

VNiVERSiDAD D SALAMANCA

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE
ZAMORA**

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y AGRONOMÍA



TESIS DOCTORAL

**HARINAS Y CONCENTRADOS DE PROTEÍNA
VEGETAL: CARACTERIZACIÓN NUTRICIONAL Y
PROPIEDADES TECNOCFUNCIONALES**

Yamina Absi

2024



ANA MARIA VIVAR QUINTANA E ISABEL REVILLA MARTÍN,
CATEDRÁTICAS DE UNIVERSIDAD, PERTENECIENTES AL
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE SALAMANCA,

HACEN CONSTAR QUE:

La tesis doctoral titulada “HARINAS Y CONCENTRADOS DE PROTEÍNA VEGETAL:
CARACTERIZACIÓN NUTRICIONAL Y PROPIEDADES TECNOFUNCIONALES” ha
sido realizada por Dña. Yamina Absi bajo nuestra dirección para optar al título de doctor por la
Universidad de Salamanca.

Cumpléndose todos los requisitos recogidos en la normativa correspondiente, damos nuestra
conformidad para que sea presentada y defendida.

Los estudios realizados en esta Memoria se han realizado en el marco del proyecto de investigación TRANSCOLAB PLUS (0112_TRANSCOLAB_PLUS_2_P), titulado “Laboratorio Colaborativo Transfronterizo para la transición verde del sector Agroalimentario y Agroindustrial” cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional – FEDER – a través del Programa de Cooperación INTERREG VI – A España-Portugal (POCTEP) 2021-2027

AGRADECIMIENTOS

In the face of the completion of this Doctoral Thesis work, I must express my infinite gratitude. First, to Allah the Almighty for giving me the courage and concentration to finish this work so important to me.

I am immensely grateful to my country Algeria for granting me the invaluable opportunity to pursue a doctoral degree in Spain. Words can hardly express the depth of my gratitude for this scholarship, which has been nothing short of a life-changing treasure. It stands as a testament to the culmination of my academic journey, reflecting years of dedication and hard work at the esteemed University of Mouloud Mammeri in Tizi Ouzou.

My most sincere thanks to my two thesis supervisors, Professors Ana Vivar and Isabel Revilla, for giving me the opportunity to carry out a doctoral thesis in your laboratories. Behind this thesis there is a great effort on your part. Thank you for your willingness, guidance, and especially for your patience and support during all these years, thank you very much.

I would also like to thank Miriam, Marisol, Iván and Pedro for their support, assistance and advice. I would like to give a special mention to all the people who have passed through the lab, who have always offered words of encouragement and shared special moments, forging great friendships. Thanks to Marta and Eloy for their messages of encouragement.

I am infinitely grateful and cannot express in words my gratitude to my family, especially to my mother, a heroic woman, for her total confidence from the beginning, her constant support throughout all these years, her sacrifices and for making me feel close despite the great distance. To my brother, sisters and nephews, you are the best and I am lucky to have you in my life. I cannot fail to mention the people who cannot be with me today and who would feel a great sense of pride at this moment. I thank my father for teaching us from an early age the values of effort, perseverance and respect. I still and forever remember the first day you took me to school. To my grandparents, for their invaluable advice on the importance of knowledge and study, and for everything in life.

Finally, I extend my heartfelt appreciation to the Universidad de Salamanca and the Escuela Politécnica Superior de Zamora. Their unwavering support and exceptional academic environment have played a pivotal role in shaping my doctoral experience. I consider myself incredibly fortunate to have had the privilege of studying under their guidance, and I am forever grateful for the enriching opportunities they have provided.

اللهم أنفعني بما علمتني وعلمني ما ينفعني في الدنيا والآخرة وزدني علما

(O Allah, benefit me with what You have taught me and teach me what benefits me in this world and the Hereafter, and increase me in knowledge)

(Oh Allah, benefíciame con lo que me has enseñado y enséñame lo que me beneficia en este mundo y en el Más Allá, y auméntame el conocimiento)

ÍNDICE

I. RESUMEN	13
II. HIPÓTESIS DE PARTIDA Y OBJETIVOS	19
III. INTRODUCCIÓN	23
1. Nuevos retos de la alimentación actual	23
1.1. Cambio climático	23
1.2. Incremento de la población mundial	24
1.3. Intolerancias alimentarias	25
1.4. Calidad y trazabilidad: etiquetas transparentes	26
1.5. Nuevos consumidores	32
1.5.1. Vegetarianos	33
1.5.2. Veganos	34
1.5.3. Flexitarianos	36
1.6. Nuevos alimentos	37
1.6.1. Alimentos alternativos a la carne	39
1.6.2. Alimentos alternativos a los lácteos	41
2. Nuevos alimentos de origen vegetal	43
2.1. Harinas	44
2.1.1. Definición	44
2.1.2. Harinas de cereales sin gluten	47
2.1.3. Harinas de leguminosas	50
2.1.4. Harinas de pseudocereales y otras fuentes	53
2.2. Concentrados y aislados de proteína	54
2.2.1. Definición	55
2.2.2. Propiedades funcionales de los concentrados	55
2.2.3. Concentrados y aislados de cereales sin gluten	58
2.2.4. Concentrados y aislados de leguminosas	59
2.2.5. Concentrados y aislados de pseudocereales y otras fuentes	62
3. Bibliografía	63

IV. RESULTADOS

ARTICULO 1. 87

Nutritional Value, Mineral Composition, Fatty Acid Profile and Bioactive Compounds of Commercial Plant-Based Gluten-Free Flours

Resumen 88

Artículo original 93

ARTICULO 2. 113

Commercial hemp (*Cannabis sativa* subsp. *sativa*) proteins and flours, nutritional and techno-functional properties

Resumen 114

Artículo original 117

ARTICULO 3. 132

Comparative Analysis of Commercial Plant-Based Gluten-Free Proteins: Exploring the Nutritional Composition and Functional Properties of Rice, Pea, and Soybean

Resumen 133

Artículo original 137

V. CONCLUSIONES 175

I. RESUMEN/SUMMARY

RESUMEN

El sistema alimentario actual se enfrenta a desafíos tales como el cambio climático, con un impacto significativo en la productividad agrícola, el aumento de la población mundial, lo que implica un aumento constante de la demanda de alimentos y al aumento en la prevalencia de intolerancias, alergias alimentarias y cambio en los patrones dietéticos. En este escenario, la industria alimentaria encuentra en las harinas y los concentrados de proteína vegetal una alternativa saludable y versátil para la sustitución, tanto parcial como total, de otras fuentes de proteína de origen animal. Aunque harinas y concentrados prometen beneficios ambientales y nutricionales, su adopción generalizada en la industria alimentaria aún enfrenta desafíos, como la aceptación en el mercado y la optimización de su incorporación en los procesos de producción.

La hipótesis de partida de la presente tesis es que las harinas y concentrados de proteína de origen vegetal presentan una gran variabilidad en función del vegetal del que provienen, por lo que es necesario caracterizar tanto el aporte nutricional como la funcionalidad tecnológica de estos productos para poder establecer su aplicabilidad industrial.

El primer artículo estudió la calidad nutricional de diez harinas comerciales de cáñamo, arroz, soja, garbanzo y guisante, en relación con las necesidades dietéticas analizándose para ello parámetros de composición fenólica y actividad antioxidante, micro y macroelementos y ácidos grasos además de la composición proximal incluyendo contenido proteico, en fibra, grasa total e hidratos de carbono. Los resultados revelaron una variabilidad significativa entre los productos influida por factores tales como la marca y/o la especie. Cabe destacar el mayor contenido en compuestos fenólicos y actividad antioxidante de las harinas de soja y cáñamo mientras que la harina de guisante se caracterizó por su alto contenido en ácido oleico. Estos resultados demuestran que las harinas vegetales son productos distintos con composiciones nutricionales que varían en función de las materias primas y los métodos de producción, poniendo de relieve la importancia de un etiquetado preciso para estos productos.

En el segundo artículo, se evaluaron diferentes concentrados proteicos y harinas de cáñamo como una alternativa interesante y sostenible para la industria alimentaria. El estudio aborda la caracterización exhaustiva de la composición nutricional y de las propiedades fisicoquímicas y funcionalidades de cuatro productos comerciales de cáñamo, dos harinas y dos concentrados, uno de ellos ecológico y el otro convencional. Los productos de cáñamo destacaron por su alto contenido en ácidos grasos poliinsaturados, buen perfil aminoacídico y alto contenido en potasio y fósforo. Los concentrados proteicos se caracterizaron por sus

mejores propiedades tecno-funcionales, mientras que las harinas destacaron por su alto contenido en fibra y compuestos fenólicos. Los productos ecológicos analizados mostraron diferencias en la composición proximal y contenido fenólico, pero no en los perfiles de ácidos grasos, aminoácidos y propiedades tecno funcionales.

Al tercer artículo realizó la comparación de seis variedades comerciales de proteínas vegetales sin gluten procedentes de arroz, guisante y soja como alternativas viables a las proteínas de origen animal. El objetivo fue comparar la composición nutricional, para lo que se analizó la composición proximal, minerales, ácidos grasos, componentes bioactivos y actividad antioxidante, y las propiedades funcionales. Los resultados mostraron que las proteínas de soja presentaron los contenidos más altos de proteínas, compuestos fenólicos y las mejores propiedades de gelificación, así como de retención de agua y aceite, seguidas por las proteínas de guisante, mientras que las de arroz destacaron por su alta capacidad emulsionante.

En conclusión, la investigación llevada a cabo ha puesto de relieve la influencia de la variedad y/o la marca comercial en las cualidades nutricionales y funcionales, tanto en la harina como en los concentrados de proteína. Todas las opciones vegetales analizadas han mostrado una interesante composición desde el punto de vista tanto nutricional, asociada a posibles beneficios para la salud. Así mismo, presentan unas interesantes propiedades tecno-funcionales que las señalan como alternativas versátiles para su uso industrial y para la innovación de productos de origen vegetal, al tiempo que contribuyen a promover la sostenibilidad. Sin embargo, también ha revelado la necesidad de una supervisión reglamentaria que garantice su seguridad, especialmente debido a la posible presencia de metales pesados.

SUMMARY

The current food system faces multiple challenges. On the one hand, climate change has a significant impact on agricultural productivity and greenhouse gas emissions. On the other hand, the world population continues to grow, which implies a steady increase in demand for food, water and energy, increasing pressure on agricultural systems and natural resources. At the same time, there is an increase in the prevalence of food intolerances and allergies and a shift in dietary patterns.

In this context, the food industry finds in vegetable protein flours and concentrates a healthy and versatile alternative for their incorporation as a food ingredient for the partial or total substitution of other sources of animal protein. Although protein flours and concentrates promise environmental and nutritional benefits, their widespread adoption in the food industry still faces challenges, such as market acceptance and optimisation of production processes.

The starting hypothesis of this thesis is that flours and protein concentrate of vegetable origin present a great variability depending on the vegetable they come from, so it is necessary to characterise these products in order to establish their suitable use, both from the point of view of their nutritional contribution and their technological functionality.

The initial article of this research, included in the thesis, examined the nutritional composition of ten vegetable flours from hemp, rice, soya, chickpea and pea. The aim of the study was to assess the nutritional quality of these commercial flours in relation to current guidelines and dietary requirements such as phenolic and antioxidant composition, micro- and macrolelements, fatty acids as well as proximal composition including protein, fibre, total fat and carbohydrate content. The results revealed significant variability between products influenced by factors such as brand and/or species. Noteworthy was the higher content of phenolic compounds and antioxidant activity of soybean and hemp flours, while pea flour was characterised by its high oleic acid content. These results highlight that vegetable flours are diverse products with nutritional compositions that vary according to raw materials and production methods, highlighting the importance of accurate labelling for these products.

In the second article, several hemp proteins concentrates and flours were evaluated as an innovative and sustainable alternative for the food industry. The study deals with the comprehensive characterisation of the nutritional composition, physicochemical properties, and functionalities of four commercial hemp products, two flours and two concentrates, one of them organic and the other conventional. The hemp products were characterised by a high content of polyunsaturated fatty acids, a good amino acid profile and a high content of

potassium and phosphorus. The protein concentrates were characterised by better techno-functional properties, while the flours were noted for their high content of fibre and phenolic compounds. The organic products analysed showed differences in proximal composition and phenolic content, but not in fatty acid profiles, amino acids, and techno-functional properties.

The third article is a comparative study of gluten-free vegetable proteins from rice, pea and soya as viable alternatives to traditional animal proteins. The aim is to compare the nutritional composition and functional properties of six commercial varieties of these protein concentrates. Analyses of proximate composition, minerals, fatty acids, bioactive components, and antioxidant activity, as well as physicochemical and techno-functional parameters were carried out. The results showed that soy proteins exhibited the highest contents of proteins, phenolic compounds and the best gelling properties as well as water and oil retention, followed by pea proteins, while rice proteins were outstanding for their high emulsifying capacity.

In conclusion, the research carried out has highlighted the influence of variety and/or brand name on the nutritional and functional qualities of both flour and protein concentrates. All the vegetable options analysed have shown an interesting composition from a nutritional point of view, associated with possible health benefits. They also present interesting techno-functional properties that suggest them as versatile alternatives for industrial use and innovation of plant-based products, as well as contributing to the promotion of sustainability. However, it has also revealed the need for regulatory monitoring to ensure their safety, especially due to the possible presence of heavy metals.

