

Artículo de Revisión / Review Article

Tecnología emergente: Campo de pulsos eléctricos (PEF) para el tratamiento de alimentos y su efecto en el contenido de antioxidantes

Emerging technology: Pulsed Electric Fields (PEF) for food treatment and its effect on antioxidant content

Daniela Vivanco^{1,2}. <https://orcid.org/0000-0001-5743-7420>

Paula Ardiles^{1,2}. <https://orcid.org/0000-0001-7690-854X>

Darwin Castillo^{1,3}. <https://orcid.org/0000-0003-4524-1011>

Luis Puente^{1*}. <https://orcid.org/0000-0002-5214-8766>

1. Departamento de Ciencia de los Alimentos y Tecnología Química, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas, Universidad de Chile. Santiago, Chile.
2. Programa de Magister en Ciencias de los Alimentos, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas, Universidad de Chile. Santiago, Chile.
3. Programa de Magister en Alimentos, mención en Gestión, Calidad e Inocuidad de los Alimentos, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas, Universidad de Chile. Santiago, Chile.

*Dirigir correspondencia: Luis Puente.

Departamento de Ciencia de los Alimentos y Tecnología Química,
Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas, Universidad de Chile.
Santos Dumont 964, Independencia, Santiago, Chile.
Email: lpuente@ciq.uchile.cl

Este trabajo fue recibido el 05 de octubre de 2020.
Aceptado con modificaciones: 16 de marzo de 2021.
Aceptado para ser publicado: 06 de abril de 2021.

RESUMEN

Los métodos de conservación de alimentos no-térmicos han generado un considerable interés en la industria alimentaria como potencial alternativo a los métodos tradicionales de procesamiento. Uno de los métodos no-térmicos más estudiados es el de campos eléctricos pulsados o PEF (Pulsed Electric Fields). La aplicación de PEF en el procesamiento de alimentos permite limitar la exposición a altas temperaturas y reducir la necesidad de aditivos alimentarios. En PEF, se expone al alimento a pulsos eléctricos generando poros en la membrana celular, este fenómeno se le conoce como electroporación. La electroporación promueve la inactivación de organismos patógenos, reduce la actividad enzimática, favorece la transferencia de masa, mantención de color, sabor y contenido de compuestos antioxidantes, mejora la eficiencia en el procesamiento de alimentos y mantiene de cualidades organolépticas que son atractivas tanto para el consumidor como también para la industria. Los antioxidantes son sustancias capaces de proteger a las células de los radicales libres. La acción de los antioxidantes es de interés tanto del punto de vista sanitario, como industrial. Existe abundante evidencia que asocia el consumo de antioxidantes como factor protector ante enfermedades. Por otro lado, los antioxidantes cumplen un rol importante en la duración de los alimentos ya que actúan como conservantes, prolongando su vida útil. La utilización de PEF, respecto a otras tecnologías para el procesamiento de alimentos, ha demostrado un aumento en la extracción, menor pérdida por temperatura y una mayor disponibilidad de compuestos de interés, incluidos antioxidantes.

Palabras clave: Antioxidantes; Campos eléctricos pulsado; Conservación de alimentos; Electroporación; Procesamiento no-térmico.

ABSTRACT

Non-thermal food preservation methods have gained considerable interest in the food industry as a potential alternative to traditional processing methods. One of the most studied non-thermal methods is Pulsed Electric Fields (PEF). The application of PEF in food processing allows limiting exposure to high temperatures and reducing the need for food additives. In PEF, food is exposed to electrical pulses generating pores in the cell membrane, this phenomenon is known as electroporation. Electroporation promotes the inactivation of pathogenic organisms, reduces enzyme activity, favors mass transfer, maintains color, flavor and antioxidant compound content, improves food processing efficiency and maintains organoleptic qualities that are attractive to both the consumer and the industry. Antioxidants are substances capable of protecting cells from free radicals. The action of antioxidants is of interest both from a health and industrial point of view. There is abundant evidence that associates the consumption of antioxidants as a protective factor against diseases. On the other hand, antioxidants play an important role in the shelf life of foods as they act as preservatives, prolonging their shelf life. The use of PEF, compared to other food processing technologies, has shown an increase in extraction, lower temperature loss and greater availability of compounds of interest, including antioxidants.

Keywords: Antioxidantes; Electroporación; Food preservation; Non-thermal processing; Pulsed electric fields.

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas se han realizado considerables esfuerzos en la investigación para el desarrollo de tecnologías de procesamiento no-térmico de alimentos¹, las cuales han demostrado mejorar diferentes operaciones unitarias en la industria alimentaria proporcionando procesos más sostenibles y ecológicos, además de otorgar productos de mejor calidad y que cumplen con los estándares de inocuidad alimentaria².

Las tecnologías de procesamiento no-térmico son una alternativa al procesamiento clásico de los alimentos como: esterilización de alimentos y extracción de compuestos, los cuales están basados en la exposición a altas temperaturas. De estas nuevas tecnologías las más comúnmente utilizadas son: Ultrasonido (US), procesamiento por altas presiones (HPP), luz ultravioleta (UV), irradiación (IR) y campos eléctricos pulsados (PEF), entre otros³.

PEF es actualmente una de las tecnologías de procesamiento de alimentos no térmicas más populares, es un método alternativo de pretratamiento de matrices alimentarias^{4,5}, con un gran potencial de inactivación microbiana, extensión de vida útil, y preservación de propiedades nutricionales, sensoriales y compuestos asociados al sabor⁶. El efecto de PEF está mediado por su tiempo de procesamiento ultracorto, la permeabilización que genera en la membrana de las células en las matrices alimentarias y la ausencia de exposición del alimento a altas temperaturas⁷, lo que resulta en una mejor calidad del producto obtenido debido a que los compuestos más sensibles no son sometidos a procesos que puedan dañarlos.

Los antioxidantes son sustancias capaces de proteger a las células del daño causado por radicales libres. Los radicales libres son moléculas inestables generadas por el proceso de oxidación durante el metabolismo normal de sistemas bióticos. Existe abundante evidencia que señala la actividad de los radicales libres como responsable del desarrollo de

enfermedades degenerativas⁸, como cáncer, cardiopatías, aterosclerosis, demencia senil, diabetes mellitus tipo 2 (DM2) e insulinoresistencia (IR), como así también, se ha descrito el rol protector de los compuestos antioxidantes antes dichas enfermedades^{9,10}. Así también, los antioxidantes cumplen un rol importante en la vida útil de los alimentos, ya que actúan como conservantes, impidiendo la oxidación, una etapa obligatoria en la putrefacción. Los antioxidantes son uno de los tipos de conservantes o preservantes usados por la industria alimentaria, los cuales presentan bajos niveles de toxicidad y tienen mejor aceptabilidad por parte de los consumidores, ya que los reconocen como beneficiosos par su salud y por tanto, los perciben como inocuos, a diferencia de los ocurre con otros aditivos alimentarios. En esta revisión se presenta una actualización del estado del arte de la tecnología emergente PEF, otorgando información de las variables inherentes del proceso, su efecto sobre la mejora en la extracción de ciertos compuestos bioactivos propios de diversas matrices alimentarias, con especial énfasis en los compuestos con actividad antioxidante¹¹.

