
- Melgar, B.; Dias, M. I.; Ciric, A.; Sokovic, M.; Garcia-Castello, E. M.; Rodriguez-Lopez, A. D.; Barros, L.; Ferreira, I.; (2017). By-product recovery of *Opuntia* spp. peels: Betalainic and phenolic profiles and bioactive properties. *Industrial Crops & Products* 107; 353-359.
- Mena-García, A.; Rodríguez-Sánchez, S.; Ruiz-Matute, A.I.; Sanz, M.L.; (2020). Exploitation of artichoke byproducts to obtain bioactive extracts enriched in inositols and caffeoylquinic acids by Microwave Assisted Extraction. *Journal of Chromatography A*, 1613; 460703.
- Mendez-Carmona, J.Y.; Ramírez-Guzman, K. N.; Ascacio-Valdes, J. A.; Sepulveda, L.; Aguilar, C. N.; (2022). Solid-state fermentation for recovery of carotenoids from tomato waste. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 80; 103108.
- Mendez-Carmona, J.Y.; Ascacio-Valdes, J.A.; Alvarez-Perez, O. B.; Hernandez-Almanza, A. Y.; Ramírez-Guzman, N.; Sepúlveda, L.; Aguilar-Gonzalez, M. A.; Ventura-Sobrevilla, J. M.; Aguilar, C. N.; (2022). Tomato waste as a bioresource for lycopene extraction using emerging technologies. *Food Bioscience*, 49; 101966.
- Mendoza-Isaza, N., A.; Hoyos –Arbeláez, J. A.; Peláez-Jaramillo, C. A.; (2020). Capacidad antioxidante y contenido de polifenoles totales de extractos de tallo de *Stevia rebaudiana* en varios modelos in vitro. *Revista EIA*, 17(34), Julio-diciembre, Reia34006. <https://doi.org/10.24050/reia.v17i34.1282>.
- Miccio, M.; Pierri, R.; Cuccurullo, G.; Metallo, A.; Brachi, P.; (2020). Process intensification of tomato residues drying by microwave heating: experiments and simulation. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 156; 108082.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2016). Superficies y producción de hortalizas (toneladas). Destino de producción 2014. Fuente: Anuario de estadística.
- Ministerio De Agricultura, Pesca Y Alimentación, Informe Anual De La Industria Alimentaria Española Periodo 2015 – 2016.

- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, Procedimiento para la declaración de subproducto, MAPAMA 2017.
- Ministerio de Consumo (2020). Economía circular y consumo sostenible.
- Mirab, B.; Ahmadi Gavlighi, H.; Amini Sarteshnizi, R.; Hossein Azizi, M.; Udenigwe, C.; (2020). Production of low glycemic potential sponge cake by pomegranate peel extract (PPE) as natural enriched polyphenol extract: Textural, color and consumer acceptability. *LWT*, 134; 109973.
- Mohammadi, P.; Taghavi, E.; Ying Foong, S.; Rajaei, A.; Amiri, H.; de Tender, C.; Peng, W.; Shiung Lam, S.; Aghbashlo, M.; Rastegari, H.; Tabatabaei, M.; (2023). Comparison of shrimp waste-derived chitosan produced through conventional and microwave-assisted extraction processes: Physicochemical properties and antibacterial activity assessment. *International Journal of Biological Macromolecules*, 242; 124841.
- Monetta, P.; (2015). Dos opciones de aprovechamiento de Alperujo: aplicación directa al suelo y compostaje con residuos agroindustriales. IV Jornadas de Actualización en olivo, INTA EEA San Juan.
- Mora-Escobedo (2013). Elika, Fundación vasca para la seguridad alimentaria. *Listeria monocytogenes*. www.elika.net.
- Moragas, M.; Valcárcel, S.; Chirapozu, A.; de Pablo, B.; (2019). Recopilación de normas microbiológicas de los alimentos y asimilados (superficies, aguas diferentes de consumo, subproductos) y otros parámetros físico-químicos de interés sanitario. Actualizada a 1 ENERO de 2019.
- Moreira, S. A.; Alexandria Elisabete, M.C.; Pintado, M.; Saraiva, J. A.; (2019). Effect of emergent non-thermal extraction technologies on bioactive individual compounds profile from different plant materials. *Food Research International*, 115; 177-190.
- Muñoz-Bernal, Ó. A.; Torres-Aguirre, G. A.; Núñez-Gastélum, J A.; de la Rosa, L. A.; Rodrigo-García, J.; Ayala-Zavala, J. F.; Álvarez-Parrilla, E.; (2020). Nuevo acercamiento a la interacción del reactivo de folin-ciocalteu con azúcares durante la cuantificación de polifenoles totales. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 20(2): 23-28.
- Muñoz, C. W.; Chavez, R. W.; Pabón, L. C.; Rendón, F. M. R.; Chaparro, P. M.; Otálvaro-Álvarez, Á. M.; (2015). Extracción de compuestos fenólicos con

- actividad antioxidante a partir de Champa (*Campomanesia lineatifolia*) Revista CENIC. Ciencias Químicas, vol. 46, 38-46.
- Muñoz rojas, A. G.; Vega Viera, J. A.; Ortecho Kuriaki, J.; (2014). Efecto de la temperatura, oxígeno y luz en la oxidación de las grasas. Universidad Nacional del Santa.
 - Naliyadhara, N; Kumar, A; Girisa, S; Daimary, U; Hegde, M; Kunnumakkara , A.B.;(2022). Pulsed electric field (PEF): Avant-garde extraction escalation technology in food industry. Trends in food science and technology. Volume 122; Pages 238-255
 - Namir, M.; Elzahar, K.; Ramadan, M. F.; Allaf, K.; (2017). Cactus pear peel snacks prepared by instant pressure drop texturing: Effect of process variables on bioactive compounds and functional properties. Food Measure 11:388–400.
 - Nandhu Lal, A.M.; Prince, M.V.; Kothakota, A.; Pandiselvam, R.; Thirumdas, R.; Kumar Mahanti, N.; Sreeja, R.; (2021). Pulsed electric field combined with microwave-assisted extraction of pectin polysaccharide from jackfruit waste. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 74; 102844
 - Ninčević Grassino, A.; Barba, F. J.; Brnčić, M.; Lorenzo J. M.; Lucini, L.; Rimac Brnčić, S.; (2018). Analytical tools used for the identification and quantification of pectin extracted from plant food matrices, wastes and by-products: A review. Food Chemistry 266; 47-55.
 - Nunes, M. A.; Pimentel, F. B.; Costa Anabela, S.G., Alves Rita C.; Oliveira, M. B. P.P.; (2016). Olive by-products for functional and food applications: Challenging opportunities to face environmental constraints. Innovative Food Science and Emerging Technologies 35; 139-148.
 - Ohaco, E.; De Michelis, A.; (2015). Deshidratación y desecado de frutas, hortalizas y hongos. Procedimientos hogareños y comerciales de pequeña escala. INTA Ediciones. Disponible en: <https://inta.gob.ar/documentos/deshidratacion-y-desecado-de-frutas-hortalizas-y-hongos.-procedimientos-hogarenos-y-comerciales-de-pequena-escala>)
 - Okoliea Chigozie, L.; Akanbib Taiwa, O.; Masona, B.; Udenigwec Chibuike, C.; Aryee Alberta, N.A.; (2019). Influence of conventional and recent extraction technologies on physicochemical properties of bioactive macromolecules from natural sources: A review. Food Research International, 116; 827-839.
 - Ordóñez-Santos, L. E.; Esparza-Estrada, J.; Vanegas-Mahecha, P.; (2021). Ultrasound-assisted extraction of total carotenoids from mandarin epicarp and

- application as natural colorant in bakery products. *LWT – Food Science and Technology*, 139; 110598.
- Ortega Quintana, F.A.; Montes Montes, E.J.; (2015). Efecto del escaldado y la temperatura sobre el color y textura de rodajas de yuca en freído por inmersión. *Rev.ion.*;28(1):19-28.
 - Özyürek, M.; Bener, M.; Güçlü, K.; Apak, R.; (2014). Antioxidant/antiradical properties of microwave-assisted extracts of three wild edible mushrooms. *Food Chemistry*, 157; 323-331.
 - Padilla-Rascón, C.; Romero-García, J. M.; Ruiz, E.; Romero, I.; Castro E.; (2021). Microwave-assisted production of furfural from the hemicellulosic fraction of olive stones. *Process Safety and Environmental Protection*, 152; 630-640.
 - Pataro, G.; Carullo, D.; Bakar Siddique, M. A.; Falcone, M.; Donsì, F.; Ferrari, G.; (2018). Improved extractability of carotenoids from tomato peels as side benefits of PEF treatment of tomato fruit for more energy-efficient steam-assisted peeling. *Journal of Food Engineering*, 233; 65-73.
 - Peanparkdeea, M.; Iwamoto, S.; (2019). Bioactive compounds from by-products of rice cultivation and rice processing: Extraction and application in the food and pharmaceutical. *Industries. Trends in food Sciences and Technology* 86; 109-117.
 - Pinho, A. R.; Fortuna, A.; Falc~ao, A.; Santos, A. C.; Seiça, R.; Estevens, C.; Veiga, F.; Ribeiro, A. J.; (2019). Comparison of ELISA and HPLC-MS methods for the determination of exenatide in biological and biotechnology-based formulation matrices. *Journal of Pharmaceutical Analysis* 9; 143-155.
 - Plaza González, P.J.; (2015). Control De La Temperatura En Sistemas De Calentamiento Por Microondas. Tesis Doctoral. Universidad politécnica de Valencia.
 - Prieto, M.J.; Jimenez López, M.P.:(2020). Efectos del cocinado de los alimentos sobre los compuestos fitoquímicos y la actividad antioxidante. Trabajo de fin de grado.
 - Puértolas, E.; Álvarez, I.; Raso, J.; Martínez de Marañón, I; (2013). Aplicación industrial de los pulsos eléctricos de alto voltaje para la pasteurización de alimentos: revisión de su viabilidad técnica y comercial, *CyTA – Journal of Food*, 111; 81-88.
 - Punia Bangar, S.; Chaudhary, V.; Kajla P.; Balakrishnan, G.; Phimolsiripol, Y.; (2024). Strategies for upcycling food waste in the food production and supply chain. *Trends in Food Science & Technology*, 143; 104314.

- Qin, P.; Liu, C.; Liang, Y.; Sun, H.; Chai, Y.; Yang, T.; Gong, X.; Wu, Z.; (2023). Extraction and utilization of active substances from edible fungi substrate and residue: A review. *Food Chemistry*, 398; 133872.
- Quiñones, M.; Miguel, M.; Aleixandre, A.; (2012). Los polifenoles, compuestos de origen natural con efectos saludables sobre el sistema cardiovascular. *Nutrición hospitalaria*, 27(1):76-89.
- Rabetafika H. N.; Bchir, B.; Blecker, C.; Riche, I. A.; (2014). Fractionation of apple by-products as source of new ingredients: Current situation and perspectives. *Trends in food science and technology* 40; 99-114.
- Ramos, M.; Burgos, N.; Barnar, S.; Evans, G.; Preece, J.; Graz, M.; Ruthes, A. C.; Jiménez-Quero, A.; Martínez-Abad, A.; Vilaplana, F.; Pham Ngoc, L.; Brouwer, A.; van der Burg, B.; Garrigós, M. C.; Alfonso Jiménez, A.; (2019). *Agaricus bisporus* and its by-products as a source of valuable extracts and bioactive compounds. *Food Chemistry* 292; 176-187.
- Ramírez-Rosas, J.; Gómez-Salazar, J. A.; Abraham-Juárez, M. R.; Cerón-García, A.; (2019). Evaluación Físicoquímica de la calidad en salsas de tomate (Cátsup). *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos Vol 4*.
- Razzaghia Seyed, E.; Arabhos seinia, A.; Turkb, M.; Soubrat, T.; Cendres, A.; Kianmehra, M. H. Perino, S.; Chemat, F.; (2019). Operational efficiencies of six microwave-based extraction methods for orange peel oil. *Journal of Food Engineering*, 241; 26-32.
- Renard Catherine, M.G.C.; Nunes, F. M.; Bastosa, R.; Coelho, E. W. D. F.; Coimbra, M. A.; Cardoso S. M.; (2019) Revisiting the chemistry of apple pomace polyphenols. *Food chemistry* 294; 9-18.
- Renard, C. M.G.C.; (2023). Extraction of bioactives from fruit and vegetables: State of the art and perspectives. *LWT - Food Science and Technology*, 93; 390-395.
- Reyes Ballesteros, M. S.; (2017). Determinación de polifenoles en infusiones mediante análisis de inyección en flujo. Trabajo Fin de Grado. Departamento de Ingeniería Química Industrial y del Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Madrid.
- Ribeiro, A. M.; Estevinho, B. N.; Rocha F.; (2019). Microencapsulation of polyphenols - the specific case of the microencapsulation of *Sambucus Nigra L.* extracts - A review. *Trends in Food Science & Technology*.
- Rioja Antezana, A. P.; Vizaluque, B. E.; Aliaga-Rossel, E.; Tejeda, L.; Book, O.; Mollinedo, P.; Mauricio Peñarrieta, J.; (2018). Determinación de la capacidad antioxidante total, fenoles totales, y la actividad enzimática en una bebida no

láctea en base a granos de chenopodium quinoa. Revista Boliviana de Química, vol. 35, núm. 5, 168-176.

- Rodríguez-Gutiérrez, G.; Cubero Cardoso, J.; Rubio-Senent, F.; Serrano, A.; Borja, R.; Fernández-Bolaños, J.; Feroso Fernando, G.; (2019). Thermally treated strawberry extrudate: A rich source of antioxidant phenols and sugars Innovative Food Science and Emerging Technologies 51; 186-193.
- Rudić, S.; Dimitrijevic-Brankovic, S.; Dimitrijevic, S.; Milić, M.; (2021). Valorization of unexploited artichoke leaves dust for obtaining of extracts rich in natural antioxidants. Separation and Purification Technology, 256; 117714.
- Ruiz-Aceituno, L.; García-Sarrió, Alonso-Rodríguez, B.; Ramos, L.; Sanz, M. L.; (2016). Extraction of bioactive carbohydrates from artichoke (*Cynara scolymus* L.) external bracts using microwave assisted extraction and pressurized liquid extraction. Food Chemistry, 196; 1156-1162.
- Ruiz Benitez, M. L.; (2020). Determinación de la actividad antioxidante. Programa académico: Química y Farmacia. Universidad Simón Bolívar.
- Samir Vedia-Quispe, V.; DeyseGurak, P.; Karin Espinoza, S.; Ruano-Ortiz, J. A.; (2016). Calidad fisicoquímica, microbiológica y sensorial de tallarines producidos con sustitución parcial de sémola de trigo por harina de amaranto. Revista Española de Nutrición Humana y Dietética, 20(3); 190-197.
- Sataria, B.; Karimi, K.; (2018). Citrus processing wastes: Environmental impacts, recent advances, and future perspectives in total valorization. Resources, Conservation and Recycling, 129; 153-167.
- Seixas, F. L.; Fukuda Deise, L.; Turbiani Franciele, R. B.; Garcia, P. S.; Petkowicz, C. L.; Jagadevan, S.; Gimenes Marcelino, L.; (2014). Extraction of pectin from passion fruit peel (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*) by microwave-induced heating. Food Hydrocolloids, 38; 186-192.
- Sepúlveda, C.T.; Zapata, J.E.; (2019). Efecto de la Temperatura, el pH y el Contenido en Sólidos sobre los Compuestos Fenólicos y la Actividad Antioxidante del Extracto de *Bixa orellana* L. Información Tecnológica Vol. 30(5); 57-66.
- Sharad Mali, P.; Kumar, P.; (2023). Optimization of microwave assisted extraction of bioactive compounds from black bean waste and evaluation of its antioxidant and antidiabetic potential in vitro. Food Chemistry Advances 3; 100543.
- Shimeles, T.; Do Su, P.; Mu Hong, S.; In Geun, H.; Seok Hyeon, K.; Han Ryul, C.; Cheon Soon, J.; (2018). Prediction of lycopene and β -carotene in tomatoes by portable chromameter and VIS/NIR spectra. Postharvest Biology and Technology 136; 50-56.