II. HIPÓTESIS DE PARTIDA Y OBJETIVOS

HIPÓTESIS DE PARTIDA Y OBJETIVOS

Hipótesis

Uno de los grandes retos a los que se enfrenta la industria alimentaria es garantizar el futuro de los sistemas alimentarios a fin de que sean más sostenibles, responsables, inclusivos, y competitivos. Los consumidores valoran especialmente a aquellas empresas que llevan a cabo esfuerzos por preservar y mejorar el medio ambiente, pero también que realizan prácticas comerciales éticas y que se preocupen por la salud pública. En los últimos años ha surgido un nuevo tipo de consumidores que podríamos denominar "flexitarianos", cuyo número no para de crecer. Este tipo de consumidor se caracteriza por la reducción el consumo de carne en su dieta diaria preocupados por el alto impacto ambiental de la producción de carne.

La FAO estimó que la ganadería produce un 14,5% de los gases de efecto invernadero de las actividades humanas a escala mundial. Por otro lado, el aumento exponencial que ha experimentado la población en las últimas décadas ha generado una preocupación creciente, a escala mundial, por el déficit de productos ricos en proteína. La producción de carne no puede aumentar sin generar una situación insostenible desde un punto de vista medioambiental. Este hecho ha llevado a la realización de numerosas investigaciones centradas en encontrar nuevas fuentes proteicas y nuevas tecnologías que permitan obtener una mayor disponibilidad y calidad de proteínas, a partir de las diferentes fuentes proteicas. Así, a nivel europeo existe un interés creciente por las producciones de proteína vegetal, como lo muestra el "Plan de Proteína vegetal" impulsado por la Unión Europea, cuya finalidad es mejorar el nivel de autoabastecimiento entre cultivos de alto contenido proteico.

Bajo el término Plant-based foods (alimentos de origen vegetal) se engloban las frutas, verduras, semillas, legumbres, especias, etc. Dentro de ellos, las semillas de alto valor proteico y las legumbres están experimentando en los últimos años un creciente desarrollo y aplicación a través de su transformación en harinas y concentrados de proteína. Para la industria alimentaria estos productos son particularmente interesantes debido a las propiedades tecno-funcionales que presentan (formación de geles, espumas y emulsiones, absorción de agua y aceite), por lo que son ideales para adicionarse a matrices alimentarias como los productos de panificación, cárnicos, lácteos, bebidas y alimentos de nutrición especializada. Además, presentan la posibilidad de ser utilizados tanto en la elaboración de alimentos sin gluten como en dietas veganas y vegetarianas.

La hipótesis de partida de la presente tesis es que las harinas y concentrados de proteína de origen vegetal presentan una gran variabilidad en función del vegetal del que provienen, por lo que es necesario caracterizar estos productos para poder establecer su utilización idónea, tanto desde un punto de vista del aporte nutricional que suponen como por su funcionalidad tecnológica.

Esta hipótesis de partida se aborda en la presente tesis doctoral a través de tres objetivos específicos.

Objetivos

Objetivo 1. Caracterización de la composición nutricional. Se pretende evaluar las diferencias nutricionales de harinas y concentrados de proteína de diferentes orígenes vegetales.

Objetivo 2. Estudio de las propiedades funcionales. La utilización a nivel industrial de estos productos pasa por el conocimiento de su comportamiento respecto a su capacidad para retener agua o aceite y ser capaz de formar geles o emulsiones.

Objetivo 3. Estudio de sus propiedades biológicas. Se analizará la presencia de compuestos bioactivos y su actividad antioxidante, por su relevancia en las propiedades nutraceuticas de los productos.

III. INTRODUCCIÓN

1. NUEVOS RETOS DE LA ALIMENTACIÓN ACTUAL

1.1. Cambio climático

Los retos que plantea el cambio climático en el contexto de la seguridad alimentaria son complejos. Para afrontarlos será necesario un enfoque multidisciplinar que combinando estrategias de adaptación y esfuerzos de mitigación permita crear un sistema alimentario mundial más resiliente y sostenible.

Los patrones climáticos cambiantes, como el aumento de las temperaturas, la irregularidad de las precipitaciones y la mayor frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos, repercuten significativamente en la productividad agrícola (IPCC, 2019; Shukla, et al., 2019). Estas alteraciones de las condiciones climáticas pueden reducir el rendimiento de los cultivos, amenazando el suministro mundial de alimentos (Wheeler & Von Braun, 2013). Por otra parte, el sector agrícola se presenta como uno de los principales contribuyentes a las emisiones de gases de efecto invernadero (Ogle et al., 2014). Se estima que la producción, el procesamiento y el transporte de alimentos son responsables de aproximadamente una cuarta parte de las emisiones mundiales (Vermeulen et al., 2012).

Para hacer frente al cambio climático será necesario reducir las emisiones producidas por las prácticas agrícolas y, al mismo tiempo, aumentar la producción de alimentos (Foley et al., 2011). Uno de los componentes clave para afrontar este reto es la puesta en marcha de prácticas sostenibles que abarcan la agricultura de precisión, la reducción del uso de pesticidas y las estrategias de rotación de cultivos (Tilman et al., 2011). Para ello será necesaria la implementación de prácticas y tecnologías agrícolas innovadoras, como cultivos resistentes a la sequía (Lobell y Gourdji, 2012) y/o técnicas de agricultura de precisión (Godfray et al., 2010).

Al mismo tiempo la transición hacia dietas sostenibles, con menor huella ambiental, puede contribuir a mitigar el impacto del cambio climático en los sistemas alimentarios. La promoción de dietas sostenibles implica fomentar el consumo de alimentos de origen vegetal frente a las dietas intensivas en carne (Springmann et al., 2018). Los alimentos de origen vegetal ofrecen numerosas ventajas, sobre las dietas basadas en la carne, en términos de sostenibilidad medioambiental. Así, las dietas basadas en plantas tienen una huella de carbono significativamente menor en comparación con las dietas basadas en carne, debido a las

menores emisiones de gases de efecto invernadero (Poore y Nemecek, 2018). Por otro lado, la reducción del consumo de carne puede disminuir la deforestación y la destrucción de hábitats, a menudo asociadas a la expansión de la producción ganadera (Machovina et al., 2015). La deforestación a gran escala contribuye a aumentar los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera y amenaza la biodiversidad.

Desde el punto de vista del aprovechamiento de los recursos, las dietas basadas en plantas tienen el potencial de reducir la presión sobre el consumo de agua dulce (Mekonnen y Hoekstra, 2012) y requieren menos tierra y energía para producir una cantidad de alimento equivalente en calorías cuando se comparan con las dietas basadas en carne (Stehfest et al., 2009). Esta eficiencia es crucial en un contexto en el que existen unos recursos naturales limitados. Fomentar cambios en la dieta hacia opciones más vegetales es esencial para crear un sistema alimentario más resistente y respetuoso con el medio ambiente.

1.2. Incremento de la población mundial

La población mundial es más de tres veces mayor que a mediados del siglo XX, alcanzándose los 8000 millones a mediados de noviembre de 2022. Se estima que la población mundial aumentará casi 2000 millones de personas en los próximos 30 años, superándose los 10.000 millones en 2060 (Figura 1).

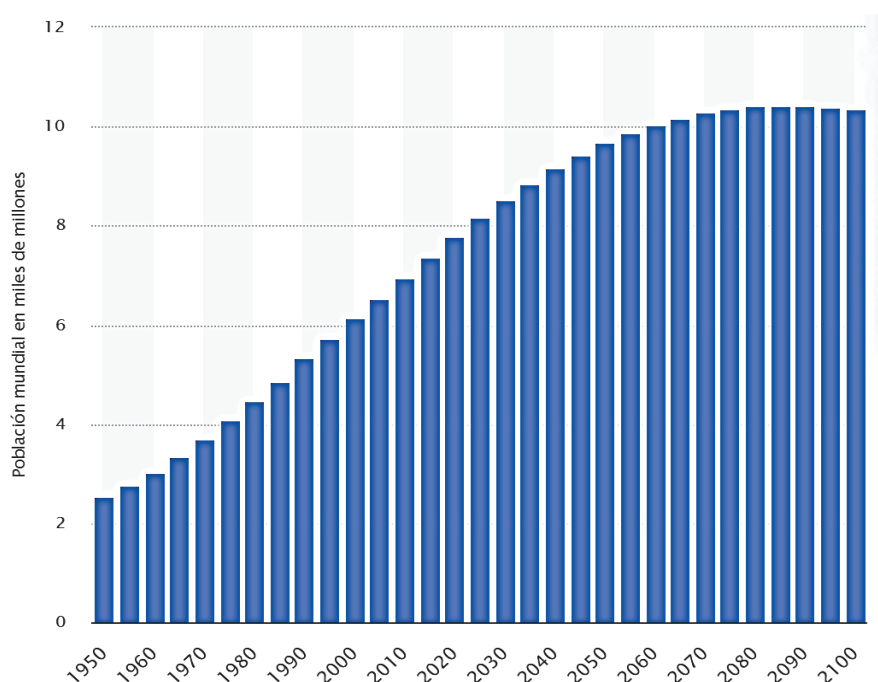


Figura 1. Evolución de la población mundial desde 1950 hasta 2100 (en miles de millones). Datos de las Naciones Unidas OWID (Statista, 2024)

Uno de los desafíos más apremiantes del crecimiento de la población es el impacto ambiental. El aumento en la demanda de alimentos, agua y energía incide sobre los recursos naturales y acelera el cambio climático (Tilman et al., 2011) y origina una enorme presión sobre los sistemas agrícolas que deben, en última instancia, producir los alimentos necesarios. En muchos casos, esto conduce a que se lleven a cabo prácticas insostenibles, a la sobreexplotación de los recursos naturales, la deforestación y la contaminación medioambiental. Todos ellos son problemas cada vez más graves que deben abordarse para garantizar la sostenibilidad del planeta (Foley et al., 2011).

Por un lado, es fundamental hacer hincapié en las prácticas agrícolas sostenibles que conservan los recursos naturales y reducen el impacto ambiental (Godfray et al., 2010). Por otro lado, la reducción del desperdicio de alimentos y la transición hacia dietas más basadas en plantas pueden ayudar a aliviar la presión sobre los sistemas alimentarios mundiales (Springmann et al., 2018).

1.3. Intolerancias alimentarias

La prevalencia de intolerancias y alergias alimentarias parece estar aumentando en muchas partes del mundo (Prescott et al., 2013). Las razones de este aumento son complejas y probablemente impliquen una combinación de factores genéticos, ambientales y de estilo de vida. Los cambios en los hábitos dietéticos, la mayor exposición a alimentos procesados y las alteraciones en el microbiota intestinal se han sugerido como posibles factores contribuyentes (Caminero y Verdu, 2019).

Las intolerancias y las alergias alimentarias son dos fenómenos distintos pero relacionados que pueden tener un impacto significativo en la salud y el bienestar de una persona. Estas afecciones se deben a reacciones adversas del organismo a componentes específicos presentes en diversos alimentos, y comprender sus diferencias e implicaciones es crucial para gestionar la elección de una dieta saludable.

Las intolerancias alimentarias, como la intolerancia a la lactosa y la sensibilidad al gluten no celíaca, se producen cuando el sistema digestivo tiene dificultades para procesar determinados componentes de los alimentos. La intolerancia a la lactosa, por ejemplo, se caracteriza por la incapacidad del cuerpo para digerir la lactosa, el azúcar que se encuentra en la leche y los productos lácteos, debido a niveles insuficientes de la enzima lactasa (Misselwitz et al., 2019). Esto provoca síntomas gastrointestinales como hinchazón, diarrea y malestar abdominal. La

sensibilidad al gluten no celíaca, por otro lado, implica reacciones adversas al gluten, una proteína presente en el trigo, la cebada y el centeno, pero sin la respuesta autoinmune observada en la enfermedad celíaca (Catassi et al., 2013). Los síntomas pueden incluir molestias digestivas, dolor de cabeza y fatiga.

Por otro lado, las alergias alimentarias implican la respuesta del sistema inmunitario a proteínas específicas de los alimentos. Una de las alergias alimentarias más conocidas es la alergia al cacahuete, que puede desencadenar reacciones graves como la anafilaxia tras la exposición al cacahuete (Sicherer et al., 2017). Estas reacciones alérgicas se producen cuando el sistema inmunitario identifica erróneamente ciertas proteínas como invasores nocivos y libera sustancias químicas como las histaminas para combatirlas. Los síntomas pueden ir desde un picor leve y urticaria hasta una dificultad respiratoria potencialmente mortal.

Tanto las intolerancias como las alergias alimentarias afectan considerablemente a la calidad de vida de las personas. El tratamiento de estas afecciones suele requerir restricciones dietéticas y un control cuidadoso de los ingredientes alimentarios. Es fundamental que las personas con intolerancias y alergias alimentarias estén atentas a las etiquetas de los ingredientes, los riesgos de contaminación cruzada y las posibles fuentes ocultas de alérgenos (Muraro et al., 2014). El diagnóstico preciso es crucial para las personas con intolerancias y alergias alimentarias. Los profesionales médicos suelen utilizar una combinación de antecedentes del paciente, exámenes físicos, pruebas cutáneas, análisis de sangre y, en algunos casos, pruebas orales de alimentos para determinar la afección específica (Sicherer & Sampson, 2014). Una vez diagnosticadas, las intolerancias y alergias alimentarias suelen tratarse con modificaciones de la dieta, como la eliminación de alimentos desencadenantes específicos y la búsqueda de sustitutos adecuados.