En esta revisión se presenta una actualización del estado del arte de la tecnología emergente PEF, otorgando información de las variables inherentes del proceso, su efecto sobre la mejora en la extracción de ciertos compuestos bioactivos propios de diversas matrices alimentarias, con especial énfasis en los compuestos con actividad antioxidante.

¿Qué es la tecnología de campos eléctricos pulsados (PEF)?

La tecnología PEF usa pulsos de alto voltaje de corta duración, los cuales varían entre mili y microsegundos y que pueden ir, generalmente, de 1 a 80 kV/cm, pero estos pueden variar dependiendo del equipo que se tenga y la metodología a realizar. La intensidad y duración por elegir depende de la finalidad que se le dé al proceso^{12,13}. El procedimiento se lleva a cabo dentro de una cámara de

tratamiento (Figura 1), la cual se compone de dos electrodos conectados entre sí y dejando una separación específica entre un electrodo y otro.

PEF incita inestabilidad local y tensión en la membrana celular debido a la compresión electromecánica y promueve

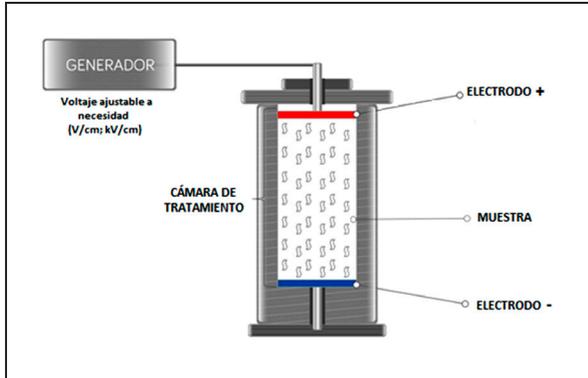


Figura 1: Esquema del equipo usado para el tratamiento mediante PEF. Compuesto por dos electrodos, una cámara de tratamiento y un generador de voltaje.

la formación de poros en la membrana dando paso al fenómeno denominado como “electroporación” (Figura 2)^{14,15}. Si es que la muestra se encuentra tratada en solución, la descomposición eléctrica de las membranas celulares aumenta la permeabilidad, y puede facilitar el paso de compuestos intracelulares a la solución circundante¹⁶. Este aumento en la permeabilización celular mejora los procesos basados en transferencia de calor y masa¹⁷, lo cual es de interés en especial al someter los alimentos a procesos posteriores, por ejemplo, facilita el secado acortando el tiempo de tratamiento y por ende la exposición al calor, disminuyendo así la degradación de compuestos termolábiles¹⁸.

Debido a que el proceso de electroporación está estrechamente relacionado al potencial de membrana es necesario dejar en claro que éste es la diferencia de carga a ambos lados de una membrana que separa dos soluciones de diferente concentración de iones, como la membrana celular que separa el interior y el exterior de una célula (Figura 3). El potencial de membrana puede ser modificado por la exposición a un campo eléctrico externo, el resultado que dará esta exposición se encuentra mediado tanto por la intensidad del campo eléctrico, del tamaño de la célula y de su forma. Cuando el campo eléctrico aplicado supera un determinado valor umbral se produce un fenómeno

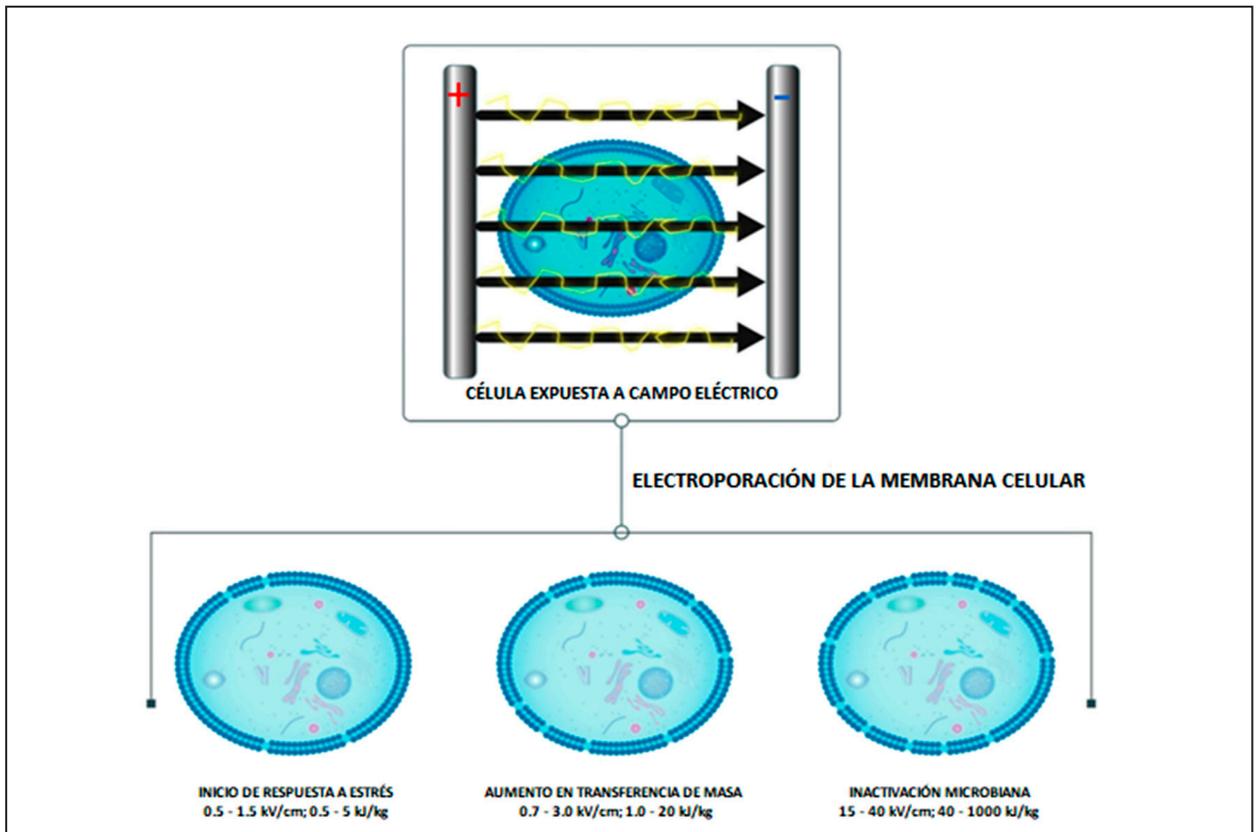


Figura 2: El grado de electroporación y su efecto varía según la intensidad del pulso eléctrico al que es sometida la célula.