- Singh Chouhan, K. B.; Tandey, R.; Kumar Sen, K.; Mehta, R.; Mandal, V.; (2020). Microwave hydrodiffusion and gravity model with a blend of high and low power microwave firing for improved yield of phenolics and flavonoids from oyster mushroom. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 17; 100311.
- Soares Mateus, A.R.; Pena, A.; Sendon, R.; Almeida, C.; Almeida Nieto, G.; Khwaldia, K.; Sanches Silva, A.; (2023). By-products of dates, cherries, plums and artichokes: A source of valuable bioactive compounds. *Trends in Food Science & Technology*, 131; 220-243.
- Stumpf, B.; Künne, M.; Ma, L.; Xua, M.; Yan, F.; Piepho, H.P.; Honermeier, B.; (2020). Optimization of the extraction procedure for the determination of phenolic acids and flavonoids in the leaves of globe artichoke (*Cynara cardunculus* var. *scolymus* L.). *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 177; 112879.
- Szabo, K.; Cătoi, A. F.; Vodnar Dan, C.; (2018). Bioactive Compounds Extracted from Tomato Processing by-products as a Source of Valuable Nutrients. *Plant Foods for Human Nutrition*, 73; 268–277.
- Trujillo-Reyes, Á.; Cubero-Cardoso, J.; Rodríguez-Gutiérrez, G.; García-Martín, J. F.; Rodríguez-Galán, M.; Borja, R.; Serrano Feroso, F. G.; (2019). Extraction of phenolic compounds and production of biomethane from strawberry and raspberry extrudates. *Biochemical Engineering Journal* 147; 11-19.
- Umaña, M.; Eim, V.; Garau, C.; Rosselló, C.; Simal, S.; (2020). Ultrasound-assisted extraction of ergosterol and antioxidant components from mushroom by-products and the attainment of a β -glucan rich residue. *Food Chemistry*, 332; 127390.
- Vedia-Quispe, V. S.; Gurak, P- D.; Espinoza, S. K.; Ruano-Ortiz, J. A.; (2016). Calidad fisicoquímica, microbiológica y sensorial de tallarines producidos con sustitución parcial de sémola de trigo por harina de amaranto. *Rev Esp Nutr Hum Diet*, 20(3); 190 – 197.
- Velasco Martín, A.; (2014). Farmacología y toxicología del alcohol etílico, o etanol. *An Real Acad Med Cir Vall*, 51; 242-248.
- Vernès, L.; Abert-Vian, M.; ElMaâtaoui, M.; Tao, Y.; Bornard, I.; Chemat, F.; (2019). Application of ultrasound for green extraction of proteins from spirulina. Mechanism, optimization, modeling, and industrial prospects. *Ultrasonics – Sonochemistry*, 54; 48-60.
- Villanueva-Suárez, M. J.; Mateos-Aparicio, I.; Pérez-Cózar, M. L.; Yokoyama, W.; Redondo-Cuenca, A.; (2019). Hypolipidemic effects of dietary fiber from an

- artichoke by-product in Syrian hamsters. *Journal of Functional Foods* 56; 156-162.
- Virot, M.; Tomao, V.; Le Bourvellec, C.; Renard, C. M.C.G.; Chemat, F.; (2010). Towards the industrial production of antioxidants from food processing by-products with ultrasound-assisted extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 17; 1066-1074.
 - Vivanco, D.; Ardiles, P.; Castillo, D.; Puente, L.; (2021). Emerging technology: Pulsed Electric Fields (PEF) for food treatment and its effect on antioxidant content. *Revista Chilena de Nutrición*, 48(4); 609-619.
 - Xiaofen Du, M. D.; (2023). Primary exploration of mushroom protein hydrolysis and cooking impact on the protein amino acid profiles of *Agaricus bisporus* and *Lentinula edodes* mushrooms. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 32; 100710.
 - Xiaokang, W.; Lyng, J. G.; Brunton, N. P.; Cody, L.; Jacquier, J. C.; Harrison, S. M.; Papoutsis, K.; (2020). Monitoring the effect of different microwave extraction parameters on the recovery of polyphenols from shiitake mushrooms: Comparison with hot-water and organic-solvent extractions. *Biotechnology Reports*, 27; e00504.
 - Yang, L.; He, Q. S.; Corscadden, K.; Udenigwe, C.; (2015). The prospects of Jerusalem artichoke in functional food ingredients and bioenergy production. *Biotechnology Reports*, 5; 77-88.
 - Zayed, A.; Serag, A.; Farag, M. A.; (2020). *Cynara cardunculus* L.: Outgoing and potential trends of phytochemical, industrial, nutritive and medicinal merits. *Journal of Functional Foods*, 69; 103937.
 - Zayed, A.; Farag, M. A.; (2020). Valorization, extraction optimization and technology advancements of artichoke biowastes: Food and non-food applications. *LWT*, 132; 109883.
 - Zhang, C.; Lyu, X.; Naveed Arshad, R.; Muhammad Aadil, R.; Tong, Y.; Zhao, W.; Yang, R.; (2023). Pulsed electric field as a promising technology for solid foods processing: A review. *Food Chemistry* 403; 134367.

ANEXOS

ANEXO 1. Hojas de cata de los diferentes productos

NOMBRE

FECHA

MUESTRA

MUESTRA BIZCOCHO

INTENSIDAD DE COLOR ◆—————CLARO—————◆
 OSCURO

INTENSIDAD DE OLOR ◆—————NADA—————MUCHO—————◆

INTENSIDAD DE FLAVOR ◆—————NADA—————MUCHO—————◆

FLAVORES ANÓMALOS _____ **INTENSIDAD** _____

SABORES ANÓMALOS _____ **INTENSIDAD** _____

DUREZA ◆—————NADA DURO—————MUY DURO—————◆


MASTICABILIDAD ◆—————NADA MASTICABLE—————MUY MASTICABLE—————◆

NÚMERO DE MASTICACIONES _____

JUGOSIDAD ◆—————NADA JUGOSO—————MUY JUGOSO—————◆

GOMOSIDAD ◆—————NADA GOMOSO—————MUY GOMOSO—————◆

ESPONJOSIDAD ◆—————NADA ESPONJOSO—————MUY ESPONJOSO—————◆

	NOMBRE
	FECHA
	MUESTRA

CÓDIGO DE MUESTRA: _____

P1. ¿Cuánto te gusta el ASPECTO del producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P2. ¿Cuánto te gusta el COLOR de este producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P3. ¿Cuánto te gusta el OLOR de este producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P4. ¿Cuánto te gusta el SABOR de este producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P5. ¿Cuánto te gusta la TEXTURA de este producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P6. ¿Cuánto te gusta GLOBALMENTE?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

NOMBRE

FECHA

MUESTRA

MUESTRA SALSA TOMATE

INTENSIDAD DE COLOR ◆————— CLARO ————— OSCURO —————◆

INTENSIDAD DE OLOR ◆————— NADA ————— MUCHO —————◆

INTENSIDAD DE FLAVOR ◆————— NADA ————— MUCHO —————◆

FLAVORES ANÓMALOS _____ **INTENSIDAD** _____

SABORES ANÓMALOS _____ **INTENSIDAD** _____

UNTUOSIDAD ◆————— NADA UNTUOSO ————— MUY UNTUOSO —————◆

FIBROSIDAD ◆————— NADA FIBROSO ————— MUY FIBROSO —————◆

NOMBRE

FECHA

MUESTRA

CÓDIGO DE MUESTRA: _____

P7. ¿Cuánto te gusta el ASPECTO del producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P8. ¿Cuánto te gusta el COLOR de este producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P9. ¿Cuánto te gusta el OLOR de este producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P10. ¿Cuánto te gusta el SABOR de este producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P11. ¿Cuánto te gusta la TEXTURA de este producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P12. ¿Cuánto te gusta GLOBALMENTE?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

NOMBRE

FECHA

MUESTRA

MUESTRA KETCHUP

INTENSIDAD DE COLOR ◆————— CLARO ————— OSCURO —————◆

INTENSIDAD DE OLOR ◆————— NADA ————— MUCHO —————◆

INTENSIDAD DE FLAVOR ◆————— NADA ————— MUCHO —————◆

FLAVORES ANÓMALOS _____ **INTENSIDAD** _____

SABORES ANÓMALOS _____ **INTENSIDAD** _____

UNTUOSIDAD ◆————— NADA UNTUOSO ————— MUY UNTUOSO —————◆

FIBROSIDAD ◆————— NADA FIBROSO ————— MUY FIBROSO —————◆

NOMBRE

FECHA

MUESTRA

CÓDIGO DE MUESTRA: _____

P13. ¿Cuánto te gusta el ASPECTO del producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P14. ¿Cuánto te gusta el COLOR de este producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P15. ¿Cuánto te gusta el OLOR de este producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P16. ¿Cuánto te gusta el SABOR de este producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P17. ¿Cuánto te gusta la TEXTURA de este producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P18. ¿Cuánto te gusta GLOBALMENTE?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

NOMBRE

FECHA

MUESTRA

MUESTRA PLATO PASTA

INTENSIDAD DE COLOR ◆————— CLARO ————— OSCURO —————◆

INTENSIDAD DE OLOR ◆————— NADA ————— MUCHO —————◆

INTENSIDAD DE FLAVOR ◆————— NADA ————— MUCHO —————◆

FLAVORES ANÓMALOS _____ **INTENSIDAD** _____


SABORES ANÓMALOS _____ **INTENSIDAD** _____

DUREZA ◆————— NADA DURO ————— MUY DURO —————◆

MASTICABILIDAD ◆————— NADA MASTICABLE ————— MUY MASTICABLE —————◆

NÚMERO DE MASTICACIONES _____

GOMOSIDAD ◆————— NADA GOMOSO ————— MUY GOMOSO —————◆

	NOMBRE
	FECHA
	MUESTRA

CÓDIGO DE MUESTRA: _____

P19. ¿Cuánto te gusta el ASPECTO del producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P20. ¿Cuánto te gusta el COLOR de este producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P21. ¿Cuánto te gusta el OLOR de este producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P22. ¿Cuánto te gusta el SABOR de este producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P23. ¿Cuánto te gusta la TEXTURA de este producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P24. ¿Cuánto te gusta GLOBALMENTE?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

NOMBRE

FECHA

MUESTRA

MUESTRA HAMBURGUESA

INTENSIDAD DE COLOR ◆—————CLARO—————◆
 OSCURO

INTENSIDAD DE OLOR ◆—————NADA—————MUCHO—————◆

INTENSIDAD DE FLAVOR ◆—————NADA—————MUCHO—————◆

FLAVORES ANÓMALOS _____ **INTENSIDAD** _____

SABORES ANÓMALOS _____ **INTENSIDAD** _____


DUREZA ◆—————NADA DURO—————MUY DURO—————◆

MASTICABILIDAD ◆—————NADA MASTICABLE—————MUY MASTICABLE—————◆

NÚMERO DE MASTICACIONES _____

JUGOSIDAD ◆—————NADA JUGOSO—————MUY JUGOSO—————◆

GOMOSIDAD ◆—————NADA GOMOSO—————MUY GOMOSO—————◆

	NOMBRE
	FECHA
	MUESTRA

CÓDIGO DE MUESTRA: _____

P25. ¿Cuánto te gusta el ASPECTO del producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P26. ¿Cuánto te gusta el COLOR de este producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P27. ¿Cuánto te gusta el OLOR de este producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P28. ¿Cuánto te gusta el SABOR de este producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P29. ¿Cuánto te gusta la TEXTURA de este producto?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

P30. ¿Cuánto te gusta GLOBALMENTE?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
No me gusta				Ni me gusta ni me disgusta				Me gusta mucho

ANEXO 2. Artículo colaborativo publicado



Contents lists available at ScienceDirect

LWT

journal homepage: www.elsevier.com/locate/lwt

A comparative evaluation of the phenol and lycopene content of tomato by-products subjected to different drying methods

Bianca Souza da Costa^a, Marta Oliván García^b, Germán Soldevilla Muro^b, Maria-Jose Motilva^{a,*}

^a Instituto de Ciencias de la Vid y del Vino-ICVV (Consejo Superior de Investigaciones Científicas-CSIC, Gobierno de La Rioja, UR), Finca La Grajera, Ctra. de Burgos Km. 6 (LO-20, - salida 13), 26007, Logroño, La Rioja, Spain

^b Centro Tecnológico Agroalimentario CTIC CITA, Ctra. Nacional 120 km 22,8, 26315, Alesón, La Rioja, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:

Circular bio-economy
Drying technology
Lycopene
Phenolic compounds
Tomato pomace

ABSTRACT

This study is focused on exploring tomato by-products to provide ingredients rich in bioactive compounds with higher functional value through applying innovative techniques (microwave and spiral flash dryer) and conventional techniques (freeze-drying and hot air-drying) to the dehydration of industrial tomato pomace. The effect of the drying method on the bioactive composition of the tomato by-products (phenols, lycopene and soluble dietary fiber) was analyzed. The phenolic composition was determined using a targeted chromatographic approach based on UHPLC-QqQ-MS/MS. Large amounts of naringenin (194.7–949.4 mg/kg) were detected, together with quercetin, caffeic acid, coumaric acid and 4-hydroxybenzoic acid. Microwave dehydration improved the retention of flavanone-like compounds, especially naringenin, and lycopene, while tomato products dehydrated with Spiral Flash dryer showed higher concentrations of flavonols and phenolic acids. The results showed that the industrial application of drying processes using Spiral Flash, and especially with microwaves, could be promising for producing high added-value ingredients from tomato by-products.