1.4. Calidad y trazabilidad: etiquetas transparentes

A lo largo de los dos últimos siglos, la "calidad alimentaria" (CA) ha evolucionado a la par que los avances científicos y tecnológicos en nutrición y alimentación. El trabajo pionero de Pasteur hizo hincapié en la importancia de la seguridad microbiológica, pero no fue hasta después de la Segunda Guerra Mundial cuando la Organización Mundial de la Salud (OMS) empezó a destacar la importancia de la salud integral.

Los consumidores son cada vez más conscientes de cómo influyen los alimentos en su bienestar y estilo de vida, por lo que la calidad alimentaria va más allá de las medidas básicas

de seguridad. Este cambio ha propiciado un delicado equilibrio entre la satisfacción, las necesidades dietéticas y las preocupaciones por la seguridad alimentaria.

Un alimento de calidad debe tener varias características complejas como el aspecto físico, composicional y microbiano, las modificaciones debidas a los procesos tecnológicos o al almacenamiento, el valor nutricional y las normas de seguridad (Trimigno et al., 2015).

La expansión del mercado mundial ha llevado a una redefinición de la calidad de los alimentos, que ahora se denomina "calidad total de los alimentos" (TQF, por sus siglas en inglés). Este concepto engloba varios elementos cruciales (Giusti, et al., 2008; Schreiner et al., 2013):

- Características sensoriales y organolépticas: Incluyen aspectos como el color, la textura, la jugosidad, el sabor, la astringencia y el aroma.
- Consideraciones de seguridad: Abarcan la presencia de compuestos nocivos, contaminantes, micotoxinas, agentes patógenos y microorganismos nocivos.
- Valor nutritivo: Abarca los niveles calóricos, la composición proteínica, los aminoácidos esenciales, las vitaminas, los minerales, los antioxidantes, la digestibilidad y la biodisponibilidad.
- Propiedades funcionales: Evaluación de la facilidad de uso del ingrediente en el procesamiento y la transformación industrial.
- Fiabilidad y resistencia: Capacidad de resistir una degradación rápida, teniendo en cuenta factores como las condiciones de transformación, almacenamiento, transporte y conservación.
- Beneficios para la salud: Reconocimiento de los posibles efectos positivos sobre la salud del consumidor de elementos como probióticos, prebióticos, flavonoides, carotenoides, vitaminas y péptidos bioactivos.
- Influencias psicológicas: Incorporan la comodidad, el precio, la facilidad de uso, la novedad y los efectos psicoactivos, que influyen en la atracción, la aversión y el deseo de compra

La calidad está fuertemente asociada con el tamaño, la forma, el color, la ausencia de defectos y la firmeza, que sirven como factores de primer nivel en las decisiones de compra (Kyriacou, & Rouphael, 2018).

Las empresas agroalimentarias de forma paralela han desarrollado, implementado y mantenido además diversos sistemas de trazabilidad con el fin de gestionar el suministro de alimentos, facilitar el seguimiento de la seguridad y calidad de los alimentos, así como diferenciar y comercializar alimentos con atributos de calidad sutiles o indetectables (Smith et al., 2005). Además, las estrategias de trazabilidad diseñadas garantizan una comunicación rápida y el intercambio de información precisa y completa sobre los productos, mejorando así la eficiencia de toda la cadena de suministro de alimentos (Hobbs, 2006; Lehtinen, 2011).

Olsen y Borit (2013) llevaron a cabo un análisis en profundidad de la verdadera definición de trazabilidad y elaboraron una recopilación de las definiciones que habían sido utilizadas hasta el momento. Su conclusión estableció que la trazabilidad puede ser definida como "la capacidad de acceder a cualquier o toda la información relativa a lo que se está considerando, a lo largo de todo su ciclo de vida, por medio de identificaciones registradas". En los últimos años ha aumentado la importancia social de la gestión de la trazabilidad en las cadenas de suministro de alimentos (CS alimentarias) debido a las repercusiones que tienen las alteraciones de la seguridad alimentaria en las empresas y los consumidores (Meuwissen et al., 2003). Como se muestra en la Figura 2, que ilustra el marco general de un sistema de trazabilidad alimentaria utilizando como ejemplo, la trazabilidad se garantiza a lo largo de toda la cadena mediante un sistema de seguridad alimentaria y garantía de calidad.

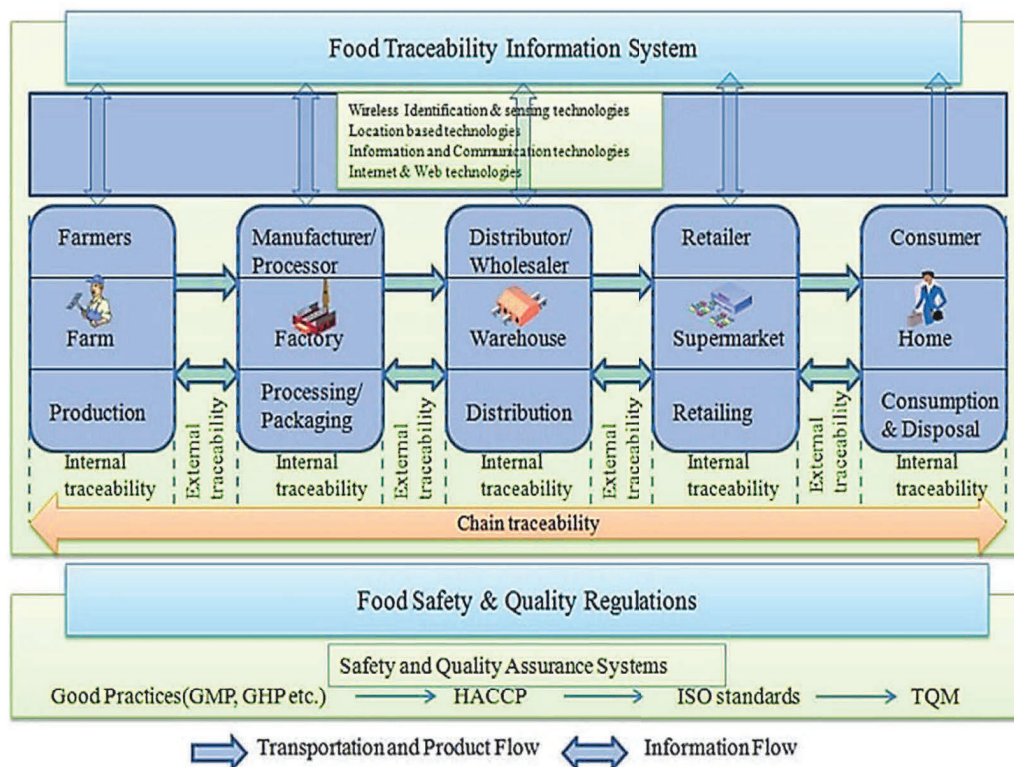


Figura 2. Marco conceptual de un sistema de trazabilidad alimentaria (Aung y Chang, 2014).

Un objetivo clave de la trazabilidad es proteger a los consumidores al eliminar los alimentos no aptos para consumo y facilitar la búsqueda de las causas subyacentes de los problemas de seguridad alimentaria (Badia-Melis et al., 2015).

Existen numerosos proyectos e iniciativas de investigación y desarrollo técnico (IDT) dedicados a garantizar la trazabilidad de los productos alimentarios a nivel nacional e internacional (Olsen & Borit, 2018). La trazabilidad se ha incorporado a la legislación alimentaria a nivel mundial (Van Rijswijk, & Frewer, 2012). En Europa, el Reglamento europeo 178/2002, aprobado el 1 de enero de 2005, la Unión Europea impuso la trazabilidad en las empresas agroalimentarias. En concreto, el artículo 18 de este reglamento impone la trazabilidad administrativa para todos los productos alimentarios dentro de la UE, sin especificar métodos concretos para conseguirla. Según el artículo 18 del Reglamento 178/2002, los miembros de la cadena alimentaria, incluidos productores, transformadores y minoristas, deben implantar sistemas de trazabilidad que estarán sujetos a auditorías (Francois et al., 2020). Tras la publicación de este reglamento, las partes interesadas de los agentes de la cadena alimentaria creen que la trazabilidad puede aumentar la transparencia de las cadenas alimentarias y proporcionar a los consumidores información esencial, aumentando así su confianza.

En este contexto, el etiquetado de los productos ha sido objeto de gran atención en los últimos tiempos, tanto desde el punto de vista normativo como para proporcionar información específica sobre los productos y reducir la incertidumbre sobre la calidad a la que se enfrentan los consumidores (Verbeke & Rossen, 2009).

Los gobiernos están estableciendo directrices para ayudar a los consumidores a tomar estas decisiones. En Estados Unidos, la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA-Food and Drug Administration) y el Departamento de Agricultura (USDA) exigen elementos específicos para el etiquetado de los alimentos, como la declaración de identidad, el contenido neto, la lista de ingredientes, las advertencias sobre alérgenos, el panel de información nutricional, el país de origen y la información de contacto de la empresa, como el nombre y el lugar (Corallo et al., 2021). En Europa el Reglamento 1169/2011 (desarrollado por sucesivos Reglamentos 1155/2013; 1337/2013, 78/2014, 2018/775) recoge los ítems que hay que mencionar en la etiqueta. Además, los criterios de etiquetado de los alimentos también están influidos por organizaciones no gubernamentales como el Codex Alimentarius y la Organización de las Naciones Unidas (FAO) para la Agricultura y la Alimentación. Estas organizaciones se encargan de regular los alimentos preenvasados, realizar declaraciones

nutricionales y de propiedades saludables, y elaborar directrices para el etiquetado nutricional (Corallo et al., 2021).

Además de cumplir las directrices de etiquetado, las empresas alimentarias también incorporan detalles adicionales para establecer una conexión eficaz con los consumidores. El envasado es un medio eficaz para que las empresas alimentarias impulsen las ventas, como medio por el que los consumidores adquieren información sobre el producto (Tonkin et al., 2015). Al incluir el etiquetado en el envase de los alimentos, los consumidores reciben información precisa sobre el producto, satisfaciendo sus necesidades cognitivas explícitas y subyacentes (Hoogland et al; 2007) que les ayuden a tomar decisiones alimentarias sostenibles y hacer elecciones responsables. Es más, las declaraciones de las etiquetas pueden influir en las preferencias alimentarias de los consumidores (Koos, 2011).

Garantizar la veracidad de la etiqueta es esencial, ya que es el principal punto de interacción entre los consumidores y las empresas alimentarias (Tonkin et al., 2015). Existen numerosos factores que contribuyen a la dificultad de comprensión de las etiquetas, como las condiciones de compra, las implicaciones semánticas de los nombres de los productos, la legibilidad de las etiquetas, las asociaciones de color, las influencias culturales, las reacciones emocionales y la variedad de formatos de las etiquetas, que dificultan la comparación de los productos (Larceneux et al., 2012). Las etiquetas de los alimentos contienen mucha información potencialmente inútil que puede complicar el proceso de toma de decisiones de los consumidores. Comprender la información de las etiquetas es crucial para elegir con conocimiento de causa y alinear los valores personales con estas elecciones (Corallo et al., 2021). Por ejemplo, el espacio limitado de las etiquetas exige una presentación selectiva de la información. Por otro lado, la tecnología permite que las aplicaciones móviles ofrezcan contenidos completos y simplificados, lo que subraya la necesidad de un diseño eficiente. (Latino et al., 2022).

Las etiquetas transparentes se han convertido en herramientas indispensables para garantizar la calidad y la trazabilidad en la industria alimentaria (Smith et al., 2005). Capacitan a los consumidores para tomar decisiones informadas (Haroon et al., 2019), combatiendo el fraude alimentario (Sammur et al., 2021) y promoviendo la sostenibilidad (Clark & Harley, 2019). Si bien la implementación de sistemas de etiquetado transparente conlleva desafíos (Hallström et al., 2018), los beneficios, incluidos el aumento de la confianza del consumidor y la mejora de la gestión de la cadena de suministro (Johnsen et al., 2018), superan con creces los obstáculos. A medida que siga creciendo la demanda de transparencia y sostenibilidad por parte de los

consumidores, las etiquetas transparentes desempeñarán un papel cada vez más relevante en la configuración del futuro de la industria alimentaria (Ammann et al., 2023).

En la implantación de sistemas de etiquetado transparente se emplean diferentes tecnologías y prácticas, como pueden ser:

❖ Códigos de respuesta rápida y códigos de barras

Los códigos de respuesta rápida (QR) y los códigos de barras se utilizan mucho para el etiquetado transparente. Estos códigos bidimensionales pueden almacenar amplia información sobre un producto, como números de lote, fechas de caducidad y detalles sobre su origen. Los consumidores pueden escanear fácilmente estos códigos con sus teléfonos inteligentes para acceder a información en tiempo real sobre el recorrido del producto (Qian et al., 2021).

❖ Identificación por radiofrecuencia

Las etiquetas de identificación por radiofrecuencia (RFID) utilizan campos electromagnéticos para transmitir datos a un lector. La tecnología RFID permite el seguimiento en tiempo real de los productos en la cadena de suministro, ofreciendo datos precisos sobre su ubicación y ayudando a prevenir pérdidas y robos. Además, la RFID puede mejorar la gestión del inventario y reducir los residuos optimizando la vida útil y reduciendo las roturas de stock (Ge et al., 2019).