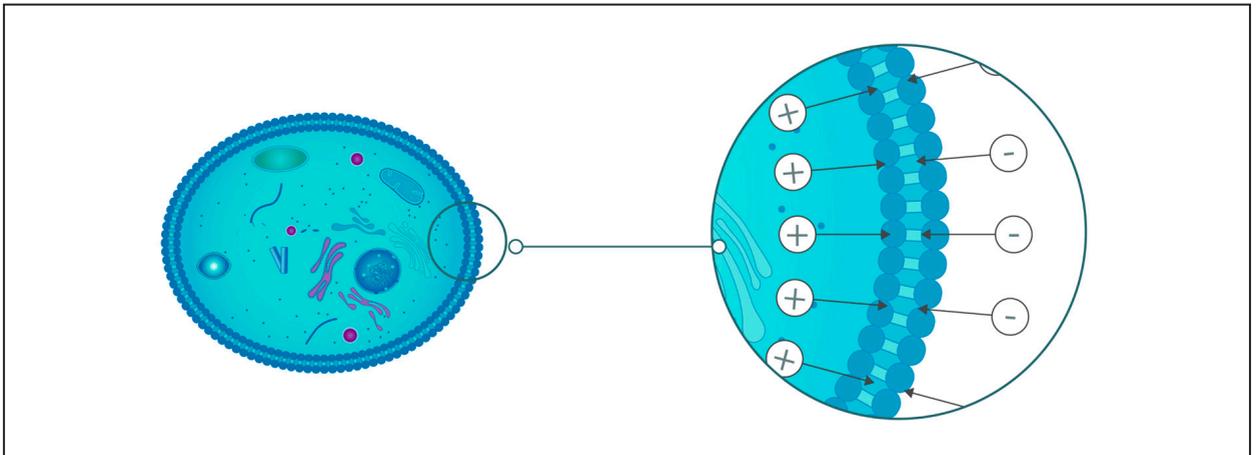


Figura 3: Diferencia de cargas entre ambos lados de la membrana genera el potencial eléctrico.

denominado electroporación. La intensidad del campo eléctrico externa requerida para alcanzar el umbral de voltaje transmembrana se conoce como intensidad de campo eléctrico crítico, es decir, se trata de la energía necesaria para inducir el aumento de permeabilización de membrana o electroporación¹⁹.

Dependiendo del protocolo utilizado, el proceso de permeabilización puede ser reversible o irreversible. La permeabilización reversible puede inducir cambios en la respuesta metabólica al causar estrés subletal a la célula, aumentar la producción de metabolitos secundarios como compuestos fenólicos, lo que resulta en un aumento de la actividad antioxidante²⁰ (Tabla 1). La permeabilidad irreversible inducida por PEF permite mejoras significativas en la transferencia de calor y masa durante varios procesos como, el secado²¹; concentración y extracción de compuestos²²; que resulta en mejores rendimientos de producción y menor tiempo de procesamiento.

El campo eléctrico puede ser aplicado de distintas maneras a través de la modulación de la frecuencia de onda e intensidad de éste, siendo algunos ejemplos: disminución en la frecuencia de forma exponencial, ondas bipolares o pulsos oscilatorios²³. Al ajustar la intensidad de los campos eléctricos se puede obtener diversos efectos sobre el alimento tratado, como: inactivación microbiana (15-40 kV/cm), mejora de la tasa de transferencia de masa en tejidos vegetales y animales (0,7-3,0 kV/cm); estimulación de las respuestas al estrés (0,5-1,5 kV/cm); y electroporación (0,7 kV cm)^{13,24}.

PEF se puede agrupar según la intensidad del campo de pulso eléctrico utilizado como, i) campo de pulso eléctrico de alta intensidad (HIPEF), ii) campo de pulso eléctrico de mediana intensidad (MIPEF), iii) campo de pulso eléctrico de baja intensidad (LIPEF). En las publicaciones revisadas, existen diferencias de los voltajes descritos para cada grupo, los que van de 20 a 80 kV/cm²⁵ para HIPEF, entre 0,5 a 5

kV/cm para MIPEF²⁶, y en el caso de LIPEF pueden variar entre 2 a 5 V/cm²⁷. Aunque, nuevamente, esta clasificación fue realizada de manera general y puede no abarcar bien todos los rangos de voltajes en los que trabaja cada equipo de estudio/trabajo individualmente.

La aplicación HIPEF resulta en una reducción en el tiempo de tratamiento. Por el contrario, el uso de LIPEF requiere la aplicación de tiempos de tratamiento prolongados y un gran número de pulsos cortos, o menos pulsos, pero de mayor amplitud. Los pulsos cortos requieren principalmente el uso de altas frecuencias para grandes flujos, y esto puede ser un factor limitante para los generadores de PEF. Los pulsos largos, por otro lado, pueden resultar en reacciones electroquímicas no deseadas en los electrodos; por ejemplo en el estudio realizado por Pataro et al.²⁸, el largo de los pulsos aplicados dio como resultado incrustaciones, corrosión y liberación de metales durante el tratamiento de un vino, lo que significa un compromiso en la inocuidad y calidad del producto tratado.

En equipos a escala industrial, la intensidad del campo eléctrico oscila entre 10 y 20 kV/cm, valores que difieren a lo reportado en estudios científicos donde las condiciones suelen estar en el rango de 15-40 kV/cm y con pulsos aplicados (20 μ s hasta 2000 μ s), esta diferencia permite resultados de una efectividad y costos adecuados para la industria²⁹, por lo que la escalabilidad del proceso resulta factible, no obstante, el generador de PEF requiere un voltaje y potencia de entrada mayor, y este factor podría limitar la aplicación de la tecnología en ciertos casos. Otro punto a considerar es la gran variabilidad de equipos existentes, lo que se traduce en diferencias de campos de pulsos eléctricos, voltajes aplicados en general, como también de los voltajes de entrada y salida, o la factibilidad de aplicar pulsos a ciertos rangos durante el proceso, entre otras, haciendo así que la intensidad del campo eléctrico no sea siempre uniforme y sea difícil estandarizar los protocolos³⁰.

Tabla 1. Efecto de los tratamientos de campos eléctricos pulsados en la recuperación de diferentes compuestos con actividad antioxidante a partir de distintas matrices alimentarias.