1. Introduction

The tomato (*Lycopersicon esculentum*) is one of the most widely cultivated vegetables in the world, with a production of about 180 million tons (FAO, 2019). Due to the seasonality and high perishability of this fruit, only a proportion of tomato production is consumed as fresh product. In 2019, about 367,000 tons of tomatoes were processed by the food industry (FAO, 2019). Commercially, there are different tomato products, such as whole peeled canned tomato, juice, puree, paste, sauce, and ketchup (Rajan et al., 2022). Industrial tomato processing generates a large amount of waste, commonly called tomato pomace (TP) (Bhatkar et al., 2021). The composition of this TP varies depending on the type of final product, e.g. canned tomatoes generate a residue consisting mainly of peel, while in the production of juice, paste and puree, the TP consists of a mixture of peel and seeds (Bhatkar et al., 2021) representing between 3% and 5% of the fresh tomato by weight (Rajan et al., 2022). Tomato and tomato by-products contain a great variety of biologically active compounds, including carotenoids,

proteins, minerals, dietary fiber and oils (Grassino et al., 2020; Zuorro et al., 2013).

Seeking a valorization of the TP, previous studies have shown that dehydrated TP can be added to such products as ketchup (Belović et al., 2018), meat products (Eyiler & Oztan, 2011) and bread (Majzoobi et al., 2011) without affecting their technological properties and with a high sensory acceptance. Other works also reinforce that, besides nutritionally enriching such products as pasta (Padalino et al., 2017) and cracker biscuits (Isik & Topkaya, 2016), and even ice-cream (Rizk et al., 2014), the addition of TP led to higher antioxidant activity and storage stability due to the presence of phenolic compounds. Nowadays, there is growing interest in the study of the bioactivity and health properties of tomato by-products. Studies with tomato (peel and seeds) and by-products show antioxidant and antimutagenic activities (Kumar et al., 2021; Valdez-Morales et al., 2014), and protection from oxidative stress in an *in-vitro* model of human endothelial vascular cells (HUVEC) (Cesare et al., 2021). Recently, Perea-Domínguez et al. (2021) observed that the phenolic fractions obtained from industrial tomato by-products showed

* Corresponding author. Instituto de Ciencias de la Vid y del Vino-ICVV, Finca La Grajera, Ctra. de Burgos Km. 6 (LO-20, - salida 13), 26007, Logroño, La Rioja, Spain.

E-mail address: motilva@icvv.es (M.-J. Motilva).

<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114644>

Received 17 October 2022; Received in revised form 28 February 2023; Accepted 6 March 2023

Available online 8 March 2023

0023-6438/© 2023 Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

antioxidant properties and an important anti-proliferative activity in the MCF-7 breast cancer cell line.

Despite the potential for valorization of tomato by-products, currently, the waste from tomato processing does not generate profits for the industries, resulting in a major management problem, mainly storage and preservation issues (Bhatkar et al., 2021; Silva et al., 2019). In particular, tomato processing is carried out during the summer, and, due to the high moisture content of the TP (by-product), the accumulation of this waste leads to uncontrolled anaerobic fermentation with the consequent environmental problems (Selvaggi et al., 2021). In the context of the circular bio-economy, the reuse of these agri-food residues to recover bioactive compounds is the key to reducing the disposal of organic waste from industrial processing (Selvaggi et al., 2021).

Undoubtedly, the vegetable processing industry's greatest challenge in handling waste is to stabilize it to obtain stable products that maintain their highly perishable bioactive compounds and nutritional properties. Drying is one of the oldest methods used to remove water for food preservation, as a lower water potential (water activity) is achieved for food stability during storage (Pateiro et al., 2022). Generally, methods involving hot air are used to dehydrate plant by-products (Bhatkar et al., 2021). However, some bioactive compounds from TP, such as lycopene, are highly sensitive to high temperatures (Bakir et al., 2023). Accordingly, such technologies as microwaves (Bakić et al., 2019), infrared drying process (Bakir et al., 2023) and ohmic technology (Coelho et al., 2019) have been used to improve the retention of bioactive compounds. However, many of these technologies have been explored on a laboratory scale, or combined with other extraction technologies to improve the process for obtaining lycopene-rich extracts from tomato by-products. The aim of this study was to search for the optimal drying technology for tomato by-products, easily scalable at an industrial level and allows ingredients to be obtained directly with a high shelf-stability and maximum retention of the valuable bioactive compounds, such as phenolic compounds, lycopene and soluble dietary fiber. Various dehydration processes were studied: freeze-drying, air-drying (40 °C and 60 °C), micro-wave assisted drying and Spiral Flash air drying. The tomato waste used in this study was the TP from industrial tomato processing (paste and pure), with a subsequent physical separation after dehydration into two fractions rich in peel and seeds, respectively. The phenolic composition of different tomato products was determined using a targeted chromatographic approach based on ultra-high performance liquid chromatography with tandem mass spectrometry (UHPLC-QqQ-MS/MS).

1. Materials and methods

Chemicals and reagents

Acetonitrile (HPLC-MS grade), methanol (HPLC grade) and formic acid (HPLC grade) were purchased from Scharlab Chemie (Sentmenat, Catalonia, Spain). The quercetin, quercetin-3-glucuronide, isorhamnetin-3-glucoside, syringetin-3-glucoside, epicatechin, dimer B1 and B2 and quercetin standards were purchased from Extrasynthese (Genay, France). Gallic acid, caffeic acid, ferulic acid, vanillic acid, syringic acid, *p*-hydroxybenzoic acid, 3,4-dihydroxybenzoic acid (protocatechuic acid), *p*-coumaric acid, (+)-catechin were acquired from Sigma-Aldrich (St. Louis, USA). Kaempferol-3-glucoside and caftaric acid were purchased from Purifa-Cymit (Barcelona, Spain). Coumaric acid and naringenin and were purchased from Phytolab (Madrid, Spain) and Fluochem (Hadfield, England), respectively. Stock solutions of standard compounds were prepared by dissolving each compound in methanol at a concentration of 1000 mg/L and stored in a dark flask at -20 °C. The water used was Milli-Q quality (Millipore Corp, Bedford, MA, USA).

Plant material

Tomato pomace (TP) samples, from the same tomato variety, were obtained from an industrial processing plant from J. Heinz Manufacturing Spain, S.L.U., located at Carretera Rincón de Soto-Corella, km. 2.8, 26,540 Alfaro, La Rioja (Spain), in October–November 2021, on 8 distinct days (8 batches of TP). The processing steps to produce tomato concentrate included washing, cold breaking, evaporating, and pasteurization to generate the final standard sauce (average 10° Brix, pH 4.2). The TP was obtained by squeezing tomatoes and was composed of a mixture of peel, seeds and a small proportion of pulp. Each batch (approximately 15 kg of TP) was collected in plastic containers immediately after being produced and transported to the food pilot plant of Centro Tecnológico Agroalimentario CTIC CITA (Calahorra, La Rioja, Spain). TP samples were frozen in an air-freezer chamber and stored (-20 °C) until the dehydration processes. The average composition of the TP was: moisture (53 g/100 g), protein (10 g/100 g), fat (8 g/100 g), ash (2 g/100 g) and fiber (soluble and insoluble fiber) (27 g/100 g).

Dehydration process of tomato by-products

In this study, the following dehydration processes were studied: freeze-drying, hot air-drying, a microwave system and Spiral Flash air drying (Fig. S1 Supporting Information). Prior to the drying processes, the tomato pomace was thawed in a cold chamber (5–8 °C). This step was performed for all processes except for freeze-drying, where the samples were placed directly into the freeze-dryer.

Freeze-drying

A laboratory-scale lyophilizer (Scanvac-CoolSafe-95-16-Pro freeze-dryer control, Bjarkesvej, Denmark) was used for freeze drying. The device has ice production capacity of 2.5 kg in 24 h. The TP samples were placed in Petri dishes, weighed (approximately 100 g) and frozen at ultra-low temperature (-80 °C) for 24 h before being placed in the freeze dryer chamber. The samples were dried for 24 h until complete dehydration in the freeze dryer operating at 0.1 bar pressure with a temperature ramp of -20 to 0 °C.

Hot air oven drying

The drying process was carried out in an air oven (POL-EKO, SLW400-STD, Wodzisław Śląski, Poland). The TP samples (approximately 5 g) were deposited in a thin layer (1 cm) on aluminum trays in the oven at 40 and 60 °C, respectively. For each temperature, the dehydration time was determined by weighing the sample at various time intervals during drying until the weight became constant. The optimized drying times for each air temperature were 8 and 3 h at 40 °C and 60 °C, respectively. Fig. S2 of Supporting Information shows the kinetic of dehydration of TP at 40 and 60 °C respectively.

Spiral flash air dryer

The dehydration process with the Spiral Flash dryer was carried out in the plant of the INGETECSA company (Barcelona, Spain). This dryer system is composed of a vertical chamber with a static blade ring and upper extraction, which can simultaneously dry and disperse organic materials without any risk of explosion due to mechanical friction (Fig. S1 of Supporting Information). In this system, the filtered hot air (140–160 °C) is pushed into the drying chamber by a fan, flowing through a static blade ring. The blades have a fixed orientation which generates a highly turbulent air flow. The TP to be dehydrated is introduced above the blade ring, and as the product falls, it is mixed with the hot air flow and the drying process is carried out quickly (20–60 s). Summarizing the process, the moist material (TP) is dosed into the drying chamber through a feeder, and dried by stirring and vortex flow. The temperature of the drying air is between 140 and 160 °C, but as it is a very turbulent process, the product does not exceed 45 °C, discharging

at around final humidity (10 g/100 g).

Microwave system

The process of dehydrating the TP was done in a prototype continuous-flow microwave oven (Model SI MAQ0101; Sairem Iberica S. L., Barcelona, Spain). This microwave system contains 4 magnetrons, each with a power of 1000 W. The TP samples were placed in a polypropylene tray and microwave-treated at 1500 W, 2250 W and 3000 W corresponding to 50, 75 and 100% respectively, of the output power using 3 magnetrons. These power levels were chosen based on preliminary experiments. In addition, cold air was introduced to avoid an excessive rise in temperature inside the TP samples, and the conveyor belt system moved back and forth to ensure the treatment was homogeneous.

Conditioning of dehydrated tomato by-products

In order to obtain different ingredients, one composed of a fraction rich in peel and the other in seeds, the dehydrated TP was manually sieved using various sieve sizes (CISA CEDACERIA INDUSTRIAL, S.L., Barcelona, Spain): ϕ 3.0, 2.5 and 1.8 mm (Fig. 1) to obtain five fractions with different particle size (F1 to F5). For the study of the phenolic and lycopene composition, the fraction retained on the ϕ 2.5 mm sieve, rich in tomato seeds (F2) was selected. The other selected fraction was the TP fraction passing through the sieve of ϕ 1.8 mm, rich in tomato peel (F5). After separation, the F2 and F5 fractions were weighed, and these corresponded respectively to approximately 60% and 30% of the tomato paste (TP). The dehydrated samples (tomato pomace TP and F2 and F5 fractions) were crushed directly in an IKA Instruments grinder (Staufen, Germany) with a power 420 W, transferred to falcon tubes and then stored at -80°C until their analysis.

Determination of individual phenolic compounds by ultra-high-performance liquid chromatography coupled to tandem mass spectrometry (UHPLC-QqQ-MS/MS)

Solid-liquid extraction of phenolic compounds

The phenolic compounds of the tomato by-products (tomato pomace TP, rich-seeds (F2) and rich-peel (F5) fractions) were extracted by a solid-liquid extraction (SLE) procedure, immediately before chromatographic analysis. For the extraction of phenols from the dehydrated (200 mg) and fresh (600 mg) samples, a volume of 4 mL of methanol/Milli-Q water/formic acid (79:20:1, v/v/v) was added. The mixture was vortexed and macerated overnight at 4°C in the dark. The samples were then sonicated at a frequency of 40 Hz for 5 min in an ultrasonic bath (Ultrasons P. Selecta, Barcelona, Spain). Then, each sample was centrifuged (9000 rpm/10 min/ 20°C) in a Sorvall LYNX 4000 Super-speed Centrifuge (Thermo ScientificTM, Madison, WI, USA). The supernatant was collected and filtered with a $0.22\ \mu\text{m}$ PTFE filter (Scharlab Chemie, Catalonia, Spain) and placed in a chromatographic vial (2 mL) prior to analysis.

Ultra-high-performance liquid chromatography coupled to tandem mass spectrometry (UPLC-QqQ-MS/MS)

The phenolic composition of the tomato by-products was evaluated using the method described by Costa et al. (2022). The phenol extracts were analyzed using ultra-high-performance liquid chromatography with triple-quadrupole mass spectrometry (UPLC/QqQ-MS/MS). The analyses were carried out in a liquid chromatograph Shimadzu Nexera (Shimadzu Corporation, Japan) coupled to a QTRAP mass spectrometer (AB Sciex 3200QTRAP[®], Sciex, USA). The polyphenol separation was performed using a column reversed-phase (Waters AcQuity BEH C18 column, $100\ \text{mm} \times 2.1\ \text{mm}$, $1.7\ \mu\text{m}$) equipped with a VanGuardTM AcQuity BEH C18 Pre-Column ($5 \times 2.1\ \text{mm}$, $1.7\ \mu\text{m}$) supplied by Waters (Milford, MA, USA). The chromatographic parameters used were flow rate: $0.45\ \text{mL/min}$; injection volume: $2.5\ \mu\text{L}$; temperature autosampler:

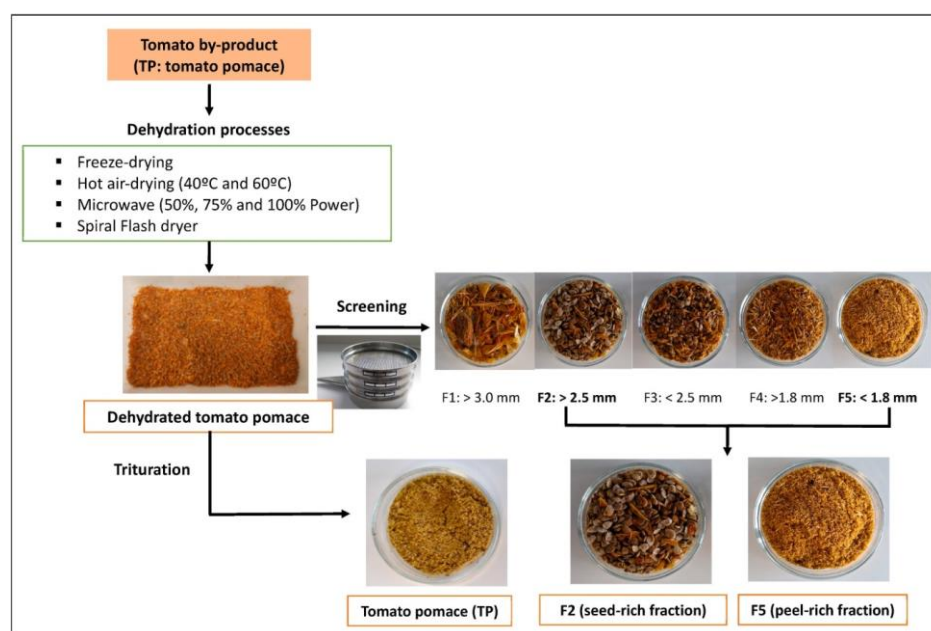


Fig. 1. Scheme of the dehydration treatments and the steps to obtain the different fractions of tomato by-products.