❖ Programas de certificación

Los programas de certificación, como los de comercio justo, productos ecológicos y verificación del proyecto Non-GMO, son componentes esenciales del etiquetado transparente. Estos programas establecen normas y procesos de auditoría para garantizar que los productos cumplen criterios específicos de calidad y sostenibilidad. Los logotipos de certificación en las etiquetas señalan la adhesión a estas normas, infundiendo confianza en los consumidores (Hatanaka et al., 2005).

❖ Blockchain

La tecnología blockchain (BCT) ha ganado atención por su potencial para revolucionar el etiquetado transparente, al registrar cada paso de la cadena de suministro en una blockchain, todas las partes interesadas pueden acceder a un registro transparente lo que mejora la confianza y la trazabilidad (Wang et al., 2019). Por lo tanto, en este ámbito, la tecnología Blockchain destaca como una herramienta crucial que mejora la gestión de la cadena de suministro al facilitar una mayor trazabilidad de los productos. Esto es posible gracias al

intercambio transparente de datos transaccionales entre los participantes en la cadena de suministro, el almacenamiento seguro de la información y el mantenimiento de una base de datos unificada, todo ello sin necesidad de un intermediario (Behnke et al., 2020). La tecnología BCT está reconocida como un avance tecnológico significativo que está teniendo un profundo impacto en el panorama comercial cuyos beneficios abarcan una amplia gama de mejoras técnicas, sociales y económicas. Es, por tanto, una tecnología potencialmente revolucionaria y adaptable, que promueve una mayor fiabilidad en los compromisos entre empresas (Yli-Huoma et al., 2016). Si bien la implantación de sistemas de etiquetado transparente en la industria alimentaria ofrece numerosas ventajas, también presenta retos que es necesario abordar:

- **Exactitud de los datos:** Garantizar la exactitud de la información de las etiquetas transparentes puede ser un reto, ya que los errores o inexactitudes pueden erosionar la confianza del consumidor.
- **Coste y aplicación:** La implantación de tecnologías de etiquetado transparente puede resultar costosa, sobre todo para los pequeños productores.
- **Cuestiones de privacidad:** Recopilar y compartir datos detallados de la cadena de suministro puede plantear problemas de privacidad, lo que requiere prácticas cuidadosas de gestión de datos.
- **Compatibilidad tecnológica:** Garantizar la compatibilidad entre las diferentes tecnologías y sistemas de etiquetado transparente a lo largo de la cadena de suministro puede resultar complejo.

1.5. Nuevos consumidores

En los últimos años se ha producido un aumento significativo del número de personas que adoptan distintos patrones dietéticos, como el veganismo, el vegetarianismo y el flexitarianismo (Fox & Ward, 2008). Estas opciones dietéticas reflejan una mayor concienciación mundial sobre la salud, la sostenibilidad y el consumo ético. La decisión de adherirse a estos estilos de vida dietéticos alternativos está impulsada por diversos factores, como consideraciones éticas, preocupaciones medioambientales, conciencia sanitaria y el deseo de contribuir a la defensa del bienestar animal (Rosenfeld & Burrow, 2017a; Lea & Worsley, 2001; Dagevos & Voordouw, 2013). Como resultado, las empresas se ven obligadas

a adaptar su oferta de productos y sus prácticas operativas para satisfacer las necesidades y preferencias específicas de estos grupos de consumidores (Verbeke, 2009).

De acuerdo con la reciente revisión realizada por Alcorta et al. (2021), el 40% de las personas entrevistadas en una encuesta realizada en el 2019 están intentando reducir su consumo de proteínas animales y el 10% evitan por completo la carne roja. Esto ha llevado a que el número de consumidores que realizan una alimentación a base de vegetales también haya aumentado. Así en Reino Unido el 21% de la población se considera flexitariana y en España este grupo poblacional ha aumentado un 25% en dos años. En Italia la población que no consume carne ha aumentado drásticamente en la última década y en Alemania los vegetarianos han pasado del 1% al 7% (2005-2018).

1.5.1. Vegetarianos

El vegetarianismo se define por la decisión deliberada de no consumir carne como identidad social (Nezlek et al., 2020). En general, los vegetarianos son personas que no consumen productos cárnicos de origen animal en su dieta y consumen productos de origen vegetal como soja, cereales integrales, frutos secos y legumbres. Sin embargo, existe una gran variedad de patrones de consumo de alimentos vegetarianos, dependiendo de si los vegetarianos excluyen todos o algunos productos de origen animal (Edwards, 2012). Así, los lactovegetarianos son vegetarianos que consumen productos lácteos, huevos o ambos (Juan et al., 2015).

Los vegetarianos creen que la elección de alimentos es una forma de expresar sus valores y el concepto que tienen de sí mismos. Esto afecta a algo más que a las elecciones alimentarias, ya que repercute en la identidad personal y social, los valores, las actitudes, las creencias y el bienestar general. Varios estudios han indicado que los vegetarianos tienden a mostrar una mentalidad pro-social y tienden a ser políticamente liberales (Rosenfeld & Burrow, 2017b). La decisión de abstenerse del consumo de animales suele estar arraigada en preocupaciones éticas, como el bienestar animal y las implicaciones morales de las prácticas agrícolas industriales (Loughnan et al., 2010). El impacto medioambiental de la agricultura y la producción animal es una motivación importante, ya que son los principales contribuyentes a las emisiones de gases de efecto invernadero y a la deforestación (Eshel & Martin, 2006).

Así pues, las consideraciones éticas y medioambientales se han convertido en factores clave que impulsan la adopción de dietas basadas en plantas y la defensa de prácticas sostenibles de producción de alimentos, lo que refleja una creciente conciencia mundial de la interconexión

entre las opciones dietéticas, la responsabilidad ética y la sostenibilidad medioambiental. A diferencia de la dieta occidental típica, los patrones dietéticos basados en plantas contienen menos grasa total y ácidos grasos saturados (AGS), así como una gran cantidad de fibra, vitaminas antioxidantes y fitonutrientes, al tiempo que proporcionan ácidos grasos insaturados esenciales (tanto n-3 como n-6) (Harland & Garton, 2016). Tanto las directrices dietéticas internacionales como las nacionales, incluidas las del Fondo Mundial para la Investigación del Cáncer (WCRF), la Asociación Dietética Americana (ADA), (Craig & Mangels, 2009) y la Guía Eatwell del Reino Unido (PHE 2016) están alineadas con estos patrones dietéticos. Por esta razón, muchas personas adoptan una dieta vegetariana al asociarlas con un descenso del riesgo de enfermedad cardiovascular (ECV) mediante la reducción del índice de masa corporal (IMC), la mejora de los perfiles de colesterol y la disminución de la presión arterial sistólica (Fischer et al., 2020). Así mismo, los vegetarianos tienden a consumir más micronutrientes, como tiamina, folato, vitamina C, caroteno, potasio y vitamina E, que la población general (Haddad & Tanzman 2003; Davey et al., 2003), lo que sugiere que estas dietas podrían ayudar a paliar las carencias de micronutrientes observadas en algunos grupos de población (Mensink et al., 2003). Sin embargo, es fundamental interpretar correctamente estos datos y comprender que no todas las dietas vegetarianas son iguales (Fischer et al., 2020). En un estudio realizado por Satija et al. (2017) se evaluaron 210.298 individuos que seguían dietas vegetarianas, divididos en diez grupos en función del equilibrio entre alimentos saludables (como cereales integrales, frutas/verduras, frutos secos/legumbres y aceites) y opciones menos saludables (como zumos/bebidas azucaradas, cereales refinados, patatas y dulces) en sus dietas. Los resultados revelaron que los que seguían una dieta vegetariana más saludable tenían un riesgo un 25% menor de desarrollar enfermedad coronaria, mientras que los que seguían dietas vegetarianas menos saludables tenían un riesgo un 32% mayor de enfermedad coronaria. Otros estudios han expresado, así mismo, su preocupación por la adecuación de los micronutrientes contenidos en las dietas basadas en plantas, especialmente en lo que respecta al zinc, el hierro, la vitamina B12, la vitamina D y el calcio (Pawlak, 2016).

1.5.2. Veganos

Los consumidores veganos, que excluyen todos los productos animales de la dieta, suelen basar sus elecciones dietéticas igualmente en consideraciones éticas, sanitarias y medioambientales. Desde un punto de vista ético, el veganismo se alinea con los principios del bienestar animal y el rechazo a la explotación de los animales para el consumo humano, reflejando una postura ética más amplia contra la mercantilización de los seres vivos (Joy,

2010). Además, la preocupación por el medio ambiente es también una motivación para muchos veganos. La producción de alimentos de origen animal está vinculada a la deforestación, la contaminación del agua y las emisiones sustanciales de gases de efecto invernadero, lo que contribuye a la degradación del medio ambiente y exacerba el cambio climático (Scarborough et al., 2014; Springmann et al., 2018). Desde el punto de vista de la salud, algunos eligen el veganismo para promover una mejor salud cardiovascular, reducir el riesgo de enfermedades crónicas y controlar el peso (Dinu et al., 2017; Le & Sabaté, 2014). La convergencia de estas consideraciones éticas, sanitarias y medioambientales subraya la justificación multifacética que subyace en la adopción del veganismo como una elección consciente de estilo de vida tal y como pone de manifiesto el estudio de Silva Souza et al., (2020) en el que se refleja el peso de cada una de estas tres razones (Figura 3).

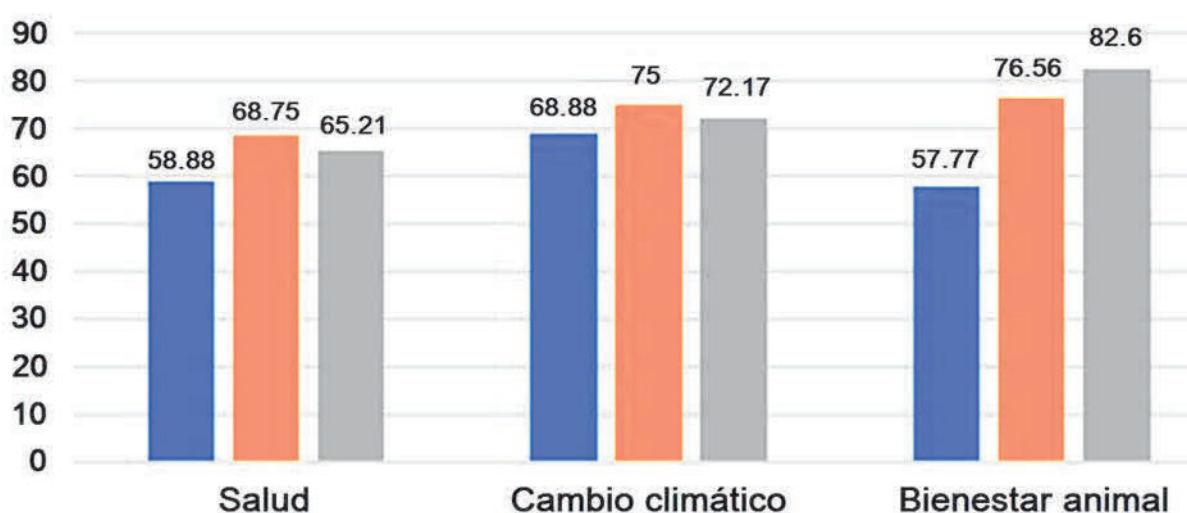


Figura 3. Datos del estudio realizado por Silva Souza et al. (2020) que recoge las razones que tendrían más importancia para cambiar la dieta en persona no veganos que no se planteaban hacerse veganos (azul), no veganos que se planteaban ser veganos (naranja) y veganos (gris).

El consumo vegano ofrece diversos beneficios para la salud. Una dieta vegana equilibrada suele tener un alto contenido en frutas, verduras, cereales integrales, legumbres y frutos secos, que aportan abundante fibra, vitaminas, minerales y antioxidantes (Dinu et al., 2017). Los veganos tienden a mantener índices de masa corporal (IMC) más bajos y menores riesgos de obesidad, lo que está relacionado con una menor probabilidad de padecer diversas enfermedades crónicas (Satija et al., 2017). En segundo lugar, las dietas veganas tienden a ser más bajas en grasas saturadas y colesterol, lo que se traduce en mejores perfiles lipídicos, menor riesgo de enfermedades cardíacas y presión arterial más baja (Dinu et al., 2017; Turner-McGrievy et al., 2015). Además, los veganos suelen mostrar un mejor control del

azúcar en sangre, lo que los hace menos susceptibles a la diabetes tipo 2 (Tonstad et al., 2009). Sin embargo, es importante ser consciente de los posibles problemas nutricionales de las dietas veganas. Una cuestión clave es el riesgo de deficiencias de nutrientes, en particular de vitamina B12, vitamina D, calcio, hierro y ácidos grasos n-3 (Mangels, 2014). Por ello, los veganos deben planificar cuidadosamente su dieta o considerar la suplementación para satisfacer estos requisitos. Además, hay que prestar atención a la ingesta de proteínas para garantizar una cantidad adecuada de aminoácidos esenciales (Craig & Mangels, 2009). Aunque una dieta vegana ofrece numerosos beneficios para la salud, es crucial mantener un enfoque nutricionalmente equilibrado y bien planificado para aprovechar estas ventajas.