Efecto de PEF	Parámetros PEF aplicados	Efecto de PEF
Jugo de Naranja ⁵⁷	Temperatura de tratamiento: <40 °C Intensidad del campo: 35 kV/cm Duración total: 4 µs Número de pulsos: 250	El jugo de naranja tratado con HIPEF retuvo 2,7 y 2,5 veces más vitamina C durante 56 días de almacenamiento a 4 °C que el jugo tratado térmicamente y sin tratar, respectivamente. Por otro lado, la retención de vitamina C en el jugo de naranja procesado con HIPEF fue un 10% mayor que lo logrado en la pasteurización tradicional. A pesar de la degradación de la vitamina C, la capacidad antioxidante se mantuvo casi estable durante todo el almacenamiento.
Jugo de Naranja ⁵⁶	Temperatura de tratamiento: <50 °C Intensidad del campo: 35 kV/cm Duración total: 4 µs Número de pulsos: 188	Durante el almacenamiento refrigerado a 4 °C, los jugos de naranja tratados con altas presiones (HP) mantuvieron una mayor actividad antioxidante y vitamina C que los jugos tratados con baja pasteurización (LPT), mientras que los jugos tratados con PEF no mostraron cambios en su actividad antioxidante.
Jugo de Fresa ⁵²	Temperatura de tratamiento: <40 °C Intensidad del campo: 35 kV/cm Duración total: 1, 4 y 7 µs Número de pulsos: 1000, 250 y 143	La frecuencia del pulso, el ancho del pulso y el modo de polaridad tuvieron una influencia significativa sobre la vitamina C, las antocianinas y la capacidad antioxidante del jugo de fresa.
Jugo de fruta – Leche de soya (FJ-SM) ⁴⁶	Temperatura de tratamiento: <32 °C Intensidad del campo: 35 kV/cm Duración total: 4 µs Número de pulsos: 200 y 350	La bebida tratada por HIPEF con 200 y 350 pulsos tuvo una mayor concentración de compuestos fenólicos y carotenoides totales que la bebida FJ-SM procesada con calor.
Jugo de Tomate ⁴⁷	Temperatura de tratamiento: <40 °C Intensidad del campo: 35 kV/cm Duración total: 4 µs Número de pulsos: 375	La combinación de los tratamientos de campos eléctricos pulsados de intensidad moderada (MIPEF) y de alta intensidad (HIPEF) podría usarse no solo para producir jugos de tomate con alto contenido de carotenoides, sino también para mantener un mayor contenido de carotenoides durante el tiempo de almacenamiento.
Ginseng ¹⁶	Temperatura de tratamiento: Ambiente. Intensidad del campo: 1,5 y 2,5 kV/cm Duración total: 25 µs Número de pulsos: 500	El contenido de compuestos fenólicos aumentó significativamente usando 1.5 kV/cm (893.83 ± 28.93 mg TAE/100 g) y 2.5 kV/cm (877.40 ± 21.83 mg TAE/100 g), en comparación con las muestras no tratadas (807.02 ± 28.86 mg TAE/100 g).
Tomate fresco ⁴⁸	Temperatura de tratamiento: 20 °C Intensidad del campo: 2 kV/cm Duración total: - µs Número de pulsos: 30	Bajo estas condiciones de tratamiento, la bioaccesibilidad de licopeno, δ-caroteno, β-caroteno, γ-caroteno y luteína aumentó en 132%, 2%, 53%, 527% y 125%, respectivamente.

Efecto de PEF	Parámetros PEF aplicados	Efecto de PEF
Jugo de cactus (<i>Opuntia dillenii</i>) ⁵⁵	Temperatura de tratamiento: 45- 67 °C Intensidad del campo: 35 kV/cm Duración total: 3 µs Número de pulsos: -	El campo eléctrico pulsado (PEF) y la alta presión hidrostática (HHP) mantuvieron la actividad antioxidante del jugo, los cuales, comparados con la pasteurización, dieron como resultado mejores rendimientos.
Jugo de Toronja ³	Temperatura de tratamiento: 40 °C Intensidad del campo: 20 kV/cm Duración total: 600 µs Número de pulsos: 1	Como también aumentó el contenido de licopeno en casi el doble comparado con el control (0.62 ± 0.04 µg/ml), mismo caso de las antocianinas donde hubo un leve aumento (1.58 ± 0.03 mg/L), al igual que con el contenido de carotenoides (1.03 ± 0.04 mg/ml). Por otro lado, la capacidad antioxidante igualmente aumentó con el tratamiento PEF de 177.48 ± 0.05 equivalente de ácido ascórbico mg/g (control) a 226.73 ± 0.04, y lo mismo se vio en mediciones de DPPH donde el porcentaje de inhibición (% inhibición) aumentó de 32.80 ± 0.04 (control) a 38.74 ± 0.05.
Extracto de Stevia ¹⁷	Temperatura de tratamiento: 20 °C Intensidad del campo: 13.3 kV/cm Duración total: 10 µs Número de pulsos: 300	Se encontró un aumento significativo en la materia soluble y de compuestos antioxidantes después de la extracción asistida por descargas eléctricas de alto voltaje (HVED), campos eléctricos pulsados (PEF) y ultrasonido (US) en comparación con muestras de control.
Jugo de Brócoli ⁴⁹	Temperatura de tratamiento: <50 °C Intensidad del campo: 35 kV/cm Duración total: 4 µs Número de pulsos: 188	Los resultados obtenidos con HIPEF se compararon con los de jugos tratados térmicamente (90 °C/60s) y sin tratar. Los parámetros de procesamiento de HIPEF influyeron en el contenido relativo (RC) de los compuestos bioactivos y la capacidad antioxidante relativo (RAC). La RC máxima de luteína (121.2%), β-caroteno (130.5%), contenido fenólico total (96.1%), vitamina C (90.1%) y RAC (5.9%) se alcanzó entre 25 y 35 kV/cm y de 500 a 313 pulsos.
Bebidas a base de zumos de frutas ⁴⁵	Temperatura de tratamiento: <35 °C Intensidad del campo: 35 kV/cm Duración total: 4 µs Número de pulsos: 450	Las tecnologías no térmicas (HIPEF y HP) fueron más efectivas que el tratamiento térmico para preservar la concentración y bioaccesibilidad de los carotenoides y otros compuestos lipofílicos con actividad antioxidante de las bebidas a base de una mezcla de jugos de frutas (naranja, piña, kiwi y mango) y agua, leche o leche de soya.
Vino ⁵³	Temperatura de tratamiento: - °C Intensidad del campo: 5 kV/cm Duración total: 10 µs Número de pulsos: 100	El pretratamiento del mosto con PEF produjo diferencias, aumento del 56% en el color, el contenido de flavonoles fue 48%, aumento de fenólicos totales con un de 18%; en comparación con el control.