5 °C; and oven temperature: 40 °C.

For the analysis, a mobile phase of formic (0.1 mL/100 mL) acid in water (solvent A) and formic acid (0.1 mL/100 mL) in acetonitrile (solvent B) were used. The eluted compounds were analyzed using a 3200QTRAP triple quadrupole mass spectrometer (AB Sciex, USA) equipped with an electrospray ionization source (ESI Turbo V™ Source). The mobile phase elution gradient and the mass spectrometer parameters are described in [Costa et al. \(2022\)](#). For each phenolic compound, the retention time and MRM transitions, including the individual declustering potential (DP), entrance potential (EP), collision cell entrance potential (CEP), collision energy (CE) and collision cell exit potential (CXP) were acquired ([Table S1](#) Supporting Information). The data acquisition was conducted with the Analyst® 1.6.2 software (AB Sciex, USA).

For the identification of each phenolic compound, the retention time and spectra of its respective externally injected standard was used. The other compounds for which no standards were available were identified with the mass of the parent ion (M-H) and the typical MS fragmentation pattern described in the literature. The phenolic quantification was performed using the calibration curves of their corresponding pure commercial standards ([Table S2](#) of Supporting Information). In the case of compounds without standards available, the quantification was performed using the calibration curves of standards with similar chemical structures. The results were expressed as mg compound/kg tomato pomace (TP), seed-rich fraction (F2) or peel-rich fraction (F5), while the results for the fresh TP samples (raw) were expressed as mg/kg dry weight (raw sample), in order to compare with the dehydrated samples. The phenolic compounds identified and quantified were classified into

flavonoids: flavonols and flavanones, and phenolic acids (hydroxybenzoic and hydroxycinnamic acids).

Determination of lycopene

Lycopene was determined by a spectrophotometer method, as described by [Davis et al. \(2003\)](#). The tomato by-product sample (0.6 g) was weighed in a Falcon tube (50 mL), and 5 mL of acetone with BHT (0.05 mL/100 mL), 5 mL of ethanol (95 mL/100 mL) and 10 mL of hexane were added and vortexed immediately. The sample was centrifuged (200 rpm, 15 min, 4 °C) and 3.0 mL milli-Q water was added. The sample was left at room temperature for 10 min to allow for phase separation and for all air bubbles to disappear, and the absorbance at 503 nm was determined in the supernatant. The lycopene content was calculated based on the weight of the samples using the absorbance at 503 nm, and the results were expressed as mg lycopene/kg sample.

Soluble dietary fiber content

The soluble dietary fiber content was analyzed in dehydrated samples (TP, F2 and F5 fractions) by gravimetric determination according to the method described by [Maran \(2015\)](#). Briefly, the sample was weighed (1 g) in a 250 mL Erlenmeyer flask and 20 mL de HCl (0.02 M) were added. The soluble dietary fiber extraction was performed at 85 °C (40 min) in an agitation bath. The Erlenmeyer flask was covered with a plastic wrap to prevent evaporation of the extraction solvent. After incubation, the mixture was filtered through cheese cloth (Mir-

soluble fiber were reported as means standard deviation (SD). For each by-product tomato sample (TP, F2 and F5 fractions), one-way analysis of variance (ANOVA) and Fisher's test at a level of 0.05 were used to determine the significance of differences among the dehydration processes. All analyses were performed using Statistic Package for Social Science (SPSS) (IBM, Armonk, NY).

1. Results and discussion

Impact of drying processes on the phenolic composition of tomato by-products

To estimate the effect of the dehydration process on the phenolic composition of tomato by-products, a targeted chromatographic approach by UHPLC-QqQ-MS/MS was used. A total of nineteen compounds, belonging to the flavonoids (naringenin and other minor flavanols, mainly quercetin derivatives) and phenolic acids (hydroxycinnamic and hydroxybenzoic acids) groups, were identified and quantified. The results of the phenol quantification for each type of tomato by-product ([Fig. 1](#)): tomato pomace (TP) ([Table 1](#)), seed-rich fraction (F2) ([Table 2](#)) and rich-peel fraction (F5) ([Table 3](#)), are described in the following sections. To evaluate the impact of each drying process, the concentration of each phenolic compound expressed on a dry-weight (DW) basis of raw sample (TP, F2 and F5, respectively) was used as a control.

Impact of drying processes on tomato pomace (TP) phenolic composition

The results of the impact of the different drying processes on the stability of the phenolic compounds detected in the tomato pomace (TP) are shown in [Table 1](#). Total phenolic content ranged between 336.66 mg/kg (freeze-dried TP) and 568.37 mg/kg (microwave TP). Regardless of the dehydration procedure applied, the average phenolic composition of the TP was mainly flavonoids and phenolic acids. Within the flavonoid group, the flavanone naringenin was the main phenol detected in the TP (about 75.3% of the total phenols) with a concentration ranging from 253.03 to 468.76 mg/kg TP ([Table 1](#)). This was similar to that reported by [Abbasi-Parizad et al. \(2020\)](#) in TP dried in a vacuum oven (at 50 °C for 300 min).

Comparing the different drying techniques, independently of the power applied (50%, 75% or 100% of 3 magnetrons, each with a power of 1000 W), the microwave was revealed to be the best process for the greater retention of naringenin ([Table 1](#)). Microwave dried TP samples showed an average concentration of 557 mg/kg, significantly higher ($p < 0.05$) than the raw product (245.06 mg/kg DW) ([Table 1](#)). The air-drying and Spiral Flash drying processes showed similar results, resulting in greater retention of naringenin in the TP samples than with the freeze-drying process. These results are in agreement with [Tomas et al. \(2017\)](#) who found that the naringenin concentration was 20-fold and 43-fold higher in industrial and home processed sauces respectively, compared to fresh tomato. This increase is attributed to the high temperature at low pH, under which conditions conversion of naringenin chalcone to naringenin is stimulated ([Capanoglu et al., 2008](#)). Moreover, since the phenolic compounds, including naringenin, are trapped in the insoluble polyesters of the cuticle, which are constituents

Table 1

Impact of drying processes on the phenolic content of the tomato pomace (TP).

The results are expressed as mg/kg sample.

Compound (mg/kg)	Raw TP (dry weight)			Freeze-drying			Air-drying			60 °C			Spiral Flash			Microwave																																
	40 °C									50% 3 MG									75% 3 MG									100% 3 MG																				
Naringenin	245.06 ± 10.63 ^a	253.03 ± 6.14 ^{ab}	315.99 ± 13.84 ^c	315.99 ± 10.64 ^{bc}	331.01 ± 10.36 ^c	468.76 ± 11.12 ^d	454.23 ± 2.82 ^d	429.62 ± 2.82 ^d	2415 ^d																																							
Naringenin-hexose	1.30 ± 0.19 ^{bc}	1.26 ± 0.00 ^{bc}	1.20 ± 0.20 ^c	1.36 ± 0.19 ^{bc}	1.31 ± 0.02 ^{bc}	1.04 ± 0.09 ^{abc}	0.83 ± 0.05 ^{ab}	0.68 ± 0.05 ^a	0.05 ^a																																							
Total flavanones	246.36 ± 10.82 ^a	254.29 ± 6.15 ^{ab}	317.35 ± 14.04 ^c	317.35 ± 10.83 ^{bc}	332.32 ± 10.37 ^c	469.80 ± 11.21 ^d	455.06 ± 2.87 ^d	430.30 ± 2.87 ^d	24.21 ^d																																							
Quercetin	7.92 ± 0.60 ^a	7.50 ± 0.41 ^a	10.06 ± 0.20 ^b	10.06 ± 0.31 ^b	23.95 ± 0.16 ^c	11.40 ± 0.44 ^c	12.33 ± 0.07 ^{cd}	13.16 ± 0.11 ^d	0.11 ^d																																							
Quercetin-glyc	4.90 ± 0.27 ^c	1.61 ± 0.26 ^a	0.12 ± 0.12 ^b	0.33 ^{ab}	4.58 ± 0.32 ^c	2.75 ± 0.18 ^{ab}	2.64 ± 0.50 ^{ab}	2.65 ± 0.22 ^{ab}	0.22 ^{ab}																																							
Kaempferol	1.11 ± 0.11 ^a	0.95 ± 0.04 ^a	1.14 ± 0.03 ^{abc}	0.99 ^a	2.43 ± 0.25 ^b	1.36 ± 0.02 ^a	1.33 ± 0.23 ^a	1.48 ± 0.15 ^b	0.15 ^b																																							
Kaempferol-glyc	3.49 ± 0.38 ^c	0.61 ± 0.04 ^a	0.74 ± 0.03 ^{abc}	0.10 ^a	1.30 ± 0.06 ^{ab}	0.78 ± 0.17 ^{ab}	0.67 ± 0.09 ^a	1.09 ± 0.13 ^{ab}	0.13 ^{ab}																																							
Syringetin	0.31 ± 0.02 ^a	0.34 ± 0.03 ^{ab}	0.41 ± 0.03 ^{abc}	0.01 ^{bc}	0.87 ± 0.01 ^c	0.41 ± 0.02 ^{abc}	0.55 ± 0.04 ^d	0.47 ± 0.04 ^{cd}	0.04 ^{cd}																																							
Laricitin	0.27 ± 0.02 ^a	0.31 ± 0.09 ^a	0.35 ± 0.03 ^a	0.05 ^a	0.41 ± 0.03 ^a	0.29 ± 0.02 ^a	0.33 ± 0.01 ^a	0.41 ± 0.18 ^a	0.18 ^a																																							
Total flavonols	18.01 ± 1.40 ^c	11.32 ± 0.87 ^a	14.77 ± 0.81 ^{bc}	14.77 ± 0.89 ^b	33.53 ± 0.83 ^d	16.99 ± 0.85 ^{bc}	17.86 ± 0.93 ^c	19.26 ± 0.82 ^c	0.82 ^c																																							
Total flavonoids	264.37 ± 12.22 ^a	265.62 ± 7.02 ^a	334.24 ± 14.85 ^{bc}	334.24 ± 11.73 ^{ab}	365.85 ± 11.21 ^c	486.79 ± 12.05 ^d	472.92 ± 3.80 ^d	449.56 ± 25.03 ^d	25.03 ^d																																							
Caffeic acid	21.94 ± 2.49 ^e	8.28 ± 0.47 ^a	14.36 ± 0.79 ^b	14.60 ± 0.27 ^b	27.78 ± 0.96 ^d	23.15 ± 0.94 ^{cd}	24.54 ± 0.81 ^{cd}	25.57 ± 1.45 ^{cd}	1.45 ^{cd}																																							
Caffeic acid-hexose	10.18 ± 0.02 ^a	0.23 ^a	8.83 ± 0.85 ^a	8.13 ± 0.69 ^a	15.06 ± 1.65 ^a	10.68 ± 0.17 ^a	9.85 ± 0.10 ^a	8.72 ± 2.12 ^a	2.12 ^a																																							
Coumaric acid	16.53 ± 1.25 ^a	16.16 ± 2.07 ^{cd}	18.01 ± 0.70 ^d	19.14 ± 2.07 ^d	11.51 ± 1.08 ^{bc}	5.45 ± 0.93 ^a	6.63 ± 0.04 ^{ab}	6.76 ± 0.02 ^{ab}	0.02 ^{ab}																																							
Coumaric acid-hexose	3.56 ± 0.48 ^{ab}	3.23 ± 0.14 ^a	2.87 ± 0.19 ^a	4.30 ± 0.79 ^a	10.02 ± 0.30 ^b	4.08 ± 0.64 ^a	3.89 ± 0.02 ^a	3.60 ± 0.05 ^a	0.05 ^a																																							
Ferulic acid	5.39 ± 0.06 ^c	3.24 ± 0.05 ^{ab}	4.47 ± 0.06 ^{cd}	3.80 ± 0.32 ^{bc}	4.12 ± 0.23 ^{bc}	2.79 ± 0.31 ^a	3.16 ± 0.24 ^{ab}	3.21 ± 0.14 ^{ab}	0.14 ^{ab}																																							
Total HC acids	57.60 ± 4.30 ^c	39.67 ± 2.97 ^a	48.55 ± 1.97 ^{abc}	49.97 ± 4.34 ^{bc}	68.49 ± 4.17 ^d	46.16 ± 2.99 ^{ab}	48.07 ± 1.21 ^{abc}	47.87 ± 3.78 ^{ab}	3.78 ^{ab}																																							
4-Hydroxybenzoic acid	35.63 ± 6.39 ^c	18.41 ± 0.62 ^a	27.70 ± 0.63 ^{bc}	23.14 ± 0.84 ^{ab}	28.11 ± 0.31 ^{bc}	20.54 ± 0.48 ^{ab}	25.27 ± 0.22 ^{ab}	26.85 ± 0.46 ^{bc}	0.46 ^{bc}																																							
Protocatechuic acid	5.56 ± 0.98 ^{ab}	4.29 ± 0.07 ^a	6.09 ± 1.03 ^{ab}	4.50 ± 0.33 ^a	7.17 ± 0.37 ^{bc}	8.84 ± 1.17 ^c	9.48 ± 0.57 ^{cd}	11.27 ± 2.00 ^d	2.00 ^d																																							
Vanillic acid	4.01 ± 0.69 ^b	4.19 ± 0.12 ^b	3.91 ± 0.25 ^{ab}	4.28 ± 1.29 ^b	4.16 ± 0.51 ^b	2.39 ± 0.20 ^b	3.61 ± 0.91 ^{ab}	3.09 ± 0.13 ^{ab}	0.13 ^{ab}																																							
Galic acid	1.34 ± 0.00 ^b	1.04 ± 0.03 ^a	1.55 ± 0.02 ^{cd}	1.47 ± 0.06 ^{bc}	4.47 ± 0.05 ^d	1.52 ± 0.08 ^{cd}	1.67 ± 0.01 ^{de}	1.77 ± 0.02 ^d	0.02 ^d																																							
Galic acid-gal	2.05 ± 0.04 ^b	2.55 ± 0.01 ^c	2.60 ± 0.03 ^c	2.63 ± 0.14 ^c	1.99 ± 0.03 ^b	1.31 ± 0.03 ^a	1.20 ± 0.04 ^a	1.35 ± 0.04 ^a	0.04 ^a																																							
Syringic acid	0.72 ± 0.04 ^a	0.90 ± 0.04 ^{abc}	1.02 ± 0.06 ^{bc}	1.11 ± 0.10 ^{cd}	1.33 ± 0.04 ^d	0.84 ± 0.08 ^{abc}	0.76 ± 0.12 ^{ab}	0.81 ± 0.12 ^{ab}	0.12 ^{ab}																																							
Total HB acids	49.31 ± 8.14 ^c	31.38 ± 0.88 ^a	42.87 ± 2.02 ^{bc}	37.12 ± 2.76 ^{ab}	47.23 ± 1.28 ^c	35.43 ± 2.04 ^{bc}	41.98 ± 1.86 ^{bc}	45.13 ± 2.66 ^{bc}	2.66 ^{bc}																																							
Total phenolic acids	106.91 ± 12.44 ^{cd}	71.05 ± 3.85 ^a	91.42 ± 3.99 ^b	87.10 ± 7.10 ^{ab}	115.72 ± 5.45 ^c	81.58 ± 5.04 ^{ab}	90.05 ± 3.07 ^{abc}	93.00 ± 6.43 ^{bc}	6.43 ^{bc}																																							
Total phenolic content	371.28 ± 24.66 ^{ab}	336.66 ± 10.87 ^a	425.66 ± 18.83 ^c	399.66 ± 18.83 ^{bc}	481.58 ± 16.66 ^d	568.37 ± 17.09 ^e	562.96 ± 6.87 ^e	542.56 ± 31.46 ^e	31.46 ^e																																							

HC: hydroxybenzoic acid, HB: hydroxybenzoic acid, MG: 3 magnetrons, each with a power of 1000 W. Different letters in the same row indicate significant differences between drying processes ($P < 0.05$).