1.5.3. Flexitarianos

Los consumidores flexitarianos, a menudo denominados "vegetarianos ocasionales", representan una tendencia creciente en las elecciones dietéticas. Estas personas priorizan la flexibilidad en sus preferencias alimentarias, logrando un equilibrio entre una dieta predominantemente vegetal y el consumo ocasional de productos de origen animal (Derbyshire, 2017). Estos consumidores no tienen un fuerte apego a la carne ni pretenden abstenerse totalmente de ella (Dagevos, 2021), en su dieta incorporan una variedad de alimentos de origen vegetal, como frutas, verduras, legumbres y cereales integrales (American Dietetic Association, 2009; Randers et al., 2021). El flexitarianismo se conceptualizaba como un "punto intermedio" entre omnívoros y veganos (Rothgerber, 2014), o una fase de transición entre ambos. Sin embargo, en el momento actual se entiende el flexitarianismo como un grupo dietético único, mucho más diverso en sus motivaciones y pautas de consumo que los omnívoros sin restricciones y los subgrupos de vegetarianos.

La característica definitoria del enfoque flexitariano es su adaptabilidad y la ausencia de reglas dietéticas estrictas, lo que permite a los individuos alinear sus hábitos alimenticios con sus preferencias personales y consideraciones éticas (Voinea et al., 2020). No se trata de una adhesión estricta al vegetarianismo o al veganismo, sino más bien de un esfuerzo consciente para reducir el consumo de carne y productos de origen animal. Este enfoque dietético está ganando adeptos a medida que las personas toman conciencia del impacto medioambiental y las implicaciones para la salud asociadas al consumo excesivo de carne (Willett et al., 2019), siendo una opción pragmática e inclusiva para aquellos que buscan una forma de comer más equilibrada y sostenible (Garnett et al., 2019).

En cuanto a las motivaciones, los flexitarianos priorizan la salud y la sostenibilidad, reconociendo los beneficios potenciales de un menor consumo de carne para el bienestar

personal y el medio ambiente (Borgmeier & Westenhoefer, 2009). Un estudio realizado por Sheen et al. (2023) ha puesto de manifiesto que hay consumidores cuya motivación principal son razones relacionadas con la salud, para otros es la motivación aventurera en sus planteamientos sobre la elección de alimentos, y habría un tercer grupo con motivaciones flexitarianas relacionadas con las preocupaciones sociales y morales hacia el consumo de carne animal.

1.6. Nuevos alimentos

En la industria alimentaria contemporánea, la noción de "nuevos alimentos" engloba una serie de innovaciones y alternativas culinarias en evolución que responden a las cambiantes preferencias dietéticas y a las preocupaciones por la sostenibilidad (Guiné et al., 2021). Los nuevos alimentos reflejan un cambio hacia alternativas basadas en plantas, nuevas fuentes de proteínas y métodos de producción sostenibles (Laestadius et al., 2019), que responden a la creciente demanda de opciones dietéticas que hemos tratado en el apartado anterior. Esto incluye el desarrollo de carnes cultivadas en laboratorio, sustitutos de la carne basados en plantas y fuentes de proteínas alternativas como algas e insectos (Mateti et al., 2022; Broucke et al., 2023). A medida que las preferencias de los consumidores continúan evolucionando, el concepto de nuevos alimentos sigue siendo parte integral de la exploración y el desarrollo de enfoques sostenibles, éticos y tecnológicamente avanzados para la producción y el consumo de alimentos (Tuorila & Hartmann, 2020). Actualmente, existen diversas alternativas para la carne y la leche que son aceptadas y se están desarrollando sustitutos para el queso, los huevos y el pescado (Alcorta et al., 2021).

El término "alimentación basada en productos vegetales" tiene un alcance amplio. En primer lugar, hace hincapié en el consumo de alimentos de origen vegetal como frutas, verduras, frutos secos, semillas, cereales integrales, legumbres y aceite (Fehér et al., 2020). En este sentido, la adopción de dietas basadas en vegetales está aumentando en los países occidentales (Giacalone et al., 2022). A pesar de los conceptos erróneos comunes, estas opciones dietéticas abarcan distintos patrones y filosofías de alimentación tal y como ya se ha señalado (Hargreaves et al., 2023) si bien es cierto que, debido a que diversos estudios destacan la elevada huella medioambiental de la carne de rumiantes en contraste con los cereales, las frutas y las verduras (Fresán et al., 2019), este parece ser un motivo común para este patrón alimentario.

En segundo lugar, las innovaciones en tecnología alimentaria han llevado a la creación de alternativas vegetales que imitan fielmente el sabor, la textura y los perfiles nutricionales de los alimentos de origen animal. Estos nuevos productos están transformando la forma en que percibimos las dietas basadas en plantas, haciéndolas más accesibles y atractivas para un público más amplio (Bryant & Barnett, 2020). Dentro de estos nuevos alimentos nos encontramos con sustitutos de la carne y de la leche y productos lácteos como alimentos más importantes pero también otras alternativas vegetales afectan a los huevos, ejemplificadas por innovaciones como Just Egg y Follow Your Heart Vegan Egg, con sustitutos líquidos del huevo. En cuanto al pescado y los mariscos, entidades como Good Catch y New Wave Foods son pioneras en alternativas al atún y las gambas, para satisfacer las necesidades de las personas que buscan los sabores y texturas del marisco al tiempo que optan por una opción más sostenible y libre de crueldad (Bakr et al., 2023; Grossmann et al., 2021 ; Ayseli et al., 2023).

En lo que al mercado se refiere, es la leche y sus derivados los que representan el mayor porcentaje de las ventas de este tipo de productos (Figura 4), seguido de la carne y muy lejos de otros productos como los aderezos de ensalada y los huevos. Sin embargo, cabe destacar que las ventas de alimentos de origen vegetal en diversas categorías aumentaron un 29 % entre 2017 y 2019 (Crosser, 2020).

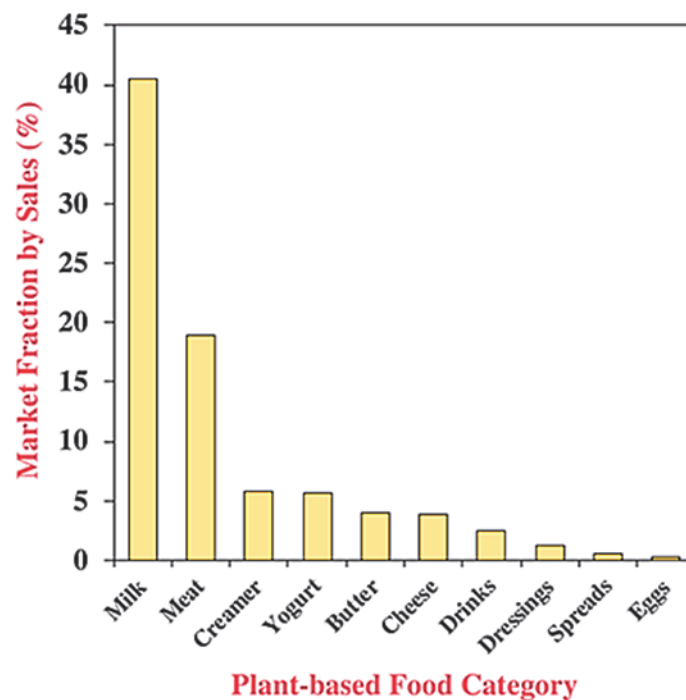


Figura 4. Porcentaje del total del mercado de las ventas minoristas de alimentos vegetales por categoría. Imagen de Crosser (2020).

1.6.1. Alimentos alternativos a la carne

Los alimentos alternativos a la carne han ganado mucha atención y popularidad en los últimos años debido, tal y como ya se ha señalado, a la creciente concienciación sobre los problemas medioambientales, sanitarios y éticos asociados a la producción y el consumo de carne tradicional (Stubbs et al., 2018; Liu et al., 2023). Estos productos se elaboran a partir de fuentes proteicas que no son de origen animal, pero que se asemejan a la carne en sus atributos sensoriales (Ismail et al., 2020). Productos como el tofu, el tempeh y el seitán, se han convertido en ingredientes básicos en muchos hogares, ofreciendo alternativas viables a las proteínas de origen animal (Mistry et al., 2020; McClements & Grossmann, 2022). Los investigadores han realizado numerosos estudios que destacan los beneficios de estas alternativas (Polawska et al., 2013; Onwezen et al., 2021). Los estudios de Dinu et al. (2017), Wang et al. (2022) y Öncü Öner (2023) destacaron las posibles ventajas para la salud de las proteínas de origen vegetal, que incluyen niveles más bajos de grasas saturadas y colesterol en comparación con la carne, lo que las convierte en opciones cardiosaludables. Además, la producción de estas alternativas a menudo genera menos emisiones de gases de efecto invernadero y requiere menos tierra y agua, como demuestra la investigación de Poore y Nemecek (2018), abordando así las preocupaciones relacionadas con el cambio climático y la sostenibilidad de los recursos.

Las proteínas, los polisacáridos y los lípidos de origen vegetal son los componentes principales de los análogos cárnicos de origen vegetal. Además, estas alternativas contienen una variedad de elementos funcionales adicionales, como colorantes, aromatizantes, minerales y vitaminas y también conservantes (Sha & Xiong, 2020). Las características fisicoquímicas y sensoriales del producto final vienen determinadas por el tipo y la concentración de estos ingredientes, así como por los métodos de procesamiento utilizados para elaborarlos (Yuliarti et al., 2021; McClements & Grossmann, 2021a).

Entre los alimentos de origen vegetal presentes en el mercado se encuentran los sustitutos de la carne de origen vegetal, cuyos ingredientes principales son la soja, el gluten de trigo y los hongos. Entre estos ingredientes, la soja, apreciada por su riqueza nutricional, se utiliza ampliamente en la elaboración de productos como el tofu y las proteínas vegetales texturizadas, generalmente procesados mediante técnicas de extrusión (Kumar et al., 2017). El procesamiento de los análogos cárnicos a partir de las proteínas vegetales texturizadas, es la extrusión, un proceso que confiere adaptabilidad a la hora de producir un amplio espectro de morfologías y dimensiones (Qin et al., 2022). Junto a la soja, cada vez es mayor el número de

proteínas utilizadas entre las que se encuentran las de leguminosas, como guisantes, lentejas, altramuces o garbanzos o las proteínas de semillas oleaginosas como la colza y la canola, capaces de producir texturas similares a la carne convencional cuando se calientan (Kyriakopoulou et al., 2019).

Además de los análogos vegetales, se están explorando enfoques innovadores como la carne cultivada o cultivada en laboratorio (Post et al., 2020), la cual ofrece una vía prometedora para reducir el impacto ambiental negativo de la producción de carne convencional. Más allá de las consideraciones medioambientales y sanitarias, los aspectos éticos de las alternativas a la carne también son importantes (Henchion et al., 2022). Sin embargo, es cierto que la elección de alternativas a la carne elaboradas a partir de soja, legumbres y cereales es excelente para animar a los consumidores a adoptar dietas basadas en plantas. En comparación con alternativas menos conocidas, es menos probable que estas opciones evoquen sentimientos de escepticismo y aversión. Por otro lado, la producción de carne a partir de células en un medio de cultivo se percibe ampliamente como antinatural, lo que suscita preocupación por la seguridad entre los consumidores (Verbeke et al., 2015; Siegrist et al., 2018; Tarrega, et al., 2020).

En cuanto a la normativa sobre etiquetado, existe ambigüedad a la hora de etiquetar las alternativas cárnicas vegetales con términos tradicionales, debido a la ausencia de denominaciones legales específicas. Los reglamentos no proporcionan versiones lingüísticas distintas para términos como salchicha o filete, lo que complica la creación de una lista completa de términos protegidos para productos cárnicos en la UE, excluyendo las opciones basadas en plantas (Carreno & Dolle, 2018). Hubo una propuesta reciente al Parlamento Europeo instando a que términos como "hamburguesa", "escalope", "salchicha" o "filete" se reserven exclusivamente para productos que contengan carne para evitar la confusión del consumidor con alternativas cárnicas de origen vegetal (Alcorta et al., 2021). Por el contrario, el etiquetado actual se ha revelado como útil y no confuso para los consumidores, ya que les ayuda a comprender el tipo de carne que imita el producto y sus propiedades sensoriales (Schouteten et al., 2016; Alcorta et al., 2021; Barone & Aschemann, 2022). Por último, cabe destacar que se prevé que el mercado mundial de alternativas a la carne de origen vegetal crezca de 1.600 millones de dólares en 2019 a 3.500 millones en 2026 (Alcorta et al., 2021). Esto estaría correlacionado con los resultados de otros estudios indican que las ventas de carne en Estados Unidos disminuyeron un 5% de 2015 a 2019 (Aschemann-Witzel et al., 2021).