Efecto de PEF	Parámetros PEF aplicados	Efecto de PEF
Damasco deshidratado ⁴	Temperatura de tratamiento: 5 °C (LPEF, HPEF1, HPEF2) Intensidad del campo: 0.625 kV/cm (LPEF); 1.25 kV/cm (HPEF1, HPEF2). Duración total: 20 µs Número de pulsos: -	El tratamiento con HPEF2 retuvo más β-caroteno y mostró menos oscurecimiento después del tratamiento con PEF y el secado con aire caliente en comparación con las muestras no tratadas. El tratamiento HPEF2 retuvo mayores niveles de actividad antioxidante comparada con otros tratamientos de muestra.
Remolacha ⁵⁴	Temperatura de tratamiento: - °C Intensidad del campo: 4.38 kV/cm Duración total: 10 µs Número de pulsos: 20	El uso de PEF con una intensidad de 4.38 kV/cm, 20 pulsos y un consumo de energía de 4.10 kJ/kg, permitió un aumento en el rendimiento de la extracción de betanina y vulgaxantina de la remolacha en 329 % y 244 %, respectivamente, en comparación con el controlar.

Procesamiento de alimentos mediante PEF

Las matrices alimentarias tratadas con PEF más estudiadas son los alimentos líquidos, en desmedro de los sólidos. Esto se explica ya que los alimentos líquidos poseen altas concentraciones de iones, proteínas, vitaminas, triacilglicéridos y minerales, los cuales funcionan como una especie de portadores de carga eléctrica, haciendo que la corriente eléctrica aplicada fluya mejor dentro del alimento tratado^{24,31,32}; aunque es necesario destacar que esta técnica también ha sido y puede ser aplicada en alimentos sólidos, pero con una eficiencia distinta a la presentada por los alimentos líquidos, y en sí, si se usa en alimentos sólidos generalmente es con el fin de mejorar la extracción de ciertos compuestos bioactivos o la liberación de azúcares³³.

Generalmente PEF se ha estudiado y se usado para la inactivación de microorganismos en los alimentos con fines de esterilización; y recientemente es que se ha dado otro enfoque, destacando estudios relacionados a el efecto que tiene sobre la actividad antioxidante en los alimentos³⁴.

Antioxidantes dietarios

Los antioxidantes son, según Villanueva et al.³⁵, "compuestos o sistemas que retrasan la auto-oxidación mediante la inhibición de la formación de radicales libres o mediante la interrupción de la propagación del radical libre por medio de uno o más mecanismos", destacando que los distintos mecanismos que existen dependen del antioxidante en cuestión de donde se desglosa la siguiente lista:

- Antioxidantes enzimáticos, como superóxido dismutasa, catalasa, glutatión peroxidasa, glutatión S-transferasa, tioredoxina-reductasa y sulfoxi-metionina-reductasa.
- Antioxidantes no-enzimáticos, como glutatión, ácido úrico, ácido dihidro-lipóico, metalotioneína, ubiquinol (o Co-enzima Q) y melatonina.

- Vitaminas-antioxidantes, como ácido ascórbico, α-tocoferol y β-caroteno (o provitamina A)
- Carotenoides (como luteína, zeaxantina y licopeno)
- Polifenoles, en sus categorías de flavonoides y no-flavonoides
- Compuestos que no caen en las tres categorías anteriores, como son algunos glucosinolatos (ej. isotiocianatos) y ciertos compuestos organo-azufrados (ej. dialil-disulfido).

Existe abundante evidencia en la que se asocia el rol que juega los radicales libres sobre la patogénesis de distintas enfermedades crónicas no transmisibles y, como el consumo de compuestos con actividad antioxidante, como ciertas vitaminas y compuestos fenólicos, pueden ser favorable, sin embargo, las propiedades antioxidantes no sólo deben estudiarse por sus interacciones químico-biológicas, sino por su función en el deterioro oxidativo que afecta a los alimentos³⁶.

Una de las desventajas que presentan los antioxidantes, especialmente los compuestos fenólicos (Figura 4), es que son muy sensibles a distintas condiciones ambientales y de tratamiento destacando sobre todo su sensibilidad a las altas temperaturas^{37,38} al igual que la vitamina C que ha mostrado también tener un gran sensibilidad respecto a este parámetro degradándose fácilmente³⁹ y una evidencia de todo esto es el estudio de Agostini et al.⁴⁰, donde analizó diversas frutas y verduras las cuales fueron tratadas térmicamente dando como resultado la disminución de la actividad antioxidante luego de su procesamiento.

Efecto de los PEF sobre los antioxidantes

Se sabe que PEF no requiere ni produce aumento de temperaturas tan significativos como otros procesos

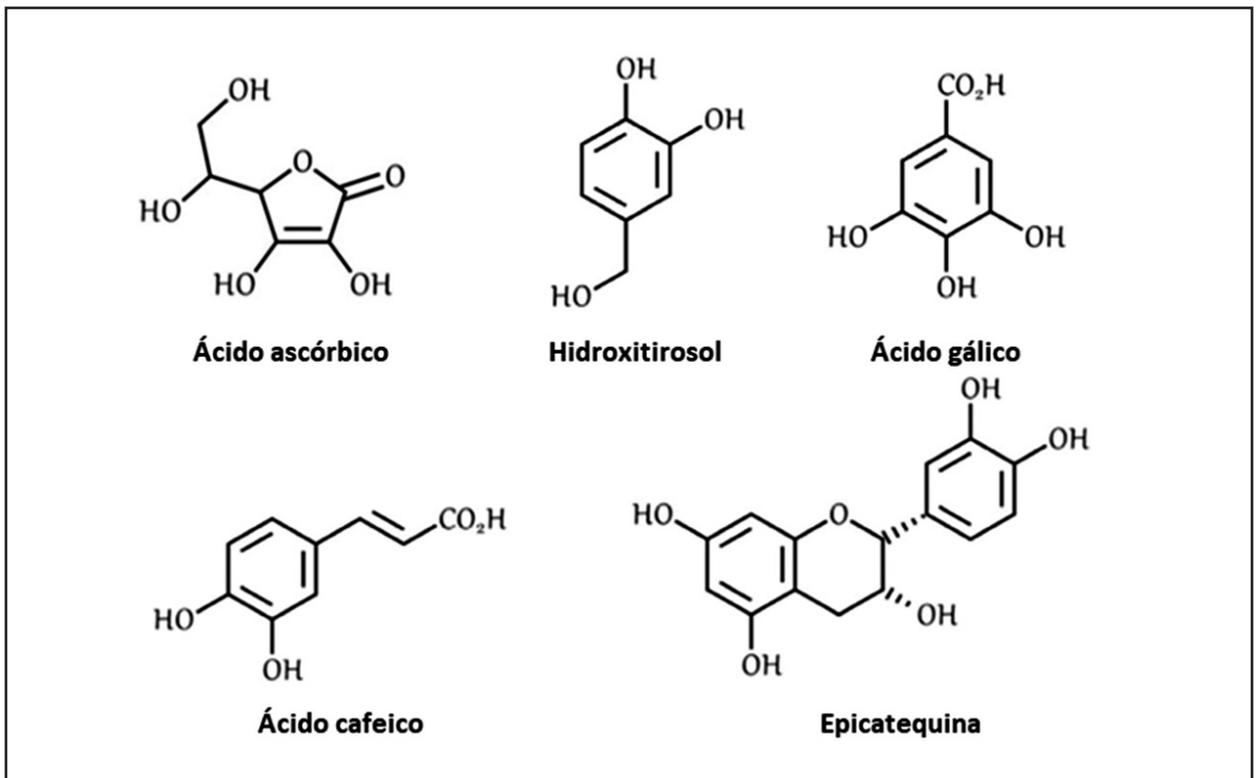


Figura 4: Estructura química de ciertos compuestos con actividad antioxidante. Fuente: referencia⁵⁹.