Table 2
Impact of drying processes on the phenolic content of the seed-rich fraction (F2) of tomato pomace. The results are expressed as mg/kg sample.

Compound (mg/kg)	Raw F2			Freeze-drying			Air-drying			60 °C			Spiral Flash			Microwave		
	(dry weight)									40 °C	60 °C			50% 3 MG	75% 3 MG	100% 3 MG		
Naringenin	185.92	± 9.54 ^b	137.00	± 12.61 ^a	137.05	± 1.42 ^a	124.02	± 4.02 ^a	162.22	± 4.72 ^{ab}	299.80	± 40.21 ^d	251.34	± 0.94 ^c	245.15	± 17.98 ^c		
Naringenin-hexose	1.50	± 0.02 ^b	0.90	± 0.01 ^a	0.97	± 0.14 ^a	0.88	± 0.09 ^a	1.25	± 0.04 ^{ab}	1.26	± 0.23 ^{ab}	1.03	± 0.06 ^a	0.82	± 0.44 ^a		
Total flavanones	187.43	± 9.57 ^b	137.90	± 12.63 ^a	138.01	± 1.56 ^a	124.90	± 4.11 ^a	163.46	± 4.76 ^{ab}	301.06	± 40.45 ^d	252.37	± 1.00 ^c	245.97	± 18.42 ^c		
Quercetin	5.99	± 0.13 ^b	4.38	± 0.47 ^a	4.00	± 0.31 ^a	4.60	± 0.37 ^a	15.05	± 0.27 ^d	7.55	± 1.11 ^c	7.22	± 0.06 ^c	6.58	± 0.09 ^{cd}		
Quercetin-gluc	3.74	± 0.31 ^c	1.41	± 0.14 ^a	1.70	± 0.24 ^a	1.73	± 0.01 ^{ab}	3.18	± 0.04 ^c	2.37	± 0.55 ^b	1.74	± 0.06 ^{ab}	1.82	± 0.28 ^{ab}		
Kaempferol	1.09	± 0.44 ^a	0.91	± 0.00 ^a	1.15	± 0.19 ^a	1.05	± 0.21 ^a	1.40	± 0.49 ^a	1.08	± 0.04 ^a	1.04	± 0.04 ^a	1.34	± 0.08 ^a		
Kaempferol-gluc	2.31	± 0.21 ^d	0.53	± 0.16 ^a	0.65	± 0.03 ^{ab}	0.70	± 0.06 ^{ab}	1.21	± 0.08 ^c	0.86	± 0.10 ^b	0.59	± 0.08 ^{ab}	0.80	± 0.06 ^{ab}		
Syringetin	0.33	± 0.07 ^{ab}	0.32	± 0.01 ^a	0.38	± 0.02 ^{abc}	0.40	± 0.04 ^{abc}	0.37	± 0.03 ^d	0.41	± 0.04 ^{abc}	0.43	± 0.05 ^{bc}	0.48	± 0.03 ^{cd}		
Lactichin	0.23	± 0.01 ^a	0.28	± 0.04 ^{ab}	0.41	± 0.06 ^{bc}	0.34	± 0.03 ^{abc}	0.47	± 0.15 ^c	0.29	± 0.01 ^a	0.31	± 0.02 ^{ab}	0.29	± 0.01 ^{ab}		
Total flavonols	13.70	± 1.17 ^c	7.82	± 0.83 ^a	8.30	± 0.84 ^a	8.84	± 0.71 ^a	21.87	± 1.05 ^d	12.56	± 1.85 ^{bc}	11.32	± 0.30 ^b	11.31	± 0.58 ^b		
Total flavonoids	201.12	± 10.74 ^c	145.72	± 13.45 ^{ab}	146.31	± 2.40 ^{ab}	133.74	± 4.81 ^a	185.34	± 5.81 ^{bc}	313.62	± 42.29 ^d	263.69	± 1.30 ^d	257.28	± 19.00 ^d		
Caffeic acid	18.84	± 1.24 ^b	8.56	± 1.84 ^a	9.69	± 1.09 ^a	9.73	± 0.89 ^a	26.08	± 3.30 ^c	26.16	± 0.72 ^c	26.81	± 0.29 ^c	26.92	± 0.38 ^c		
Caffeic acid-hexose	11.49	± 0.23 ^{ab}	12.25	± 2.50 ^{ab}	10.10	± 0.05 ^{ab}	7.60	± 0.36 ^a	14.36	± 2.33 ^b	13.56	± 2.70 ^b	12.89	± 2.79 ^b	11.70	± 1.20 ^{ab}		
Coumaric acid	17.69	± 1.74 ^e	14.00	± 0.88 ^d	12.54	± 0.16 ^{cd}	11.05	± 0.46 ^c	7.08	± 0.01 ^b	5.10	± 0.33 ^a	5.22	± 0.65 ^a	5.84	± 0.23 ^{ab}		
Genipic acid	3.85	± 0.26 ^a	3.36	± 1.00 ^a	3.02	± 0.60 ^a	2.63	± 0.43 ^a	6.74	± 2.59 ^b	5.45	± 0.11 ^{ab}	4.83	± 0.21 ^{ab}	4.54	± 0.41 ^{ab}		
Ferulic acid	5.24	± 0.38 ^c	3.27	± 0.17 ^{ab}	3.33	± 0.10 ^{ab}	2.79	± 0.05 ^a	3.49	± 0.08 ^b	2.79	± 0.45 ^a	3.00	± 0.01 ^{ab}	2.83	± 0.33 ^a		
Total HC acids	57.11	± 3.84 ^b	44.46	± 6.39 ^b	38.67	± 2.01 ^a	33.79	± 2.19 ^a	57.74	± 8.30 ^b	52.75	± 4.32 ^b	52.75	± 3.96 ^b	51.83	± 2.58 ^b		
Hydroxybenzoic acid	30.87	± 0.78 ^c	17.31	± 0.95 ^a	18.00	± 0.66 ^a	16.36	± 0.69 ^a	18.59	± 0.84 ^a	21.01	± 2.09 ^{ab}	26.06	± 4.06 ^{bc}	25.03	± 3.83 ^b		
Protocatechuic acid	5.27	± 0.71 ^{ab}	4.62	± 0.38 ^a	4.06	± 0.04 ^a	3.72	± 0.16 ^a	6.65	± 0.81 ^{bc}	8.56	± 0.86 ^d	9.13	± 1.23 ^d	7.82	± 0.44 ^{cd}		
Vanillic acid	4.33	± 0.00 ^b	4.20	± 1.58 ^b	3.69	± 0.26 ^{ab}	3.30	± 0.26 ^{ab}	2.55	± 0.18 ^a	3.40	± 0.04 ^{ab}	3.32	± 0.50 ^{ab}	3.56	± 0.47 ^{ab}		
Galic acid	1.24	± 0.10 ^b	1.03	± 0.01 ^a	1.24	± 0.10 ^b	1.18	± 0.05 ^{ab}	1.78	± 0.01 ^d	1.53	± 0.11 ^c	1.43	± 0.06 ^c	1.47	± 0.07 ^c		
Galic acid-gal	2.42	± 0.00 ^d	2.47	± 0.10 ^d	1.95	± 0.08 ^c	1.76	± 0.06 ^b	1.42	± 0.00 ^a	1.49	± 0.11 ^a	1.42	± 0.02 ^a	1.40	± 0.04 ^a		
Syringic acid	0.83	± 0.01 ^a	1.05	± 0.21 ^a	0.93	± 0.04 ^a	0.93	± 0.00 ^a	0.72	± 0.37 ^a	0.83	± 0.09 ^a	0.87	± 0.15 ^a	0.81	± 0.05 ^a		
Total HB acids	44.96	± 1.61 ^d	30.68	± 3.23 ^{ab}	29.87	± 1.17 ^{ab}	27.24	± 1.21 ^a	31.71	± 2.21 ^{ab}	36.52	± 3.29 ^{bc}	42.22	± 6.01 ^{bc}	40.10	± 4.90 ^{bc}		
Total phenolic acids	102.07	± 5.45 ^b	72.13	± 9.61 ^a	68.55	± 3.18 ^a	61.03	± 3.40 ^a	89.45	± 10.50 ^b	89.28	± 7.61 ^b	94.98	± 9.96 ^b	91.93	± 7.48 ^b		
Total phenolic content	303.19	± 16.19 ^{bc}	217.85	± 23.07 ^a	214.86	± 5.59 ^a	194.77	± 8.22 ^a	274.79	± 16.31 ^b	402.89	± 49.90 ^d	358.66	± 11.27 ^{de}	349.21	± 26.48 ^{cd}		

* HC: hydroxybenzoic acid, HB: hydroxybenzoic acid. MG: 3 magnetrans, each with a power of 1000 W. Different letters in the same row indicate significant differences between drying processes (P < 0.05).

Table 3
Impact of drying processes on the phenolic content of the peel-rich fraction (F5) of compound-specific extracts expressed as mg/kg sample.