1.6.2. Alimentos alternativos a los lácteos

La categoría de sustitutos de la leche y los productos lácteos se refiere a una variedad de productos diseñados para replicar o sustituir los productos lácteos tradicionales para las personas alérgicas a las proteínas lácteas, intolerantes a la lactosa o que optan por una dieta basada en plantas (Ramsing et al., 2023). Estos sustitutos se elaboran a partir de diversas fuentes vegetales, ofreciendo una amplia gama de sabores, texturas y perfiles nutricionales (Paul et al., 2020). El reto de los sucedáneos de la leche es ofrecer una experiencia sensorial agradable manteniendo su valor nutricional. Las vitaminas y los aminoácidos ayudan a cubrir las carencias nutricionales, mientras que la fermentación reduce los aromas de la materia vegetal e introduce notas volátiles deseables para mejorar la percepción sensorial (Tangyu et al., 2019). Estos sustitutos de origen vegetal son extractos hidrosolubles derivados de legumbres (como la soja y el garbanzo), cereales (como el arroz y la avena), pseudocereales (como la quinoa, el teff y el amaranto), frutos secos (como las almendras, los anacardos, las avellanas y las nueces), o semillas (como el sésamo y el girasol) (Sethi et al., 2016). Además de la leche el mercado ofrece también productos que imitan el yogur y el queso, entre otros productos lácteos (Fuentes et al., 2017; Harper et al., 2022).

En la fabricación de yogures veganos o vegetales, la incorporación de un cultivo iniciador es una práctica habitual. Añadir cepas probióticas al yogur a base de soja es una buena idea porque compiten mejor con los cultivos iniciadores en una bebida de soja que en la leche de vaca (Farnworth et al., 2007). Diversos microorganismos pueden mejorar la solubilidad y la composición de aminoácidos de las proteínas vegetales en el proceso de fermentación. Por ejemplo, el *Bifidobacterium* aumenta el contenido de proteínas, y el *Lactobacillus plantarum* aumenta los aminoácidos esenciales en las fermentaciones de leche de soja. La fermentación de cacahuets con *Lactobacillus acidophilus* y *Lactobacillus plantarum* mejora la cantidad total de proteínas y aminoácidos esenciales (Tangyu et al., 2019).

En cuanto a los análogos del queso, estos se han consumido principalmente en pizzas, reduciendo los costes de producción y ofreciendo alternativas más baratas. Durante muchos años, los análogos de queso no se han utilizado para consumo directo como queso debido a la dificultad de reproducir los sabores únicos de los diferentes tipos de queso (Bachmann, 2001). Sin embargo, en las últimas décadas se han producido una serie de avances en los sustitutos veganos del queso en cuanto a métodos de elaboración y formulaciones (Grossman & McClements, 2021; Kamath et al., 2022). Ahora pueden elaborarse con ingredientes como soja, frutos secos, coco, tapioca e incluso patatas (Cheney, 2016; Grossman et McClements,

2021; Kamath et al., 2022). Los sustitutos del queso implican la sustitución parcial o completa de las proteínas y grasas de la leche por sustitutos de origen vegetal, como proteínas de fuentes como el cacahuete y la soja, y grasas y aceites como las grasas vegetales parcialmente hidrogenadas derivadas de la soja, la palma y otras fuentes (Jeske et al., 2018; Mohd Shukri et al., 2022). Además, los sustitutos del queso pueden crearse totalmente sin leche y sus derivados, adhiriéndose a un concepto de veganismo, o pueden incluir componentes relacionados con la leche, como caseína, aceite de mantequilla, etc., junto con extractos de soja y coco (Bachmann, 2001). Como parte del proceso de fabricación en los países occidentales, los sustitutos del queso se elaboran a partir de fuentes alternativas de grasas y proteínas distintas de las derivadas de la leche de vaca; además, se añaden aromatizantes para reproducir las cualidades sensoriales del producto lácteo original (Fox et al., 2017; Alcorta et al., 2021). El proceso de elaboración del queso parmesano vegano, por ejemplo, requiere moler nueces y añadir levadura nutricional, mientras que la mozzarella vegana se hace remojando anacardos en rejuvelac, una bebida fermentada de cereales (Grossmann & McClements, 2021; Alcorta et al., 2021). Otros quesos veganos comerciales se elaboran con arrurruz y yuca, lo que les confieren propiedades de fusión y estiramiento difíciles de encontrar sin caseína (Alcorta et al., 2021).

Los beneficios para la salud de los productos lácteos alternativos se han estudiado ampliamente. En un metaanálisis realizado por Onvani et al., (2017), se constató que el consumo de leche de origen vegetal, como la leche de almendras o de soja, puede reducir los niveles de colesterol, en particular el colesterol LDL, asociado a las enfermedades cardíacas. Estas alternativas a los lácteos suelen estar enriquecidas con nutrientes esenciales como el calcio y la vitamina D, como se destaca en un estudio de Auclair et al. (2019), lo que garantiza que los consumidores puedan seguir satisfaciendo sus necesidades nutricionales sin los productos lácteos tradicionales.

Desde un punto de vista ético, la producción de alternativas lácteas evita preocupaciones relacionadas con el bienestar animal y la ganadería industrial (Rossi & Garner, 2014). Los trabajos realizados por Joy (2010) sobre el concepto de "carnismo" analizan la desconexión entre el consumo de productos lácteos tradicionales y el sufrimiento de las vacas lecheras, arrojando luz sobre las razones morales para elegir alternativas basadas en plantas, que no contienen ingredientes de origen animal y están libres de crueldad (Beck et al., 2017). Además, los alimentos alternativos a los lácteos han contribuido sustancialmente a reducir la huella medioambiental de la industria alimentaria (Rohmer et al., 2018). Varios estudios

(Grant & Hicks, 2018; Hallström et al., 2022) han revelado que la producción de leche de origen vegetal genera emisiones de gases de efecto invernadero significativamente más bajas y requiere menos tierra y agua en comparación con la leche de vaca, abordando las preocupaciones sobre el cambio climático y la sostenibilidad de los recursos. La huella de carbono de las alternativas lácteas se reduce aún más gracias a materiales de envasado y técnicas de procesamiento innovadores, como demuestra la investigación de Flysjö, (2012).

Desde el punto de vista económico, entre 2009 y 2015 las ventas de sustitutos lácteos de origen vegetal se han más que duplicado en todo el mundo, alcanzando una suma de 21.000 millones de dólares (Silva et al., 2020). La Plant Based Foods Association señaló que las ventas de yogures vegetales en Estados Unidos han aumentado un 55%, las de quesos vegetales un 43% y las de cremas vegetales un 131% (Alcorta et al., 2021).

2. NUEVOS ALIMENTOS DE ORIGEN VEGETAL

Los nuevos alimentos de origen vegetal representan un campo de rápido crecimiento combinando innovación, sostenibilidad y nutrición (Baekelandt et al., 2023). Estos nuevos alimentos comprenden frutas exóticas, granos antiguos y verduras menos conocidas. Estos productos han llamado la atención por su valor nutricional específico, sus propiedades funcionales y/o su uso tradicional en la cocina regional (Alcorta et al., 2021; Yano & Fu, 2022).

Además de sus beneficios nutricionales, estos alimentos también pueden contribuir a una industria agrícola sostenible (Balakrishnan & Schneider, 2022). Los consumidores buscan, cada vez más, opciones sostenibles y de origen local y estos productos ofrecen la oportunidad de redefinir y remodelar la cadena de suministro de alimentos (Chiffolleau & Dourian, 2020). La producción de cultivos diversificados y resistentes puede mejorar la biodiversidad, reducir el impacto ambiental y promover sistemas agrícolas más resistentes al cambio climático (Shah et al., 2021).

Otros factores que inciden en su popularidad son sus propiedades funcionales (Fasolin et al., 2019) y la presencia de compuestos bioactivos con un claro impacto en la salud humana (Kusmann et al., 2023). En los últimos años, los “superalimentos” ricos en antioxidantes como las bayas de acai, la moringa y el baobab han ganado popularidad gracias a los beneficios para la salud asociados a su consumo (Tacer-Caba, 2019). El creciente interés por los nuevos alimentos vegetales entre investigadores, científicos de la alimentación y

consumidores se refleja en la evolución de los marcos normativos para garantizar su seguridad y su correcto etiquetado. Organismos reguladores, como la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) y la Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (FDA), desempeñan un papel fundamental en la evaluación de la seguridad y los aspectos nutricionales de estos alimentos antes de que entren en el mercado (Vapnek et al., 2021).

En este escenario, las harinas y los concentrados de proteína vegetal son los alimentos con una mayor importancia en el mercado actual (McClements & Grossman, 2021b).

2.1. Harinas

Las harinas vegetales han surgido como una oportunidad atractiva tanto en los ámbitos de la nutrición como de la innovación culinaria, llamando la atención por sus diversos beneficios nutricionales y aplicaciones. Así, por un lado, estas harinas presentan ventajas nutricionales como su contenido en fibra y vitaminas, lo que contribuye a mejorar la absorción de micronutrientes y beneficios para la salud (Hever, 2014). Por otro lado, ofrecen perfiles de sabor novedosos y excitantes, que permiten la elaboración de otro tipo de productos (Allaqaband et al., 2022). La harina de coliflor, por ejemplo, ha ganado popularidad como alternativa baja en carbohidratos, permitiendo la creación de bases de pizza sin gluten y otros productos horneados (Krebber, 2017). Las harinas de espinaca y col rizada aportan colores brillantes y perfiles nutricionales mejorados a los platos de pasta, mientras que la harina de calabacín sirve como agente espesante rico en nutrientes en sopas y salsas (Nachay & Malochleb, 2018).

2.1.1. Definición

La harina es el polvo fino elaborado a partir de la molienda de los alimentos secos que sirve como base versátil para una amplia gama de productos alimenticios (Atwell & Finnie, 2016). El tipo de harina más comúnmente utilizada es la harina de trigo, se obtiene moliendo y tamizando hasta cierto punto la parte principal de las semillas de trigo, denominada endospermo, mientras que las partes sobrantes, el germen y el salvado, se consideran subproductos. Entre los diferentes tipos de harina, la harina de trigo es la más utilizada (Awuchi et al., 2019). Existen varios tipos de esta versátil harina, como la harina para todo uso, la harina panificable, la harina para pasteles y la harina para repostería, cada una con un contenido proteico diferente. (Shewry & Hey, 2015). Sin embargo, la harina puede obtenerse a partir de diferentes cereales como materia prima de elaboración, así como a partir de

legumbres, frutos secos o semillas (Sunico et al., 2021). La clasificación de las harinas depende de la materia prima y de los métodos de procesamiento utilizados (Savenkova et al., 2019). Cada harina presenta diferencias en su composición y comportamiento que influirán en su aplicabilidad industrial, proporcionando diferentes texturas, sabores y perfiles nutricionales.

Las alternativas sin gluten se están convirtiendo en indispensables debido al incremento de personas intolerantes o sensibles al mismo (Akter, 2020). Así la harina de arroz, como ingrediente sin gluten, desempeña un papel clave en las cocinas asiáticas y en la repostería sin gluten (Park, & Kim, 2023). La harina de almendra ha ganado popularidad como alternativa sin gluten caracterizada por su rico sabor a nuez (Udayarajan et al., 2022). También las legumbres se utilizan para la obtención de harina destacando la harina de garbanzo que es ampliamente utilizada en la cocina de Oriente Medio y de India donde se incorpora a platos como la socca y las pakoras (Kraig & Sen, 2013).

Uno de los aspectos que deben ser considerados en una harina, para su aplicación industrial, es su funcionalidad. Existen diferentes factores que afectan a la funcionalidad de la harina relacionados con su composición y con el tamaño de partícula (Amjid et al., 2013).

El contenido en proteínas afecta al rendimiento de la harina (Barak et al., 2013), teniendo un impacto significativo en la textura de los productos de panadería (Bressiani et al., 2017). En el contexto de las harinas de trigo, la cantidad de proteína desempeña un papel crucial en la formación del gluten (Zhou et al., 2021). La presencia de un alto contenido en proteínas es especialmente beneficiosa para la elaboración del pan, ya que proporciona estructura y elasticidad (Ortolan, & Steel, 2017). Por el contrario, un contenido proteico más bajo es más adecuado para la bollería delicada (Zhou et al., 2021).

El contenido en gluten, que se encuentra en el trigo y otros granos de cereales, es un componente esencial de la panificación (Shewry, 2019). La plasticidad y elasticidad del gluten da forma a la masa y permite que la levadura la hinche con aire y vapor de agua (Gajula, 2017). Las harinas con cantidades sustanciales de gluten, como la harina panificable, contribuyen significativamente a la estructura y masticabilidad del pan (Puerta et al., 2020).

Por otro lado, está el almidón que es el componente mayoritario de las harinas vegetales (Awuchi et al., 2019). El contenido en almidón desempeña un papel clave en la textura de los productos de panadería (Liu, 2005). Así, a diferencia de la panificación del trigo donde el gluten es el factor de calidad más importante, las propiedades reológicas de la masa de harinas

vegetales se ven especialmente afectadas por las características del almidón, las amilasas y otros los componentes solubles (Gómez et al., 2009). Las características del almidón varían de unas harinas a otras influyendo por lo tanto en su aplicabilidad industrial (Fuentes-Zaragoza et al., 2010). Las harinas con un alto contenido en almidón contribuyen a la terneza de la miga de tartas y pasteles (Al-Dmoor 2013).

El contenido en cenizas es una medida cuantitativa del contenido mineral de la harina (Shahzadi et al., 2005) y permite evaluar la tasa de extracción y el refinamiento de la harina. Su contenido es mayor en las harinas integrales debido a la inclusión de salvado y germen (Vignola et al., 2018).