convencionales^{33,41}, sin embargo, la información disponible sobre el efecto de los PEF en los componentes bioactivos es más limitada en comparación con los resultados de la pasteurización de alimentos con tratamientos PEF, y el mecanismo preciso de los cambios inducidos por el PEF aún no se comprende en profundidad^{42,43}. En la tabla 1 se muestran algunos efectos de los tratamientos PEF sobre antioxidantes en diferentes matrices alimentarias.

En el contexto de los carotenoides, los cuales están naturalmente presentes en los cromoplastos de frutas y verduras de colores que varían entre el rango de rojo, naranja y amarillo (zanahoria, pimentones, naranja, entre otros), se ha sugerido que éstos actúan como importantes barreras estructurales físicas que impiden la micelarización de estos compuestos lipofílicos⁴³, varios estudios han informado que la operación del procesamiento de PEF interrumpe la matriz alimentaria facilitando así su liberación, transformación y absorción durante la digestión, lo que aumenta su bioaccesibilidad⁴⁴. Dado que los tratamientos de PEF producen una descomposición eléctrica de las membranas celulares, se cree que esta tecnología podría favorecer la liberación de carotenoides de la matriz alimentaria. En este sentido, diversos autores^{3,45,46,47,48,49}; informaron que la aplicación de tratamientos PEF mejoró la bioaccesibilidad de carotenoides en jugos de frutas, leche de soya, tomate

fresco y en jugo, jugo de brócoli, bebidas a base de zumos de frutas, jugo de toronja (Tabla 1).

Por otro lado, con respecto a otros compuestos bioactivos, además de los carotenoides, algunos estudios han demostrado que el tratamiento con PEF puede causar una lixiviación más rápida de la vitamina C en la solución osmótica⁵⁰. Sin embargo, Yu et al.⁵¹ observaron que las muestras de arándanos tratadas con PEF mostraron una menor pérdida de polifenoles totales (66%) en comparación con las muestras de control (79%), después de la deshidratación osmótica. Por otro lado, respecto a la actividad de ciertas enzimas, se explicó que el pretratamiento de PEF causó la inactivación de la polifenol oxidasa (PPO), lo que aumentó significativamente la retención de antocianinas, predominantemente ácidos fenólicos y flavonoles, fenoles totales y actividad antioxidante en los arándanos deshidratados. En relación con eso, varios grupos de investigación^{4,16,17,52,53,54,55,56,57} reportaron resultados significativos de estos compuestos bioactivos en jugo de naranja, jugo de fresa, ginseng, extracto de stevia, vino, damasco deshidratado, remolacha, jugo de cactus (*Opuntia dillenii*) (Tabla 1). Los compuestos fenólicos en bayas y frutas en general son bien conocidos por sus propiedades antimicrobianas y, por lo tanto, el pretratamiento con PEF de las bayas que mantienen fenólicos puede aumentar también su potencial antimicrobiano⁵⁸ reduciendo el uso de conservantes.

CONCLUSIONES

Las tecnologías de procesamiento térmico han sido hasta ahora la norma en la industria alimenticia, sin embargo, pueden generar efectos indeseados en los productos tratados como, el deterioro de ciertos compuestos de interés nutricional, y modificaciones en las cualidades organolépticas. Por lo que nace la necesidad de investigar nuevas alternativas para el procesamiento de alimentos, dentro de las cuales se encuentra PEF. El uso más común de esta técnica ha sido la esterilización de alimentos, no obstante, el potencial de PEF no se limita tan solo a esto, sino también se ha informado su uso en la extracción de compuestos bioactivos que pueden ser de interés para la industria. PEF presenta gran versatilidad ya que es factible de usar en distintas matrices alimentarias, tanto como líquidos y sólidos. Cabe destacar que la falta de uniformidad de los protocolos utilizados en los distintos estudios llevados a cabo representa un desafío para la industria al momento de escalar esta técnica.

Dentro de los compuestos que se ven afectados por la utilización de procesos térmicos están los antioxidantes, donde PEF pareciera ser una alternativa, sin embargo, existe gran variabilidad en los resultados, ya que las condiciones del procesamiento difieren entre un grupo de investigación y otro. A pesar de esto, la variabilidad de resultados puede ser una oportunidad, ya que esta diferencia nos demuestra que, a través de la modulación de los protocolos, la técnica puede significar la retención de compuestos antioxidantes o facilitar la liberación de estos, por lo que se debe tener claros los objetivos del trabajo, previo a la implementación de la técnica sobre una matriz alimentaria, para así determinar las variables que permitirán obtener el resultado deseado.

PEF es una de las tecnologías emergentes para el procesamiento de alimentos que ha recibido mayor interés entre los distintos grupos de investigación alrededor del mundo, pero tal como ocurre con todas estas nuevas tecnologías es necesario llegar a un consenso sobre algunos temas fundamentales, incluyendo las configuraciones del equipo, la factibilidad de su uso en diversos alimentos y microorganismos como también su regulación sanitaria. Es necesario que haya consenso sobre todas estas variables para que la aplicación de la técnica sea exitosa.