	Air-drying				Spiral Flash			Microwave		
	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	50% 3 MG	75% 3 MG	100% 3 MG	50% 3 MG	75% 3 MG	100% 3 MG
Naringenin	557.04 ± 0.37 _c	533.49 ± 17.63 _{bc}	556.66 ± 25.92 _c	517.98 ± 3.25 _b	370.63 ± 6.43 ^a	710.98 ± 0.76 ^d	745.68 ± 1.90 ^c	821.99 ± 0.82 ± 0.01 ^{cd}	710.98 ± 0.76 ^d	745.68 ± 1.90 ^c
Naringenin-hexose	1.87 ± 0.05 _e	1.26 ± 0.08 ^d	1.01 ± 0.08 ^{bc}	0.80 ± 0.01 ^{ab}	1.21 ± 0.11 ^{cd}	0.02 ± 0.02 ^{ab}	0.81 ± 0.02 ^{ab}	0.82 ± 0.02 ^{ab}	0.02 ± 0.02 ^{ab}	0.81 ± 0.02 ^{ab}
Total flavanones	558.91 ± 0.42 _c	534.75 ± 17.71 _{bc}	557.67 ± 26.00 _c	518.78 ± 3.46 _b	371.84 ± 6.53 ^a	711.70 ± 0.78 ^d	746.49 ± 1.92 ^d	828.82 ± 0.07 ^e	711.70 ± 0.78 ^d	746.49 ± 1.92 ^d
Quercetin	14.59 ± 0.11 ^d	12.84 ± 0.47 ^a	14.66 ± 0.32 ^b	13.24 ± 0.75 ^a	21.96 ± 0.07 ^e	16.50 ± 0.01 ^c	20.88 ± 0.98 ^d	17.19 ± 0.06 ^e	16.50 ± 0.01 ^c	20.88 ± 0.98 ^d
Quercetin-gluc	3.07 ± 0.46	1.87 ± 0.06 ^a	3.20 ± 0.17 ^b	2.92 ± 0.06 ^b	4.06 ± 0.08 ^e	3.39 ± 0.06 ^b	3.87 ± 0.05 ^c	3.39 ± 0.08 ^e	3.39 ± 0.06 ^b	3.87 ± 0.05 ^c
Kaempferol	1.68 ± 0.04	1.39 ± 0.04 ^a	1.69 ± 0.07 ^a	1.61 ± 0.16 ^a	1.81 ± 0.18 ^a	1.98 ± 0.37 ^a	1.90 ± 0.19 ^a	1.98 ± 0.37 ^a	1.97 ± 0.36 ^a	1.90 ± 0.19 ^a
Kaempferol-gluc	1.38 ± 0.13 _d	0.64 ± 0.02 ^a	1.24 ± 0.06 ^{cd}	0.98 ± 0.08 ^b	1.04 ± 0.00 ^{bc}	0.93 ± 0.01 ^{bc}	1.21 ± 0.07 ^d	1.10 ± 0.02 ^c	0.93 ± 0.01 ^{bc}	1.21 ± 0.07 ^d
Syringetin	0.38 ± 0.02	0.38 ± 0.01 ^a	0.51 ± 0.01 ^{bc}	0.46 ± 0.05 ^{bc}	0.60 ± 0.02 ^c	0.46 ± 0.04 ^{bc}	0.51 ± 0.10 ^a	0.51 ± 0.02 ^c	0.46 ± 0.04 ^{bc}	0.51 ± 0.10 ^a
Laricitrin	0.28 ± 0.11	0.34 ± 0.15 ^a	0.30 ± 0.03 ^a	0.39 ± 0.05 ^a	0.37 ± 0.04 ^a	0.44 ± 0.10 ^a	0.38 ± 0.11 ^a	0.38 ± 0.04 ^a	0.44 ± 0.10 ^a	0.38 ± 0.11 ^a
Total flavonols	21.37 ± 0.87	17.45 ± 0.66 ^a	21.60 ± 0.66 ^c	19.60 ± 1.08 ^b	29.83 ± 0.39 ^e	23.45 ± 0.60 ^d	28.74 ± 1.10 ^e	24.55 ± 0.39 ^e	23.45 ± 0.60 ^d	28.74 ± 1.10 ^e
Total flavonoids	580.29 ± 1.29 _c	552.20 ± 18.40 _{bc}	579.27 ± 26.66 _c	538.38 ± 4.34 _b	401.67 ± 6.93 ^a	735.14 ± 1.38 ^f	775.23 ± 3.02 ^e	847.37 ± 6.93 ^a	735.14 ± 1.38 ^f	775.23 ± 3.02 ^e
Caffeic acid	21.26 ± 0.05 ^d	10.78 ± 0.28 ^a	15.94 ± 0.63 ^{ab}	17.93 ± 3.48 ^{ab}	27.10 ± 1.81 ^d	32.46 ± 6.27 ^d	32.04 ± 0.57 ^d	32.46 ± 6.27 ^d	32.46 ± 6.27 ^d	32.04 ± 0.57 ^d
Caffeic acid-hexose	12.85 ± 0.49	8.00 ± 0.36 ^{ab}	6.54 ± 0.39 ^a	6.17 ± 0.54 ^a	15.88 ± 1.81 ^d	9.26 ± 1.33 ^b	9.15 ± 0.95 ^b	9.26 ± 1.33 ^b	9.26 ± 1.33 ^b	9.15 ± 0.95 ^b
Coumaric acid	27.17 ± 2.83	19.72 ± 3.80 ^b	16.89 ± 0.94 ^b	16.01 ± 0.15 ^b	10.80 ± 1.86 ^a	8.26 ± 1.26 ^a	10.48 ± 0.71 ^a	8.26 ± 1.26 ^a	8.26 ± 1.26 ^a	10.48 ± 0.71 ^a
Coumaric acid-hexose	5.44 ± 0.22 _{cd}	3.83 ± 0.07 ^{abc}	2.73 ± 0.39 ^a	3.15 ± 0.97 ^{ab}	11.20 ± 0.41 ^e	6.32 ± 1.25 ^d	4.76 ± 0.43 ^{bcd}	6.32 ± 1.25 ^d	6.32 ± 1.25 ^d	4.76 ± 0.43 ^{bcd}
Ferulic acid	5.92 ± 0.07	4.08 ± 0.03 ^b	4.37 ± 0.02 ^b	4.25 ± 0.10 ^b	3.62 ± 0.06 ^a	3.42 ± 0.08 ^a	4.09 ± 0.28 ^b	3.42 ± 0.06 ^a	3.42 ± 0.08 ^a	4.09 ± 0.28 ^b
Total HC acids	72.63 ± 3.65	46.41 ± 4.53 ^a	46.47 ± 5.01 ^{ab}	47.50 ± 5.23 ^{ab}	68.59 ± 4.83 ^c	59.72 ± 10.19 ^{bc}	60.52 ± 2.95 ^{bc}	59.72 ± 10.19 ^{bc}	60.52 ± 2.95 ^{bc}	60.52 ± 2.95 ^{bc}
4-Hydroxybenzoic acid	32.07 ± 1.50	23.76 ± 1.43 ^a	28.36 ± 5.01 ^{ab}	22.70 ± 0.19 ^a	31.03 ± 4.59 ^{bc}	27.34 ± 0.29 ^{ab}	34.09 ± 0.00 ^c	27.34 ± 0.29 ^{ab}	31.72 ± 1.08 ^{bc}	34.09 ± 0.00 ^c
Protocatechuic acid	6.65 ± 0.80	4.59 ± 0.23 ^a	4.86 ± 0.27 ^a	3.96 ± 0.17 ^a	7.64 ± 1.89 ^{bc}	8.41 ± 0.26 ^{bc}	10.45 ± 0.20 ^d	8.41 ± 0.26 ^{bc}	9.40 ± 0.61 ^{cd}	10.45 ± 0.20 ^d
Vanillic acid	4.60 ± 0.11	3.87 ± 0.58 ^{abc}	4.48 ± 0.08 ^{bc}	4.16 ± 0.67 ^{abc}	3.72 ± 0.03 ^{abc}	3.01 ± 0.60 ^a	3.38 ± 0.19 ^{ab}	3.01 ± 0.03 ^{abc}	3.14 ± 0.70 ^a	3.38 ± 0.19 ^{ab}
Galloic acid	2.01 ± 0.04 ^f	1.19 ± 0.01 ^a	1.38 ± 0.01 ^b	1.48 ± 0.02 ^{bc}	2.93 ± 0.03 ^g	1.51 ± 0.03 ^c	1.79 ± 0.03 ^e	1.51 ± 0.03 ^c	1.62 ± 0.11 ^d	1.79 ± 0.03 ^e
Galloic acid-gal	3.71 ± 0.16	2.86 ± 0.11 ^d	2.11 ± 0.08 ^c	2.12 ± 0.01 ^c	1.43 ± 0.03 ^b	1.14 ± 0.02 ^a	1.22 ± 0.01 ^a	1.14 ± 0.02 ^a	1.15 ± 0.02 ^a	1.22 ± 0.01 ^a
Syringic acid	1.03 ± 0.04	0.97 ± 0.19 ^{ab}	1.07 ± 0.28 ^{ab}	0.99 ± 0.07 ^{ab}	1.31 ± 0.07 ^b	0.96 ± 0.12 ^{ab}	0.89 ± 0.43 ^{ab}	0.96 ± 0.12 ^{ab}	0.79 ± 0.07 ^a	0.89 ± 0.43 ^{ab}
Total HB acids	50.07 ± 2.65	37.23 ± 2.55 ^{ab}	48.24 ± 5.72 ^{bc}	35.42 ± 1.14 ^a	48.06 ± 6.61 ^{cd}	42.37 ± 1.41 ^{bc}	51.81 ± 0.86 ^d	42.37 ± 1.41 ^{bc}	47.83 ± 1.41 ^{bc}	51.81 ± 0.86 ^d
Total phenolic acids	122.70 ± 6.29	83.64 ± 7.08 ^a	88.71 ± 8.10 ^{ab}	82.92 ± 6.38 ^a	116.65 ± 11.44 ^{cd}	102.09 ± 11.61 ^{bc}	112.33 ± 3.81 ^{cd}	102.09 ± 11.44 ^{cd}	108.08 ± 11.61 ^{bc}	112.33 ± 3.81 ^{cd}
Total phenolic content	702.99 ± 7.59	635.84 ± 25.48 ^b	667.99 ± 34.76 _{bc}	621.30 ± 10.72 _b	518.32 ± 18.37 _a	949.46 ± 12.99 _a	887.56 ± 6.83 _d	949.46 ± 12.99 _a	843.22 ± 14.40 _a	887.56 ± 6.83 _d

* HC: hydroxybenzoic acid; HB: hydroxybenzoic acid; MG: 3 magnetrans, each with a power of 1000 W. Different letters in the same row indicate significant differences between drying processes ($P < 0.05$).

such as Alzheimer's (Ghofrani et al., 2015).

The flavonol content, mainly quercetin derivatives, significantly increased in Spiral Flash dehydrated TP samples, while the other drying technologies showed similar flavonol concentrations to the raw TP (Table 1). In relation to the phenolic acids, different effects were observed for each dehydration process (Table 1). Spiral Flash drying resulted in better retention of phenolic acids (115.72 mg/kg), similar to that detected in the raw TP sample (106.91 mg/kg DW). Hot air drying at 40 °C and microwave drying using 75% and 100% power showed similar results, leading to a loss of approximately 15% of the phenolic acids, compared to the raw TP sample. Surprisingly, freeze-drying resulted in a significant reduction ($p < 0.05$) in the phenolic acid concentration (71.05 mg/kg) when compared to the raw TP (106.91 mg/kg) (Table 1). Freeze-drying removes moisture from products through the sublimation of solid ice and, due to the low temperature and low pressure environment, freeze-drying produces high-quality dried products with better appearance and higher nutrient retention compared with other drying methods (Chumroenphat et al., 2021). Nevertheless, freeze-drying is a time-consuming process, which limits its applications in the food industry. On the other hand, it is important to point out that low-molecular-weight phenolic acids in plants are covalently bound to other compounds (i.e. pectin, cellulose, and proteins) and structural changes may occur during drying processes (Chao et al., 2023). In relation to this, the low temperature and long-time conditions applied during freeze-drying would not be enough to liberate the phenolic acids from TP cuticle matrix. In addition, the long time of the freeze-drying process in our study (24 h) in relation to the other drying processes could favour the degradation of the free phenolic acids, resulting in a significant ($p < 0.05$) reduction in their concentration compared with the raw material (Table 1).

Impact of drying processes on the phenolic composition of seed-rich tomato fraction (F2)

The seeds are an important fraction of the tomato by-products, accounting for about 38.5% of the total tomato pomace (Bhatkar et al., 2021). A recent review by Kumar et al. (2021) points out important biological properties of tomato seeds for health, such as anti-oxidant, anti-cancer and anti-microbial activities. A study by Concha-Meyer et al. (2020) analyzing ultrasound-assisted extracts of tomato seed observed significant anti-platelet aggregation activity of these extracts. In the present study, the tomato seed-rich fraction (F2) showed a total phenol concentration ranging from 194.77 to 402.89 mg/kg (Table 2) similar to that observed by Valdez-Morales et al. (2014) in seeds of different tomato varieties (grape, cherry, ball and saladette), and in industrial tomato by-products. Comparing the dehydration techniques, freeze-drying and hot air-drying significantly ($p < 0.05$) reduced the total phenolic content in the seed-rich fraction compared to the control (raw F2) (Table 2). While Spiral Flash dryer did not affect the total phenol concentration, microwave drying resulted in an increase mainly related with the significant increase ($p < 0.05$) in the naringenin concentration (Table 2). Similarly to what was observed in the TP, Spiral Flash drying led to a higher retention of flavonols related with the higher ($p < 0.05$) concentration of quercetin (15.05 mg/kg) compared to the raw product (5.99 mg/kg DW) (Table 2). On the other hand, the use of the microwave technology resulted in a slight decrease in the flavonol concentration in the F2 seed-rich fraction (Table 2).

Unlike what was observed in the TP samples, in which the hot air treatments produced an increase in the contents of naringenin and other phenolic compounds, in the seed-rich F2 fraction these dehydration procedures produced a significant decrease in the concentration of naringenin in particular and in total phenol content. These differences could be related to the seed matrix composition (average carbohydrate 26 g/100 g, protein 26 g/100 g and fat 25 g/100 g) compared with the TP composition (average carbohydrate 43 g/100 g, protein 17 g/100 g and fat 15 g/100 g) (Rajan et al., 2022). These differences could explain the higher phenol retention, especially of naringenin, observed in the F2

samples submitted to microwave dehydration, mainly at the lowest power studied (50% 3 MG) (Table 2). Microwave drying is based on the transmission of electromagnetic waves, where the heat generated by molecular vibration passes through vegetal tissue generating an oscillation of the molecules, which produces the thermal energy used to evaporate water promoting porous products as a result of the drying mechanism (Pateiro et al., 2022). This increase in the porosity of the seed matrix could explain the increase in the extractability of phenolic compounds, especially naringenin, from the sample (Table 2).

Impact of drying processes on the phenolic composition of rich-peel tomato fraction (F5)

Regardless of the type of tomato processing, the peel constitutes the major part of the residue generated by the industry, about 61.5% of the tomato pomace (Bhatkar et al., 2021). Table 3 shows the individual phenolic compounds detected in the peel-rich tomato fraction (F5) and the effect of the different drying processes. The total phenolic content ranged from 518.32 to 949.46 mg/kg sample, 85.5% being flavonoids and 14.5%, phenolic acids. The highest retention of phenolic compounds was observed in the F5 samples obtained by microwave drying applying power at 50%, 75% and 100% with respective concentrations of total phenols of 949.46, 843.22 and 887.56 mg/kg (Table 3), and this trend was observed in the naringenin concentration. This compound was less sensitive to freeze-drying and hot-air drying (40 °C and 60 °C) maintaining similar concentrations to the raw product (Table 3). On the other hand, the Spiral Flash dryer led to a lower retention of naringenin derivatives (flavanones) (Table 3). These results suggest that microwave technology was the most efficient dehydration procedure for the retention of naringenin derivatives, similarly that observed in the TP and the F2 fraction. Regardless of the drying method, the concentrations of naringenin detected in our study were higher than those found in previous studies. Valdez-Morales et al. (2014) reported concentrations of naringenin from 0.00 to 48.6 mg/kg DW in tomato peel from different varieties. Another study by Cesare et al. (2021) reported a concentration of between 11.3 and 13.2 mg/kg DW in Italian tomato varieties grown under drought stress conditions.

Regarding flavonols, quercetin was the main compound quantified in the F5 tomato fraction with a concentration ranging from 12.84 to 20.88 mg/kg, similar values to those previously described in the literature (Grassino et al., 2020; Valdez-Morales et al., 2014). Freeze-drying and hot air-drying at 60 °C led to a slight reduction in quercetin concentrations compared to those found in the raw product. The highest retention of quercetin derivatives was observed in samples from the Spiral Flash dryer and microwave at maximum power (100% 3 MG) (Table 3). In contrast to the results observed for flavonoids, phenolic acids were more sensitive to the drying techniques studied (Table 3). All technologies resulted in a significant decrease in the total content of phenolic acids in the peel-rich tomato fraction (F5) compared to the raw product, where freeze-drying and hot air-drying (40 and 60 °C) produced higher reductions (Table 3). With the exception of the phenolic acids, the microwave drying technology showed the best results in relation to retention of phenolic compounds in the peel-rich tomato fraction (F5). This was probably related to the increase in the porosity of the peel cuticle that could result in an increase in the extractability of phenolic compounds from the peel matrix, especially the main flavanone naringenin.

Effect of drying processes on lycopene content

Lycopene is a bioactive pigment that occurs naturally in plants, and is found in large quantities in tomatoes (Martini et al., 2022). This compound can be extracted from tomato by-products and used as a food colorant, providing a color ranging from red to yellow, similar to natural and synthetic lycopene (Rizk et al., 2014; Silva et al., 2019). Due to its sensitivity to thermal processes (Bakir et al., 2023), it is fundamental to seek drying methods that obtain high retention and stability of this

compound in the dehydrated products. The results of the spectrophotometric quantification of lycopene for each type of tomato by-product (tomato pomace, the seed-rich F2 and peel-rich F5 fractions) are shown in Fig. 2. Among the three tomato fractions studied, the peel-rich fraction (F5) showed the highest lycopene concentration (47.6–98.9 mg/kg), while the content of lycopene in the TP ranged from 11.9 to 55.6 mg/kg, and in the seed-rich fraction (F2), it varied between 10.9 and 24.6 mg/kg, similarly to that previously described in the literature (Kumar et al., 2021). Analyzing the effect of the drying process on the TP lycopene content, hot air drying (40 °C and 60 °C) resulted in a degradation of close to 54% of the lycopene content (12 mg/kg) compared to the fresh sample (25.9 mg/kg DW) (Fig. 2). In contrast, microwave (MW) drying resulted in higher lycopene retention in the TP (44.1–53.2

mg/kg) (Fig. 2). This difference could be due to the bulk heating phenomenon, promoted by electromagnetic waves in the microwave, that appreciably reduces the drying time, leading to less degradation of thermolabile compounds (Bhatkar et al., 2021). Similar results were observed with the Spiral Flash dryer, where the reduced drying time could explain the higher lycopene retention (55.6 mg/kg) (Fig. 2).