Además de los parámetros de composición el tamaño de las partículas de la harina es determinante en su funcionalidad en el contexto de la panificación (Gómez & Martínez, 2016). Las harinas finamente molidas, como la harina de repostería, contribuyen a la textura tierna de los productos horneados (Lai & Lin, 2006). Por el contrario, las harinas más gruesas, como la sémola, son adecuadas para productos que requieren una estructura más sustancial, como la pasta (Lazaridou & Biliaderis, 2007).

De cara al futuro, las implicaciones de las harinas vegetales para la sostenibilidad medioambiental y la seguridad alimentaria mundial son cada vez más evidentes (Jennings et al., 2023). Los tubérculos, las legumbres y las verduras de hoja verde que se utilizan habitualmente en las harinas vegetales requieren menos recursos que el trigo tradicional, lo que contribuye a reducir el consumo de agua y las emisiones de gases de efecto invernadero (Chandel et al., 2024). La diversificación de cultivos mejora la seguridad alimentaria al proporcionar opciones resistentes para cultivar en diferentes regiones y hacer frente a los retos que plantea el cambio climático (Alotaibi, 2023).

A pesar de los beneficios potenciales, aún quedan retos por superar para que las harinas vegetales alcancen todo su potencial. Los métodos de procesamiento, los perfiles de sabor y la aceptación en el mercado son sólo algunos de los obstáculos que la investigación actual trata de superar (Andreani et al., 2023). Optimizar las técnicas de producción y resolver los problemas sensoriales asociados a determinadas harinas son elementos esenciales (Montemurro et al., 2023). Además, es preciso concienciar y educar a los consumidores sobre los beneficios nutricionales y culinarios de las harinas vegetales para promover su adopción generalizada en diversas aplicaciones (Hoehnel et al., 2022; Olugbenga Ben et al., 2023).

2.1.2. Harinas de cereales sin gluten

La harina de trigo contiene niveles altos de proteínas de reserva (gliadina y glutenina) de las cuales la gliadina representa el mayor desafío para abordar la intolerancia al gluten y la enfermedad celíaca (Cabanillas, 2020). Sin embargo, otros cereales también tienen proteínas que ejercen un efecto tóxico para los pacientes con enfermedades celíacas; las prolaminas tóxicas incluyen no sólo la gliadina del trigo, sino también la secalina en el centeno y la hordeína en la cebada (Wrigley et al., 2001). Además de su implicación en intolerancia al gluten y la celiaquía las harinas de cereales sin gluten proporcionan alternativas versátiles y nutritivas para quienes tienen restricciones dietéticas o buscan experiencias culinarias diversas (Gurusamy et al., 2022).

Sin embargo, desde el punto de vista tecnológico, estas proteínas que forman el gluten tienen una función esencial en las masas al unir las moléculas de agua entre los ingredientes, siendo fundamentales en el desarrollo de texturas adecuadas (Edwards, 2007). Además, presentan propiedades cohesivas y de resistencia que permitan retener el gas (Atwell & Finnie, 2016). El uso de harinas sin gluten como la harina de arroz refinada, la harina de arroz integral, la fécula de maíz, las harinas de sorgo y mijo, la fécula de patata y la harina derivada de granos y legumbres cambia la calidad de las masas (Hager et al., 2012) siendo necesario realizar ajustes en el desarrollo de los productos (Wesley et al., 2021). Estas harinas carecen de las propiedades aglutinantes y de elasticidad del gluten de trigo, por lo que pueden ser necesarios agentes aglutinantes adicionales como la goma xantana o la goma guar en su cocción (Xu et al., 2020).

Entre los cereales sin gluten que se utilizan para la producción de harina destacan el arroz, el maíz, el sorgo, el mijo y el teff, que ofrecen variedad nutricional sin desencadenar reacciones adversas (Pandey, 2022).

La harina sin gluten más utilizada es la harina de arroz (Park & Kim, 2023), su sabor suave la hace muy apreciada para la elaboración de productos sin gluten (Aleman et al., 2022). La harina de arroz ofrece respuestas glucémicas e insulínicas más bajas en comparación con otros cereales, ya que los productos con mayor contenido de amilosa presentan una menor digestibilidad del almidón (León et al., 2007).

El arroz (*Oryza sativa*) se cosecha inicialmente con la cáscara intacta y luego se descascarilla para producir arroz blanco. Normalmente, la harina de arroz blanco se obtiene de la molienda

de granos pulidos rotos, ya que son subproductos económicamente más viables de la industria arrocería (Singh et al., 2013). Esta molienda, es a menudo realizada en granos blancos sin germen debido a la actividad de la lipasa del germen que disminuye la vida útil de la harina (Cheng et al., 2022). La molienda del arroz abarca métodos húmedos, semisecos y secos, cada uno de los cuales influye en las aplicaciones de la harina resultante (Loubes & Tolaba, 2014). Las propiedades físicas como la viscosidad, el tamaño de partícula y el color de la harina de arroz pueden verse influidas por el tratamiento y la adición de agentes tensioactivos (León et al., 2007). Las propiedades de gelatinización de las harinas de arroz varían en función de la variedad de arroz, teniendo las variedades de grano largo un mayor contenido de amilosa (Bocevaska et al., 2009), mientras que el arroz ceroso presenta un bajo contenido en amilosa (Zhu et al., 2010). La harina integral, con la incorporación del salvado, permite estabilizar la harina de arroz blanco prolongando su vida útil (León et al., 2007). Los métodos de molienda afectan al tamaño de las partículas de harina y al daño sufrido por el almidón. En comparación con el almidón de trigo, el almidón de arroz tiene una temperatura de gelatinización más alta y un menor contenido de amilosa (Singh et al., 2003), que varía según el tipo de grano y la variedad. Las variedades de grano largo suelen tener temperaturas de gelatinización más altas que las variedades de grano medio y corto (Cameron & Wang, 2005).

La harina de arroz se caracteriza también por un bajo contenido en proteínas (7%). Las proteínas son clave para el hinchamiento de los gránulos de almidón (Baldwin, 2001) e influyen en los aspectos estructurales, funcionales y nutricionales de los productos (de la Hera Aguado, 2013).

El uso de la harina de arroz para la elaboración de pan presenta problemas de conservación debido al endurecimiento, originando una textura más firme y una disminución de la frescura. Este fenómeno está influido principalmente por la retrogradación del almidón (Martínez et al., 2013), así, la mayor tasa de retrogradación del arroz origina panes más secos y desmenuzables durante el almacenamiento (Kadan et al., 2001).

El grano de maíz, conocido científicamente como *Zea mays* es otra materia prima ampliamente utilizada en la obtención de harinas. La harina completa de maíz se consideran buenas fuentes de energía principalmente por su alto contenido en hidratos de carbono (almidón), proteínas y fibra dietética, sin embargo, es una harina pobre en cuanto a su composición mineral (Murdia et al., 2016). El maíz tiene un contenido proteico similar al de otros cereales (entre el 8% y el 10%), destacando su contenido en zeína, una proteína baja en lisina y triptófano, lo que la hace que se considere una proteína de calidad inferior (de la Hera

Aguad, 2013).

Las harinas de maíz presentan una gran variabilidad en su composición. Por un lado, debido a la importante diversidad derivada de la variabilidad genética, los factores ambientales y las prácticas de cultivo (Bello et al., 2012). Por otro lado, los distintos métodos de molienda influyen notablemente en la composición, especialmente en el contenido de grasa, fibra, cenizas e hidratos de carbono, estando relacionadas estas variaciones con la cantidad de germen y salvado eliminados durante el proceso de molienda (de la Hera Aguado, 2013).

Otros cereales a partir de los que se obtienen harinas sin gluten son el sorgo, el mijo y la avena. Estos cereales, han sido tradicionalmente importantes en las regiones semiáridas de Asia y África, donde forman parte de la dieta tradicional (Hussain et al., 2020). El procesamiento industrial del sorgo y el mijo está progresando, con la mejora de las técnicas y la implantación de la molienda personalizada en todo el mundo. Estos granos, procesados o no, pueden utilizarse enteros o descascarillados y molidos para obtener harina mediante métodos tradicionales o industriales (Rai et al., 2008). Estas harinas se han utilizado tradicionalmente en una gran variedad de productos alimenticios, como pan, platos preparados, productos hervidos, bebidas y aperitivos (Rooney et al., 1997). Actualmente, se utilizan en nuevos alimentos y bebidas, como las papillas instantáneas y las bebidas malteadas (Dahlberg et al., 2003). Otras innovaciones de éxito incluyen pasteles, pasta y aperitivos (Khoddami et al., 2023). En Estados Unidos, existen 218 productos alimenticios comerciales a base de sorgo, en forma de granos enteros o harina de sorgo. Entre ellos se incluyen productos sin gluten, galletas, cereales, barras, panes, pasteles, cerveza sin gluten y platos preparados (León et al., 2007).

Por su parte la avena, también es utilizada como harina. La harina de avena es un ingrediente clave en productos de panadería como las galletas y el pan, ya que influye en la absorción de agua de la masa, en la consistencia de la masa, y afecta al aroma, el sabor y la textura del producto final (Na et al., 2021). A diferencia de otros cereales en los que el germen y el salvado suelen eliminarse parcial o totalmente antes de su incorporación, la avena se utiliza en forma de harina integral o copos (Mao et al., 2022). Sin embargo, la idoneidad de la avena en una dieta sin gluten es objeto de debate. Mientras que algunos estudios sugieren que el consumo moderado de avena no contaminada puede no perjudicar a la mayoría de los pacientes celíacos, otros advierten de reacciones inmunológicas o compuestos potencialmente dañinos en ciertas variedades de avena (Colombo et al., 2021). Además, persiste la preocupación por la contaminación por gluten a lo largo del proceso de producción, a pesar de

los esfuerzos por minimizarla (Álvarez & Boye, 2012). Los productos de avena disponibles en el mercado suelen contener gluten, lo que subraya la importancia de una selección cuidadosa para gestionar los riesgos potenciales asociados a su consumo (Chu, 2013). Un problema que presenta el uso de harina de avena es su rápido deterioro. El tratamiento térmico de la avena no sólo desarrolla las características de la avena tostada, sino que también desactiva las enzimas, impidiendo el desarrollo de sabores amargos asociados a la actividad de la lipasa, la lipoxigenasa y la peroxidasa (Rasane et al., 2015). Sin embargo, el tratamiento térmico afecta considerablemente a las propiedades funcionales y nutricionales de los productos a base de avena, en particular al reducir la solubilidad de las proteínas (Brückner-Gühmann et al., 2021).

La harina de coco es una excelente opción para quienes buscan un ingrediente rico en nutrientes. Elaborada a partir de pulpa de coco desecada, la harina de coco es rica en fibra y baja en otros hidratos de carbono (Caliskan et al., 2020). La harina de coco puede absorber una cantidad significativa de líquido, por lo que a menudo se utiliza en combinación con otras harinas sin gluten para lograr la textura y consistencia deseadas en el desarrollo de productos (Adsare & Annapure, 2023). Otra harina sin gluten popular es la harina de almendras, producida a partir de almendras molidas y ampliamente utilizada en repostería sin gluten (Hopkin et al., 2022), ya que es rica en grasas saludables, proteínas y fibra (Yildiz & Gocmen, 2021).

La harina de cáñamo, procedente de las semillas de la planta *Cannabis sativa*, está ganando popularidad como opción nutritiva y sin gluten. Reconocida por sus potenciales beneficios para la salud, mantiene un perfil equilibrado de ácidos grasos (Rizzo et al., 2023). Su textura densa combina bien con otras harinas, lo que la convierte en un ingrediente interesante para diversas aplicaciones industriales (Hayward & McSweeney, 2020). Entre sus aplicaciones la harina de cáñamo se ha utilizado en la elaboración de pan y galletas (Rusu et al., 2021).

2.1.3. Harinas de leguminosas

El consumo de legumbres en forma de harinas ha ganado popularidad en los últimos años (Binou et al., 2022) al ofrecer una serie de beneficios para la salud y satisfacer las necesidades dietéticas de diversos grupos de consumidores (Hill, 2022). Las harinas de legumbres, por su composición en aminoácidos y su contenido en fibra, son ingredientes ideales para mejorar el valor nutritivo del pan y los productos de panadería (Gómez et al., 2008). Además, han sido utilizadas para su incorporación en productos como pastas y aperitivos (Noorfarahzilah et al., 2014, Rawat & Indrani, 2015).

El contenido proteico de las harinas de legumbre les confiere interesantes propiedades funcionales (Laleg et al., 2016), destacando la solubilidad y la viscosidad (Foschia et al., 2017), la capacidad espumante, emulsionante, moduladora de texturas, gelificantes y de absorción de aceite y agua (Du et al., 2014). Entre los factores que más afectan a las propiedades funcionales de estas harinas se encuentran su composición en aminoácidos, el contenido en agua, sales, azúcares y grasa y los métodos de procesamiento (Awuchi et al., 2019; Stone et al., 2019).