Founding Source. *This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.*

REFERENCIAS

- Ramaswamy R, Jin T, Balasubramaniam V, Zhang H. Pulsed Electric Field Processing Fact Sheet for Food Processors. Zhang H, Barbosa-Cánovas Gustavo, Balasubramaniam V, Dunne C, Farkas D, and Yuan T. ed. *Nonthermal processing technologies for food*. Weinheim. Wiley, 2011, p. 600-607.
- Chemat F, Rombaut N, Meullemiestre A, Turk M, Périno-Issartier S, Fabiano-Tixier A, et al. Review of green food processing techniques. *Preservation, transformation, and extraction*. *Innov Food Sci Emerg Technol*. 2017; 41: 357-377.
- Aadil R, Zeng X, Han Z, Sahar A, Khalil A, Rahman U, et al. Combined effects of pulsed electric field and ultrasound on bioactive compounds and microbial quality of grapefruit juice. *J. Food Process Preserv*. 2018; 42: e13507.
- Huang W, Feng Z, Aila R, Hou Y, Carne A, Bekhit A. Effect of pulsed electric fields (PEF) on physico-chemical properties, β -carotene and antioxidant activity of air-dried apricots. *Food Chem*. 2019; 291: 253-262.
- McAuley C, Singh T, Haro-Maza J, Williams R, Buckow R. Microbiological and physicochemical stability of raw, pasteurised or pulsed electric field-treated milk. *Innov Food Sci Emerg Technol*. 2016; 38: 365-373.
- Guo M, Jin T, Geveke D, Fan X, Sites J, Wang L. Evaluation of microbial stability, bioactive compounds, physicochemical properties, and consumer acceptance of pomegranate juice processed in a commercial scale pulsed electric field system. *Food Bioproc Tech*. 2014; 7: 2112-2120.
- Lin S, Guo Y, You Q, Yin Y, Liu J, Luo P. Effects of high-intensity pulsed electric field on antioxidant attributes of hydrolysates derived from egg white protein. *J. Food Biochem*. 2013; 37: 45-52.
- Florence T. The role of free radicals in disease. *Aust N Z J Ophthalmol*. 1995; 23: 3-7.
- Jennings A, Welch A, Spector T, Macgregor A, Cassidy A. Intakes of anthocyanins and flavones are associated with biomarkers of insulin resistance and inflammation in women. *J Nutr*. 2014; 144: 202-208.
- Calvano A, Izuora K, Oh E, Ebersole J, Lyons T, Basu A. Dietary berries, insulin resistance and type 2 diabetes: An overview of human feeding trials. *Food Funct*. 2019; 10: 6227-6243.
- Franco R, Navarro G, Martínez-Pinilla E. Antioxidants versus food antioxidant additives and food preservatives. *Antioxidants*. 2019; 8: 542.
- Bekhit A, Suwandy V, Carne A, Ahmed I, Wang Z. Manipulation on meat quality: electrical stimulation and pulsed electric field. Bekhit A ed. *Advances in meat processing technology*. Boca Raton, CRC Press. 2017, p. 42-48.
- Gabrić D, Barba F, Roohinejad S, Charibzahedi S, Radojčin M, Putnik P, et al. Pulsed electric fields as an alternative to thermal processing for preservation of nutritive and physicochemical properties of beverages: A review. *J. Food Process Eng*. 2018; 41: e12638.
- Barbosa-Cánovas G, Gongora-Nieto M, Pothakamury U, Swanson B. Eds. *Fundamentals of high-intensity pulsed electric fields (PEF), in Preservation of foods with pulsed electric fields*. London. Academic Press, 1999, p. 1-2.
- Wouters P, Alvarez I, Raso J. Critical factors determining inactivation kinetics by pulsed electric field food processing. *Trends Food Sci Technol*. 2001; 12: 112-121.
- Kim, Y, Kwon H, Lee D. Effects of pulsed electric field (PEF) treatment on physicochemical properties of Panax ginseng. *Innov Food Sci Emerg Technol*. 2019; 58: 102232.
- Barba, F, Grimi N, Vorobiev E. Evaluating the potential of cell disruption technologies for green selective extraction of antioxidant compounds from Stevia rebaudiana Bertoni leaves. *J Food Eng*. 2015; 149: 222-228.
- Niu D, Zeng X, Ren E, Xu F, Li J, Wang M, et al. Review of the application of pulsed electric fields (PEF) technology for food processing in China. *Food Res Int*. 2020; 137: 109715.
- Álvarez I, Condón S, Raso J. Microbial inactivation by