When observing the impact of the type of drying technology on the lycopene content of the seed-rich fraction (F2), the drying technologies, with the exception of the Spiral Flash, resulted in an increase in the lycopene quantified (Fig. 2). The high stability of lycopene in seeds could be related with the protective effect of the seed matrix composition with high fat content (Rajan et al., 2022) against degradation during dehydration. In the literature, different quantities of lycopene

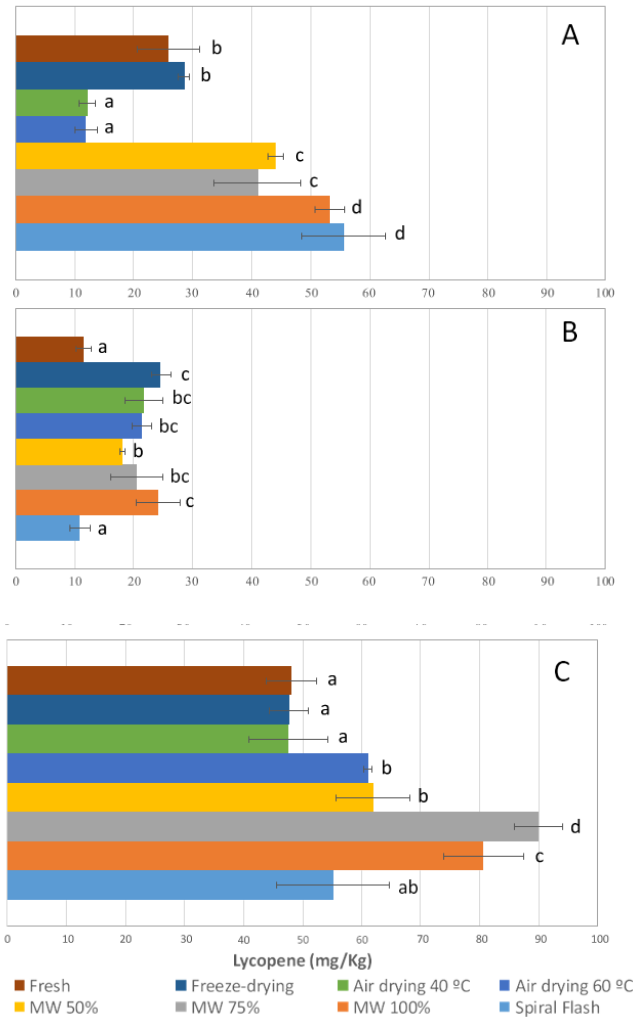


Fig. 2. Content of lycopene (expressed in mg/Kg sample) in each type of tomato by-product (A: Tomato pomace; B: Seed-rich fraction; C: Peel-rich fraction) and comparison between the dehydration methods. Different letters in the same tomato by-product present a significant difference between dehydration methods ($P < 0.05$).

have been reported in tomato seeds, from 16 to 167 mg/kg (Kumar et al., 2021; Silva et al., 2019).

Regarding the peel-rich tomato fraction (F5), the Spiral Flash, air drying (60 °C) and especially the microwave increased the lycopene quantified compared with the fresh sample (Fig. 2). The use of microwaves with higher powers (75% and 100%) undoubtedly resulted in better lycopene extraction from the peel matrix, with an average increase in its content, resulting in values between 89.9 and 80.7 mg/kg, respectively (Fig. 2). The impact of heat during short periods of time (microwave, Spiral Flash and hot-air at 60 °C) probably facilitates lycopene extraction from the tomato peel. In fact, the lycopene in the tomato peel is mainly in the bound form (Zuorro et al., 2013). Thus, previous studies have reported that heat processing is necessary to break down the membranes and cell walls and release lycopene from the insoluble part of the tomato, which may increase its bio-accessibility (Jayathunge et al., 2017). By contrast, heat treatment over a long period produces color degradation in the tomato peel as a consequence of lycopene degradation (Bakir et al., 2023).

Effect of drying processes on soluble dietary fiber content

Dietary fiber has attracted attention for many beneficial effects, such as increasing satiety, preventing colon cancer, lowering the risk of cardiovascular disease and reducing blood sugar (Fabek et al., 2014). Dietary fiber is either insoluble or soluble according to whether it can be dissolved in water (Arora et al., 2016). Soluble dietary fiber includes oligosaccharides, pectin and β -glucans. In our study, the soluble dietary fiber contents of the different fractions of the tomato by-products is shown in Table 4. The highest concentration of soluble dietary fiber was detected in the seed-rich fraction (F2) with a concentration ranging from 121.59 to 136.58 g/kg (average about 13%) compared with the peel-rich fraction (F5) whose concentration ranged from 64.10 to 74.24 g/kg (an average of around 7%). Regarding the dehydration methods, no significant differences were observed in the soluble dietary fiber content for each of the fractions studied (TP, F2 and F5) (Table 4), which indicates a good stability of the tomato soluble fiber during the dehydration process, regardless of the drying technology. Similarly to what was observed in the present study, previous studies have reported that the dietary fiber of tomato peel is around 8.9% soluble and 48.5% insoluble (Li et al., 2018). Another study by Grassino et al. (2016) applied conventional extraction and ultrasound-assisted extraction to obtain pectin from tomato waste, at around 15.1–35.7 g/kg, with a high extraction rate (73%). Therefore, the results of our study reveal the potential of tomato by-products, mainly the seed-rich fractions, as a source of soluble dietary fiber with commercial interest for functional food formulations.

1. Conclusion

The current study responds to the challenges of the tomato processing industry, since they have allowed the identification of dehydration technologies for tomato waste obtaining stable products that maintain their highly perishable bioactive compounds. The microwave drying technology showed the best results in the retention of the main flavonoid naringenin in tomato by-products, probably related with the increase in the porosity of the sample that favour the naringenin extractability. Moreover, the Spiral Flash air drying, which combines the advantages of flash drying and fluidized bed, revealed a great potential for application to the dehydration of tomato by-products on an industrial-scale, retaining the heat-sensitive phenolic compounds. In this system, the filtered hot air (140–160 °C) is pushed into the drying chamber by a fan generating a highly turbulent airflow that allowed the drying of the tomato pomace in a short time (20–60 s) in which the product does not exceed 45 °C. In contrast to the results observed for the flavonoids, the tomato phenolic acids (hydroxycinnamic and hydroxybenzoic acids) were more sensitive to the drying techniques studied.

Table 4

Soluble dietary fiber content in tomato by-products obtained from the different drying processes. The results are expressed as mg/kg sample and in % of the total weight.

Drying process*	Tomato Pomace (TP)		Soluble fiber (g/kg)(%)			
			Seed-rich fraction (F2)		Peel-rich fraction (F5)	
Freeze-drying	106.56	(10.6%)	131.39	(13.1%)	67.34	(6.7%)
Air drying 40 °C	112.06	(11.2%)	136.58	(13.7%)	71.63	(7.1%)
Air drying 60 °C	105.45	(10.5%)	128.77	(12.8%)	74.24	(7.4%)
Spiral Flash	101.33	(10.1%)	136.08	(13.6%)	72.28	(7.2%)
MW 50% 3 MG	99.51	(9.9%)	129.43	(12.9%)	64.10	(6.4%)
MW 75% 3 MG	100.56	(10.6%)	128.66	(12.8%)	69.66	(6.9%)
MW 100% 3 MG	106.26	(10.6%)	121.59	(12.1%)	67.52	(6.7%)

MW: Microwave. MG: 3 magnetrons, each with a power of 1000 W.

*No significant differences ($P < 0.05$) were observed between drying processes.

Surprisingly, freeze-drying resulted in a significant reduction in the phenolic acid concentration when compared to raw TP. The low-molecular-weight phenolic acids in plants are covalently bound to other compounds (i.e. pectin, cellulose, and proteins) and structural changes may occur during drying processes. Therefore, the low temperature conditions applied during freeze-drying would not be enough to liberate the phenolic acids from the tomato samples. Regarding lycopene, the use of microwaves with higher powers resulted in better lycopene retention in tomato by-products. The content of soluble dietary fiber was not affected by different dehydration technologies. The present study reinforces the interest in tomato by-products as a source of naringenin, a flavonoid with important nutraceutical properties. In addition, this study reveals the potential of peel-rich and seed-rich tomato fractions as sources of lycopene and soluble dietary fiber, respectively.

CRedit authorship contribution statement

Bianca Souza da Costa: Research, Methodology, Validation, Formal analysis, Writing – original draft. **Marta Oliván García:** Research, Formal analysis, Writing – review & editing. **German Soldevilla Muro:** Project administration, Supervision, Funding acquisition, Writing – review & editing. **Maria-Jose Motilva:** Conceptualization, Methodology, Writing – original draft, Supervision, Project administration, All the authors have read and approved the final manuscript.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

Data will be made available on request.

Acknowledgements and funding

The authors are grateful to the technical staff, Cristina Moreta and Miguel Ángel Fernández-Recio, of the Instrumental Analysis Service at the ICVV by their UHPLC-QqQ-MS/MS analytical and technical support in the phenol analysis. This work has been co-financed by the European FEADER funds, the Ministry of Agriculture and Food of Spain and the Government of La Rioja, through the project funded in call PDR “plus-PRODUCT: By-product valorization and development of the Circular Economy in the Agrifood Industry” (reference: 23M/20) and pre-doctoral grants.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114644>.