- pulsed electric fields. Raso J, Heinz V. ed. *Pulsed electric fields technology for the food industry*. New York. Springer, 2006, p. 97-129.
20. Dörnenburg, H, Knorr D. Strategies for the improvement of secondary metabolite production in plant cell cultures. *Enzyme Microb Technol*. 1995; 17: 674-684.
 21. Parniakov O, Bals O, Lebovka N, Vorobiev E. Pulsed electric field assisted vacuum freeze-drying of apple tissue. *Innov Food Sci Emerg Technol*. 2016; 35: 52-57.
 22. Guderjan M, Elez-Martínez P, Knorr D. Application of pulsed electric fields at oil yield and content of functional food ingredients at the production of rapeseed oil. *Innov Food Sci Emerg Technol*. 2007; 8: 55-62.
 23. Syed Q, Ishaq A, Rahman U, Aslam S, Shukat R. Pulsed electric field technology in food preservation: A review. *J Nutri. Health Food Eng*. 2017; 6: 168-172.
 24. Oey I, Roohinejad S, Leong S, Faridnia F, Lee P, Kethireddy V. Pulsed electric field processing: Its technological opportunities and consumer perception. *Food process*. Jaiswal A ed. *Food Processing Technologies*. Boca Raton, CRC Press, ke. 2016, p. 447-516.
 25. Yongguang Y, Yuzhu H, Yong H. Pulsed electric field extraction of polysaccharide from *Rana temporaria chensinensis* David. *Int J Pharm*. 2006; 312: 33-36.
 26. Wang M, Wang L, Bekhit A, Yang J, Hou Z, Wang Y, et al. A review of sublethal effects of pulsed electric field on cells in food processing. *J. Food Eng*. 2018; 223: 32-41.
 27. Podolska V, Ermakov V, Yakubenko L, Ulberg Z, Gryshchenko N. Effect of low-intensity pulsed electric fields on the respiratory activity and electrosurface properties of bacteria. *Food Biophys*. 2009; 4: 281-290.
 28. Pataro G, Falcone M, Donsi G, Ferrari G. Metal release from stainless steel electrodes of a PEF treatment chamber: effects of electrical parameters and food composition. *Innov Food Sci Emerg Technol*. 2014; 21: 58-65.
 29. Kempkes, M. Industrial pulsed electric field systems. Miklavcic D. ed. *Handbook of electroporation*. Cham. Springer, 2017, p. 1-21.
 30. Jaeger H, Meneses N, Knorr D. Impact of PEF treatment inhomogeneity such as electric field distribution, flow characteristics and temperature effects on the inactivation of *E. coli* and milk alkaline phosphatase. *Innov Food Sci Emerg Technol*. 2009; 10: 470-480.
 31. Zhang Q, Barbosa-Cánovas G, Swanson B. Engineering aspects of pulsed electric field pasteurization. *J. Food Eng*. 1995; 25: 261-281.
 32. Pal M. Pulsed electric field processing: An emerging technology for food preservation. *J Exp Food Chem*. 2017; 3: 2-3.
 33. Siemer C, Aganovic K, Toepfl S, Heinz V. Application of Pulsed Electric Fields in Food. Bhattacharya S. ed. *Conventional and Advanced Food Processing Technologies*. Weinheim. Wiley, 2014, p. 645-672.
 34. Lin S, Liang R, Li X, Xing J, Yuan Y. Effect of pulsed electric field (PEF) on structures and antioxidant activity of soybean source peptides-SHCMN. *Food Chem*. 2016; 213: 588-594.
 35. Villanueva E, Rodríguez G, Aguirre E, Castro V. Influence of antioxidants on oxidative stability of the oil chia (*Salvia hispanica* L.) by rancimat. *Sci Agropecu*. 2017; 8: 19-27.
 36. Flora S. Structural, chemical and biological aspects of antioxidants for strategies against metal and metalloids exposure. *Oxid Med Cell Longev*. 2009; 2: 191-206.
 37. Tonon R, Brabet C, Hubinger M. Anthocyanin stability and antioxidant activity of spray-dried açai (*Euterpe oleracea* Mart.) juice produced with different carrier agents. *Food Res Int*. 2010; 43: 907-914.
 38. Fang Z, Bhandari B. Effect of spray drying and storage on the stability of bayberry polyphenols. *Food Chem*. 2011; 129: 1139-1147.
 39. Zhang Z, Zeng X, Brennan C, Brennan M, Han Z, Xiong X. Effects of pulsed electric fields (PEF) on vitamin C and its antioxidant properties. *Int J Mol Sci*. 2015; 16: 24159-24173.
 40. Agostini L, Morón M, Ramón A, Ayala A. Determinación de la capacidad antioxidante de flavonoides en frutas y verduras frescas y tratadas térmicamente. *Arch Latinoam Nutr*. 2004; 54: 89-92.
 41. Meneses N, Jaeger H, Knorr D. pH-changes during pulsed electric field treatments-Numerical simulation and in situ impact on polyphenoloxidase inactivation. *Innov Food Sci Emerg Technol*. 2011; 12: 499-504.
 42. Soliva-Fortuny R, Balasa A, Knorr D, Martín-Belloso O. Effects of pulsed electric fields on bioactive compounds in foods: A review. *Trends Food Sci Technol*. 2009; 20: 544-556.
 43. Palmero P, Lemmens L, Hendrickx M, Van Loey A. Role of carotenoid type on the effect of thermal processing on bioaccessibility. *Food Chem*. 2014; 157: 275-282.
 44. Colle I, Lemmens L, Van Buggenhout S, Met K, Van Loey A, Hendrickx Marc. Processing tomato pulp in the presence of lipids: The impact on lycopene bioaccessibility. *Food Res Int*. 2013; 51: 32-38.
 45. Rodríguez-Roque M, de Ancos B, Sánchez-Vega R, Sánchez-Moreno C, Cano M, Elez-Martínez P, et al. Food matrix and processing influence on carotenoid bioaccessibility and lipophilic antioxidant activity of fruit juice-based beverages. *Food Funct*. 2016; 7: 380-389.
 46. Morales-de la Peña M, Salvia-Trujillo L, Rojas-Graü M, Martín-Belloso O. Changes on phenolic and carotenoid composition of high intensity pulsed electric field and thermally treated fruit juice-soymilk beverages during refrigerated storage. *Food Chem*. 2011; 129: 982-990.
 47. Vallverdú-Queralt A, Odriozola-Serrano I, Oms-Oliu G, Lamuela-Raventós R, Elez-Martínez P, Martín-Belloso O. Impact of high-intensity pulsed electric fields on carotenoids profile of tomato juice made of moderate-intensity pulsed electric field-treated tomatoes. *Food Chem*. 2013; 141: 3131-3138.
 48. González-Casado S, Martín-Belloso O, Elez-Martínez P, Soliva-Fortuny R. Application of pulsed electric fields to tomato fruit for enhancing the bioaccessibility of carotenoids in derived products. *Food Funct*. 2018; 9: 2282-2289.
 49. Sánchez-Vega R, Elez-Martínez P, Martín-Belloso O. Influence of high-intensity pulsed electric field processing parameters on antioxidant compounds of broccoli juice. *Innov Food Sci Emerg Technol*. 2015; 29: 70-77.
 50. Ade-Omowaye B, Angersbach A, Taiwo K, Knorr D. Use of pulsed electric field pre-treatment to improve dehydration characteristics of plant based foods. *Trends Food Sci Technol*. 2001; 12: 285-295.
 51. Yu Y, Jin T, Fan X, Wu J. Biochemical degradation and physical migration of polyphenolic compounds in osmotic dehydrated blueberries with pulsed electric field and thermal pretreatments. *Food Chem*. 2018; 239: 1219-1225.
 52. Odriozola-Serrano I, Soliva-Fortuny R, Martín-Belloso O. Impact of high-intensity pulsed electric fields variables

- on vitamin C, anthocyanins and antioxidant capacity of strawberry juice. *LWT*. 2009; 42: 93-100.
53. El Darra N, Turk M, Ducasse M, Grimi N, Maroun R, Louka N, Vorobiev E. Changes in polyphenol profiles and color composition of freshly fermented model wine due to pulsed electric field, enzymes and thermovinification pretreatments. *Food Chem*. 2016; 194: 944-950.
54. Nowacka M, Tappi S, Wiktor A, Rybak K, Miszczykowska A, Czyzewski J, et al. The impact of pulsed electric field on the extraction of bioactive compounds from beetroot. *Foods*. 2019; 8: 244.
55. Moussa-Ayoub T, Jäger H, Knorr D, El-Samahy S, Kroh L, Rohn S. Impact of pulsed electric fields, high hydrostatic pressure, and thermal pasteurization on selected characteristics of *Opuntia dillenii* cactus juice. *LWT*. 2017; 79: 534-542.
56. Plaza L, Sánchez-Moreno C, Elez-Martínez P, de Ancos B, Martín-Belloso O, Cano M. Effect of refrigerated storage on vitamin C and antioxidant activity of orange juice processed by high-pressure or pulsed electric fields with regard to low pasteurization. *Eur Food Res Tech*. 2006; 223: 487-493.
57. Elez-Martínez P, Soliva-Fortuny R, Martín O. Comparative study on shelf life of orange juice processed by high intensity pulsed electric fields or heat treatment. *Eur Food Res Tech*. 2006; 222: 321-329.
58. Tylewicz U, Oliveira G, Almingier M, Nohynek L, Dalla Rosa M, Romani S. Antioxidant and antimicrobial properties of organic fruits subjected to PEF-assisted osmotic dehydration. *Innov Food Sci Emerg Technol*. 2020; 62: 102341.
59. Santos-Sánchez N, Salas-Coronado R, Villanueva-Cañongo C, Hernández-Carlos B. Antioxidant compounds and their antioxidant mechanism. Shalaby E. ed. *Antioxidants*. London. IntechOpen. 2019, p. 1-29.