References

- Abbasi-Parizad, P., De Nisi, P., Adani, F., Sciarria, T. P., Squillace, P., Scarafoni, A., Iametti, S., & Scaglia, B. (2020). Antioxidant and anti-inflammatory activities of the crude extracts of raw and fermented tomato pomace and their correlations with aglycate-polyphenols. *Antioxidants*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/antiox9020179>
- Arora, S. K., Patel, A. A., Kumar, N., & Chauhan, O. P. (2016). Determination of relationship between sensory viscosity rating and instrumental flow behaviour of soluble dietary fibers. *Journal of Food Science & Technology*, 53(4), 2067–2076. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2193-0>
- Bakić, M. T., Pedisić, S., Zorić, Z., Dragović-Uzelac, V., & Grassino, A. N. (2019). Effect of microwave-assisted extraction on polyphenols recovery from tomato peel waste. *Acta Chimica Slovenica*, 66(2), 367–377. <https://doi.org/10.17344/acs.2018.4866>
- Bakir, S., Hall, R. D., de Vos, R. C. H., Mumm, R., Kadakal, C., & Capanoglu, E. (2023). Effect of drying treatments on the global metabolome and health-related compounds in tomatoes. *Food Chemistry*, 403, Article 134123. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134123>
- Belović, M., Torbica, A., Pajić Lijaković, I., Tomić, J., Lončarević, I., & Petrović, J. (2018). Tomato pomace powder as a raw material for ketchup production. *Food Bioscience*, 26(March), 193–199. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2018.10.013>
- Bhatkar, N. S., Shirkole, S. S., Mujumdar, A. S., & Thorat, B. N. (2021). Drying of tomatoes and tomato processing waste: A critical review of the quality aspects. *Drying Technology*, 39(11), 1720–1744. <https://doi.org/10.1080/07379397.2021.1910832>
- Capanoglu, E., Beekwilder, J., Boyacioglu, D., Hall, R., & De Vos, R. (2008). Changes in antioxidant and metabolite profiles during production of tomato paste. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(3), 964–973. <https://doi.org/10.1021/jf072999e>
- Cesare, M. M., Felice, F., Conti, V., Cerri, L., Zambito, Y., Romi, M., Cai, G., Cantini, C., & Di Slefano, R. (2021). Impact of peels extracts from an Italian ancient tomato variety grown under drought stress conditions on vascular related dysfunction. *Molecules*, 26(14). <https://doi.org/10.3390/molecules26144289>
- Četković, G., Savatović, S., Čanadanović-Brunet, J., Djilas, S., Vulić, J., Mandić, A., & Četojević-Simin, D. (2012). Valorisation of phenolic composition, antioxidant and cell growth activities of tomato waste. *Food Chemistry*, 133(3), 938–945. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.02.007>
- Chao, E., Li, J., & Fan, L. (2023). Influence of combined freeze-drying and far-infrared drying technologies on physicochemical properties of seed-used pumpkin. *Food Chemistry*, 398, Article 133849. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133849>
- Chumroenphat, T., Sombonwattanakul, I., Saensouk, S., & Siriamornpun, S. (2021). Changes in curcuminoids and chemical components of turmeric (*Curcuma longa* L.) under freeze-drying and low-temperature drying methods. *Food Chemistry*, 339, Article 128121. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128121>
- Coelho, M., Pereira, R., Rodrigues, A. S., Teixeira, J. A., & Pintado, M. E. (2019). Extraction of tomato by-products' bioactive compounds using ohmic technology. *Food and Bioprocess Processing*, 117, 329–339. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.08.005>
- Concha-Meyer, A., Palomo, I., Plaza, A., Gadioli Tarone, A., Junior, M. R. M., Sáyago-Ayerdi, S. G., & Fuentes, E. (2020). Platelet anti-aggregant activity and bioactive compounds of ultrasound-assisted extracts from whole and seedless tomato pomace. *Foods*, 9(11), 1564. <https://doi.org/10.3390/foods9111564>
- Costa, B. S. da, Muro, G. S., Oliván, M., & Motilva, M. J. (2022). Winemaking by-products as a source of phenolic compounds : Comparative study of dehydration processes. *LWT - Food Science and Technology*, 165(January). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113774>
- Davis, A. R., Fish, W. W., & Perkins-Veazie, P. (2003). A rapid hexane-free method for analyzing lycopene content in watermelon. *Journal of Food Science*, 68(1), 328–332. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2003.tb14160.x>
- Eyler, E., & Oztan, A. (2011). Production of frankfurters with tomato powder as a natural additive. *LWT - Food Science and Technology*, 44(1), 307–311. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.07.004>
- Fabek, H., Messerschmidt, S., Brulport, V., & Goff, H. D. (2014). The effect of invitro digestive processes on the viscosity of dietary fibres and their influence on glucose diffusion. *Food Hydrocolloids*, 35, 718–726. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.08.007>
- FAO. (2019). FAO statistical databases agriculture. *Food Balances (2010- 2019)* <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FBS>.
- Ghofrani, S., Joghataei, M. T., Mohseni, S., Baluchnejadmojarad, T., Bagheri, M., Khamse, S., & Roghani, M. (2015). Naringenin improves learning and memory in an Alzheimer's disease rat model: Insights into the underlying mechanisms. *European Journal of Pharmacology*, 764, 195–201. <https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2015.07.001>
- Grassino, A. N., Djaković, S., Bosiljkov, T., Halambek, J., Zorić, Z., Dragović-Uzelac, V., Petrović, M., & Brčić, S. R. (2020). Valorisation of tomato peel waste as a sustainable source for pectin, polyphenols and fatty acids recovery using sequential extraction. *Waste and Biomass Valorization*, 11(Issue 9), 4593–4611. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00814-7>
- Isik, F., & Topkaya, C. (2016). Effects of tomato pomace supplementation on chemical and nutritional properties of crackers. *Italian Journal of Food Science*, 28(3), 525–535. <https://doi.org/10.14674/1120-1770/ijfs.v510>
- Jayathunge, K. G. L. R., Stratakos, A. C., Cregežán-Albertia, O., Grant, I. R., Lyng, J., & Koidis, A. (2017). Enhancing the lycopene in vitro bioaccessibility of tomato juice synergistically applying thermal and non-thermal processing technologies. *Food Chemistry*, 221, 698–705. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.11.117>
- Kataoka, H., Saeki, A., Hasebe, A., Shibata, K. ichiro, & Into, T. (2021). Naringenin suppresses Toll-like receptor 2-mediated inflammatory responses through inhibition of receptor clustering on lipid rafts. *Food Sciences and Nutrition*, 9(2), 963–972. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2063>
- Kumar, M., Tomar, M., Bhuyan, D. J., Punia, S., Grasso, S., Sá, A. G. A., Carciofi, B. A. M., Arrutia, F., Changan, S., Radha Singh, S., Dhumal, S., Senapathy, M., Satankar, V., Anitha, T., Sharma, A., Pandiselvam, R., Amarovicz, R., & Mekhemar, M. (2021). Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seed: A review on bioactives and biomedical activities. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2021.112018>
- Li, N., Feng, Z., Niu, Y., & Yu, L. (2018). Structural, rheological and functional properties of modified soluble dietary fiber from tomato peels. *Food Hydrocolloids*, 77, 557–565. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.10.034>
- Majzoobi, M., Ghavi, F. S., Farahnaky, A., Jamalian, J., & Mesbahi, G. (2011). Effect of tomato pomace powder on the physicochemical properties of flat bread (barbari bread). *Journal of Food Processing and Preservation*, 35(2), 247–256. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2009.00447.x>
- Maran, J. P. (2015). Statistical optimization of aqueous extraction of pectin from waste durian rinds. *International Journal of Biological Macromolecules*, 73(1), 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.10.050>
- Martínez-Huélamo, M., Tulipani, S., Estruch, R., Escribano, E., Illán, M., Corella, D., & Lamuela-raventós, R. M. (2015). The tomato sauce making process affects the bioaccessibility and bioavailability of tomato phenolics: A pharmacokinetic study. *Food Chemistry*, 173, 864–872. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.156>
- Martini, D., Negrini, L., Marino, M., Riso, P., Del Bo, C., & Porrini, M. (2022). What is the current direction of the Research on carotenoids and human health? An overview of registered clinical trials. *Nutrients*, 14(6), 1191. <https://doi.org/10.3390/n14061191>
- Padalino, L., Conte, A., Lecce, L., Likyova, D., Sicari, V., Pellicano, T. M., Poiana, M., & Del Nobile, M. A. (2017). Functional pasta with tomato by-product as a source of antioxidant compounds and dietary fibre. *Czech Journal of Food Sciences*, 35(1), 48–56. <https://doi.org/10.17221/171/2016-CJFS>
- Pateiro, M., Vargas-Ramella, M., Franco, D., Gomes da Cruz, A., Zengin, G., Kumar, M., Dhama, K., & Lorenzo, J. M. (2022). The role of emerging technologies in the dehydration of berries: Quality, bioactive compounds, and shelf life. *Food Chemistry X*, 16, Article 100465. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100465>
- Perea-Domínguez, X. P., Mendoza-Espinoza, J. A., Solano González, J. M., Leyva-Morales, J. B., Espinosa-Alonso, L. G., & Valdez-Morales, M. (2021). Antioxidant and anti-proliferative activity of free, conjugates and bound phenolic compounds from tomato and industrial tomato by-product. *Journal of Food Science & Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05252-9>
- Rajan, A., Kumar, S., Sunil, C. K., Radhakrishnan, M., & Rawson, A. (2022). Recent advances in the utilization of industrial byproducts and wastes generated at different stages of tomato processing: Status report. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(11), Article e17063. <https://doi.org/10.1111/jfpp.17063>
- Rizk, E. M., El-Kady, A. T., & El-Bialy, A. R. (2014). Characterization of carotenoids (lycopene) extracted from tomato peels and its uses as natural colorants and antioxidants of ice cream. *Annals of Agricultural Science*, 59(1), 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.a0as.2014.06.008>
- Selvaggi, R., Valenti, F., Pecorino, B., & Porto, S. M. C. (2021). Assessment of tomato peels suitable for producing biometane within the context of circular economy: A GIS-based model analysis. *Sustainability*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/su13105559>
- Sharma, A., Bhardwaj, P., & Arya, S. K. (2021). Naringin: A potential natural product in the field of biomedical applications. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2, Article 100068. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100068>. July 2020.
- Silva, Y. P. A., Borba, B. C., Pereira, V. A., Reis, M. G., Caliani, M., Brooks, M. S. L., & Ferreira, T. A. P. C. (2019). Characterization of tomato processing by-product for use as a potential functional food ingredient: Nutritional composition, antioxidant activity and bioactive compounds. *International Journal of Food Sciences & Nutrition*, 70(2), 150–160. <https://doi.org/10.1080/09637486.2018.1489530>
- Tomas, M., Beekwilder, J., Hall, R. D., Sagdic, O., Boyacioglu, D., & Capanoglu, E. (2017). Industrial processing versus home processing of tomato sauce: Effects on phenolics, flavonoids and in vitro bioaccessibility of antioxidants. *Food Chemistry*, 220, 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.201>
- Valdez-Morales, M., Espinosa-Alonso, L. G., Espinoza-Torres, L. C., Delgado-Vargas, F., & Medina-Godoy, S. (2014). Phenolic content and antioxidant and antimutagenic activities in tomato peel, seeds, and byproducts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(23), 5281–5289. <https://doi.org/10.1021/jf5012374>
- Zuorro, A., Lavecchia, R., Medici, F., & Piga, L. (2013). Enzyme-assisted production of tomato seed oil enriched with lycopene from tomato pomace. *Food and Bioprocess Technology*, 6(12), 3499–3509. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-1003-6>

ANEXO 3. Poster con el que se ha asistido a congresos

REVALUATION OF WASTE GENERATED IN LA RIOJA AGRO-FOOD INDUSTRY. OBTAINING BY-PRODUCTS RICH IN BIOACTIVE COMPOUNDS WITH NOVEL TECHNOLOGIES.

Marta Oliván García, Mónica Mendiola Lanao, Miriam Caro Ruiz
1Agri-food Technology Center Ctic Cita, Spain

INTRODUCTION

Currently, high waste production represents a serious environmental problem (Mapama, 2017). In the European Union, the food processing industry creates around 100 Mt of waste (Maric Mirela et al., 2018; Okolie Chigozie Louis et al., 2019), with Spain ranking seventh with the generation of 7.7 million tonnes of food waste (Mapama, 2016).

This drives the food industry towards a circular economy, where as little as possible is discarded (Mapama, 2017). In order to make use of all this waste, new technologies have been developed such as microwaves, MAE, (electromagnetic energy with a frequency of 300 MHz to 300 GHz and a wavelength between 0.001 m and 1 m), which is environmentally friendly (Maric Mirela et al., 2018).

By-products can be obtained from currently discarded waste, which are rich in bioactive compounds, which have technological functions and are beneficial to health (Moreira Silvia A. et al., 2019; Villanueva-Suárez et al., 2019; El Kantar Sally et al., 2018). In this work, tomato and mushroom by-products are studied:

□ During tomato processing, residues such as skin and seeds are generated, which represent 12% of the total processed tomato. These residues are rich in carotenoids, among other substances of interest (Ho K.K.H.Y. et al., 2015; Szabo Katalin et al., 2018). The carotenoid found mostly in tomato skin is lycopene, an antioxidant and natural pigment (Ho K.K.H.Y. et al., 2015).

□ Mushrooms account for 15% of the world's total mushroom production (Ramos Marina et al., 2019). During industrial mushroom production, 5-20% of waste is generated (Aguillo-Aguayo Ingrid et al., 2017). Mushroom contains bioactive substances such as polysaccharides (fibres, chitin, β -glucan) (Chakraborty, I et al., 2019), proteins, and phenolic compounds (ergosterol) (Ramos Marina et al., 2019).

OBJECTIVES

- Reduction of the environmental impact of the food industry through the reduction and recovery of waste generated in vegetable transformation processes.
- Study of the conditions for obtaining extracts by means of MAE, in order to optimize the process.
- Validation of the method by means of physical-chemical analysis.

MATERIALS AND METHODS



Figure 1. Multi-energy microwave.

In this project, microwave-assisted extraction has been used to improve the extraction of by-products from mushroom and tomato waste, which are rich in health-related compounds and can have technological functions. To obtain the by-products, microwaves were used at a frequency of 2.45 GHz, at different powers: 1000W (25%), 2000W (50%), 3000W (75%) and 4000W (100%), for 3, 6 and 9 minutes.



Figure 2. Mushroom waste.

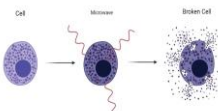


Figure 4. How microwaves affect the cell (own source).



Figure 3. Tomato waste.

To obtain an extract rich in bioactive compounds, a few grams of product (approximately 110 g) are placed in a solution. Water (which does not need to be further purified for food use) and a mixture of water/food ethanol (60-40%), hereafter ethanolic extracts, have been selected as solvents.

During the process, the back-and-forth mode is operated inside the cavity and the product temperature is controlled in 10s intervals. For aqueous extracts, cold air is injected, and the hatches are closed, while for ethanolic extracts, suction mode is used, and the hatches are left open.

The physicochemical quantification of lycopene in tomato and phenolic compounds in both tomato and mushroom is performed by spectrophotometric analysis (see RESULTS section).

RESULTS

Figure 1 shows, as an example, the variation of the temperature for the tomato treatments of lower power and time, as well as those of higher power and time, with the two types of solvents. Both for the aqueous and ethanolic extracts, the temperature in the lower power and time treatment reaches 70°C, while in the higher power and time treatment it reaches approximately 100°C.

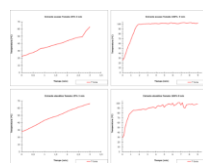


Figure 1. Temperature curves of microwave treatment on tomato extracts.

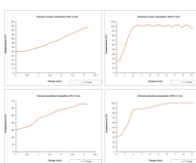


Figure 2. Temperature curves of microwave treatment on mushroom extracts.

Figure 2 shows, as an example, the variation of the temperature for the treatments with both types of solvents in the mushroom, of lower potency and time, as well as those of higher potency and time. For both aqueous and ethanolic extracts, the temperature in the treatment of higher potency and time reaches 100°C, while in the aqueous extract (for lower potency and time) it reaches approximately 53°C, and 66°C in the case of the ethanolic extract.

Chemical Polifenols Totales	Chemical Polifenols Totales
mg/100g (ppm)	mg/100g (ppm)
25% 3 min	0.47 ± 0.02**
25% 6 min	0.55 ± 0.46**
25% 9 min	0.53 ± 0.07**
50% 3 min	0.76 ± 0.21*
50% 6 min	0.58 ± 0.12**
50% 9 min	0.79 ± 0.65**
75% 3 min	2.07 ± 0.17**
75% 6 min	1.87 ± 0.36**
75% 9 min	3.39 ± 2.49**
100% 3 min	2.49 ± 0.22**
100% 6 min	3.11 ± 0.51**
100% 9 min	4.98 ± 0.86**
100% 3 min	0.75 ± 0.07**
100% 6 min	0.58 ± 0.04**

Table 1. Total polyphenol content of mushroom extracts.

Chemical Polifenols Totales	Chemical Polifenols Totales
mg/100g (ppm)	mg/100g (ppm)
25% 3 min	0.61 ± 0.01**
25% 6 min	0.72 ± 0.05*
25% 9 min	0.91 ± 0.02**
50% 3 min	1.01 ± 0.06**
50% 6 min	1.78 ± 0.53**
50% 9 min	1.92 ± 0.27**
75% 3 min	1.93 ± 0.85**
75% 6 min	2.86 ± 0.06**
75% 9 min	2.84 ± 0.79**
100% 3 min	5.64 ± 0.74**
100% 6 min	1.28 ± 0.12**
100% 9 min	1.74 ± 0.06**
100% 3 min	5.19 ± 0.68**
100% 6 min	21.36 ± 2.22**

Table 2. Total polyphenol content of tomato extracts.

Chemical Polifenols Totales	Chemical Polifenols Totales
mg/100g (ppm)	mg/100g (ppm)
25% 3 min	0.49 ± 0.39**
25% 6 min	0.81 ± 0.15**
25% 9 min	0.86 ± 0.21**
50% 3 min	0.71 ± 0.05**
50% 6 min	1.09 ± 0.37**
50% 9 min	1.13 ± 0.14**
75% 3 min	1.61 ± 0.07**
75% 6 min	1.58 ± 0.12**
75% 9 min	1.58 ± 0.12**
100% 3 min	0.49 ± 0.09**
100% 6 min	0.49 ± 0.09**
100% 9 min	0.49 ± 0.09**
100% 3 min	0.48 ± 0.05**
100% 6 min	0.48 ± 0.05**
100% 9 min	0.48 ± 0.05**

Table 3. Lycopene content of tomato extracts.

For mushroom extracts, the content of total phenols is found to be higher at maximum strength and maximum time, and with the use of ethanolic extracts.

It is shown that the higher the total polyphenol content in the tomato extracts, the longer the microwave treatment time and the higher the microwave treatment power. In addition, a higher number of polyphenols is observed in the ethanolic extracts.

According to this table, more lycopene is extracted with the ethanolic extract than with the aqueous extract. The highest extraction occurs at 100% power and 9 min time in both cases.

CONCLUSIONS

- ✓ Microwave technology allows obtaining by-products rich in bioactive compounds and is an interesting tool as a treatment prior to the extraction of active compounds.
- ✓ To optimize the process, it is necessary to consider the presence or not of solvent, the type of solvent, as well as the power and time of exposure to microwaves.
- ✓ In general, and in the case of tomato and mushroom, the best results are obtained with high power.

ACKNOWLEDGEMENTS

Pre-doctoral aid for research in the Technology Centers, Research Centers and Companies of the Autonomous Community of La Rioja (BOR nº 49, of 27 April 2018). Action cofinanced by the Government of La Rioja – Department of Economic Development and Innovation.