Entre las harinas de leguminosas una de las más utilizadas es la harina de soja. Conocida por su importante contenido proteínico, que oscila entre el 40% y el 55%, se utiliza principalmente en la alimentación animal, pero también tiene un gran potencial para el consumo humano (Liu, 2012). Las variedades de harina de soja, incluidas las opciones con alto contenido en grasa que contienen alrededor de un 40% de proteínas y las versiones desgrasadas con un 52-54% de proteínas, se fabrican moliendo cotiledones descascarillados o mediante la extracción con disolventes de copos de soja descascarillada. Otras variantes del mercado son las harinas de soja presentan una solubilidad en agua alterada mediante tratamientos térmicos específicos para mitigar el desarrollo del sabor de las habas (Jideani, 2011; Russin et al., 2011). Mediante la aplicación de un proceso de desolventización y tostado, junto con etapas posteriores como el secado, el enfriamiento, la reducción del tamaño de las partículas y el tamizado, se obtiene un producto sin disolventes, desprovisto de factores activos antinutricionales, que lo hace apto para diversas aplicaciones (Nevara et al., 2023). Desde el punto de vista tecnológico, la funcionalidad de la harina de soja está estrechamente ligada a su capacidad para absorber agua y grasa (Awuchi et al., 2019), y su pegajosidad o capacidad para pegar (Muoki et al., 2015). Añadidas directamente a la masa, las harinas de soja con mayor proteína y dispersabilidad se aplican principalmente en productos de panadería (Zhang, 2021). Su inclusión además de enriquecer los productos a base de cereales como el pan, las galletas y la pasta (Di Cairano et al., 2022), incorpora un alto contenido en proteínas con aminoácidos esenciales de fácil digestión (Ali et al., 2020).

Por otro lado, la inclusión de harina de soja en productos de panadería sin gluten se ha asociado con efectos positivos en la calidad técnica de los productos de panadería sin gluten (Taghdir et al., 2017). Sin embargo, las propiedades viscoelásticas del gluten de trigo se ven afectadas cuando se mezcla con harina de soja originando una reducción del volumen del producto final (Roccia et al., 2009).

Otras harinas de legumbres que han visto incrementada su producción y aplicación industrial

son las harinas de garbanzo y lenteja. Las harinas de garbanzo presentan un mayor contenido de proteínas, grasas, cenizas y fibra, y menor de humedad y carbohidratos, que la harina de trigo (Taranova et al., 2021). Debido a su bajo contenido en carbohidratos las harinas de garbanzo dan lugar a pastas con menor viscosidad de pico, fuerza de retención, descomposición, viscosidad final y retroceso total que la harina de trigo (Gómez et al., 2008). Las harinas de garbanzo se han aplicado en la elaboración de pan y snacks (Rachwa-Rosiak et al., 2015), como extensor en productos cárnicos bajos en grasa (Sanjeewa et al., 2010) y en la elaboración de pastas y pasteles combinada con otras harinas de cereales (Grasso et al., 2022). La harina de lenteja, por su parte, es rica en hierro y folato, lo que contribuye a mejorar los perfiles nutricionales de diversos productos alimenticios (Romano et al., 2021). La adición de lentejas a alimentos a base de cereales mejora su perfil nutricional al aumentar el contenido proteico y mejorar la disponibilidad de lisina (Romano et al., 2021). Al igual que otras harinas de legumbres, la harina de lenteja posee buenas propiedades funcionales, sin embargo, su elevada actividad lipoxigenasa puede originar sabores extraños durante el procesado o almacenamiento y reducir la vida útil de las mismas (Romano et al., 2021). Las harinas de lenteja han sido incorporadas en productos como galletas, pasta y salsas para satisfacer las necesidades nutricionales de las personas cuyo consumo de legumbres está restringido, en particular las personas mayores que sufren deficiencias de proteínas (Mudryj et al., 2014). La incorporación de harina de lenteja puede influir en las características físicas y sensoriales de sus productos horneados, disminuyendo la estabilidad y resistencia de la masa y aumentando el tiempo de absorción de agua, el tiempo de desarrollo y el grado de ablandamiento (Portman et al., 2018). En el caso de su incorporación en pastas mejora su firmeza (Teteryzc et al., 2020) y en el caso de su incorporación en aperitivos origina un efecto negativo en sus características de textura (Luo et al., 2020).

El guisante también ofrece una harina con un rico perfil nutricional, en particular por su alto contenido en proteínas y aminoácidos esenciales (Robinson et al., 2019). Así, los guisantes destacan por su alto contenido de lisina (Lu et al., 2020) de modo que la mezcla de cereales con guisantes da lugar a un producto con una composición proteica completa y equilibrada (Gemede, 2020). Se ha utilizado en la elaboración de salchichas bajas en grasa (Kaack & Pedersen, 2005) y combinada con harina de trigo ha sido utilizada para la elaboración de pan (Aider et al., 2012).

2.1.4. Harinas de pseudocereales y otras fuentes

Las harinas de pseudocereales, derivadas de granos o semillas que no forman parte de la familia Poaceae pero que comparten características similares a los cereales tradicionales, se han convertido en poderosos elementos nutricionales e ingredientes versátiles en los productos modernos (Serna Saldívar et al., 2020). Así, pseudocereales como la quinoa y el amaranto han ganado popularidad como alimentos novedosos por su alto contenido en proteínas y su adaptabilidad a distintos climas (Repo-Carrasco-Valencia et al., 2009; Graziano et al., 2022). Estos cultivos suelen prosperar en entornos difíciles, como grandes altitudes o suelos pobres, donde los cereales tradicionales pueden tener dificultades para crecer (Rajbhandari & Bhatta, 2008). Las harinas de pseudocereales son prometedoras para promover la agricultura sostenible y mejorar la seguridad alimentaria (Cheng, 2018). Su capacidad para adaptarse a diversos climas contribuye a un suministro de alimentos más resistente y sostenible (Martínez-Villaluenga et al., 2020). Además, los pseudocereales son conocidos por su uso eficiente del agua, que se alinea con el imperativo de conservar el agua en la agricultura (Pinto et al., 2022).

Dentro de este grupo destacan las harinas de amaranto (*Amaranthus* spp.), quinoa (*Chenopodium quinoa*) y alforfón o trigo sarraceno (*Fagopyrum esculentum* y *Fagopyrum tartaricum*), todas las cuales ofrecen beneficios nutricionales únicos (Graziano et al., 2022).

La harina de quinoa, famosa por su completo perfil proteico, no contiene gluten y es una excelente alternativa para los celíacos o las personas sensibles al gluten (Bravi et al., 2024). La harina de quinoa puede añadirse como sustituto de la harina de trigo, como en el pan, pasta y galletas dulces, incrementando su contenido mineral (Sukeerthi & Singh, 2017). Su incorporación a estos productos influye en el color, sabor y la textura crujiente (Brito et al., 2015). Por otro lado, el uso de harina de quinoa provocaba un ligero aumento del grosor del producto, aunque disminuye la proporción de extensión y el diámetro cuando se utiliza en la elaboración de galletas (Jancurová et al., 2009; Demir, 2014). La harina de amaranto también es rica en proteínas y aminoácidos esenciales (Shembe et al., 2023) y ha sido utilizada para la elaboración de diversos productos como pan, pasteles, magdalenas, galletas, albóndigas, crepes, fideos y galletas saladas (Rai et al., 2008). Tal y como se observa para la quinoa, la elaboración de productos con harina de amaranto produce un aumento en el contenido en proteínas y cenizas (Chávez-Jáuregui et al., 2008). La incorporación de amaranto disminuye la extensión y aumenta el grosor de los productos (Sindhuja et al., 2005), disminuyendo la dureza y tendencia a la rotura. A diferencia de lo observado con la quinoa, las propiedades

sensoriales se ven poco afectadas y la aceptación global solo disminuye para porcentajes de sustitución muy altos (por encima del 60%) debido a su ligero regusto amargo (Chauhan et al., 2016).

La harina de alforfón o trigo sarraceno contiene un alto contenido en proteínas, aunque presentan una digestibilidad baja. Su contenido en aminoácidos está bien equilibrado y es rica en lisina (Pomeranz & Robins, 1972). Además, aporta vitaminas y minerales y su contenido fenólico y actividad antioxidante son también de gran importancia (Fabjan et al., 2003). Esta harina se ha utilizado para la elaboración de productos de panadería, pasta-fideos, galletas, pasteles, crepes y cereales de desayuno (Bilgicli, 2009). Sin embargo, la inclusión de trigo sarraceno en las elaboraciones afecta a algunas características como el grosor y la dureza del producto final, al tiempo que origina un aumento de la retención de aceite y una disminución de la aceptación del producto (Baljeet et al. 2010; Filipčev et al, 2011; Wójtowicz et al. 2013).

2.2. Concentrados y aislados de proteína

Las proteínas constituyen un interesante ingrediente alimentario, tanto desde el punto de vista funcional como nutricional (Małecki et al., 2021). Numerosas propiedades de los alimentos, como sus características físicas y organolépticas, se deben a la concentración y tipo de proteína presentes en el mismo (Foegeding & Davis, 2011). Así, la textura y la consistencia de la carne, el queso y el pan están determinadas en gran medida por sus proteínas (Heertje, 2014).

La demanda mundial de alimentos ricos en proteínas no ha parado de crecer en los últimos años, lo que ha llevado a la industria alimentaria al desarrollo de concentrados y aislados de proteínas a partir de diferentes matrices alimentarias (Sim et al., 2021). Entre los beneficios de estos productos se encuentran su capacidad para mejorar la textura de los alimentos, aumentar el contenido nutricional y alinearse con la creciente demanda de dietas sostenibles y basadas en plantas (Arora et al., 2023a; Kumar et al., 2020; Mondor et al., 2022). Por todo ello, una amplia gama de sectores puede beneficiarse de estos productos proteicos, incluyendo la nutrición deportiva, los alimentos funcionales y los sustitutos de la carne (Arenas-Jal et al., 2020; Kumar et al., 2022a; Lonnie et al., 2020).

2.2.1. Definición

Existen diferentes fuentes de proteínas, como la soja, el suero de leche y el guisante, que contribuyen a la producción de concentrados y aislados de proteína, dando lugar a perfiles nutricionales y propiedades funcionales distintos (Bailey et al., 2023; Garba & Kaur, 2014; Pedrosa et al., 2020; Toews & Wang, 2013). Las fracciones proteicas de estas fuentes se concentran eliminándose otros constituyentes como carbohidratos, grasas y minerales. Los productos así obtenidos se conocen como concentrados proteicos (PC). Los aislados proteicos se obtienen tras una purificación posterior para eliminar más componentes no proteicos, lo que da lugar a una mayor proporción de proteínas (Hansen et al., 2022). Así, los PC contienen entre un 35 y un 80% de proteínas, mientras que los aislados pueden contener más de un 90% de proteínas. Los concentrados de proteínas ofrecen una calidad y digestibilidad superiores cuando se producen mediante procesos como la extracción y la filtración (Bessada et al., 2019; Boye et al., 2010a; Mondor & Hernández-Álvarez, 2022). A medida que avanzan las tecnologías de procesamiento estos productos se han ido incorporando al desarrollo de alimentos innovadores y nutritivos (Wu et al., 2014). La funcionalidad de estos productos se ve influida por factores tales como la fuente de la proteína, los métodos de procesamiento empleados y las condiciones en las que se aplican (Boye et al., 2010b).

Su uso como ingredientes en la producción de alimentos, como suplementos o aditivos nutricionales han aumentado considerablemente, mejorando la composición de aminoácidos y aumentando el contenido proteico (Nadathur et al., 2016; Read, 2002). La industria alimentaria también utiliza estos productos por sus propiedades tecno-funcionales (Kuesten & Hu, 2020), tales como su capacidad de formación de emulsiones, geles y espumas, la absorción de agua y aceite, el aumento de la viscosidad y la mejora del aspecto, el sabor y la textura (Kristo & Corredig, 2014; Nwachukwu & Aluk, 2021; Tan et al., 2023). En este contexto, se ha producido un importante desarrollo de procesos destinados a aislar o extraer proteínas de sus orígenes orgánicos originales (Pojić et al., 2018).

2.2.2. Propiedades funcionales de los concentrados

Las propiedades funcionales están relacionadas con las propiedades físico-químicas intrínsecas de las proteínas y definen su comportamiento durante la producción, el procesamiento, el almacenamiento y el consumo de los alimentos. Las propiedades tecno-funcionales incluyen la densidad, la solubilidad, la capacidad de absorción de agua y aceite, y las propiedades emulsionantes y espumantes entre otras (Kristo y Corredig, 2014; Toews y Wang, 2013). Estas propiedades han adquirido gran importancia, debido al creciente uso de

diferentes fuentes vegetales en el desarrollo de formulaciones alimentarias (Bou et al., 2022).

El comportamiento funcional de las proteínas está asociado a diferentes factores como su tamaño, forma, composición y secuencia de aminoácidos, carga neta, hidrofobicidad, estructura y rigidez molecular, así como a factores externos (pH, temperatura, concentración de sal) o a la presencia de otros componentes de los alimentos (Foegeding & Davis, 2011; Zayas, 2012).

La capacidad de retención de agua (WHC) es una característica funcional crucial que influye en la retención de humedad y la succulencia de los alimentos (Warner, 2023). Se puede definir como la cantidad de agua que permanece unida a los materiales que la contienen después de aplicar fuerzas externas (Schmid et al., 2024). Esta propiedad funcional afecta a las texturas y a la palatabilidad deseadas en diversas aplicaciones alimentarias (Kumar et al., 2022b). En el caso de los análogos cárnicos, los concentrados y aislados de proteínas contribuyen a su aceptabilidad sensorial en función de su capacidad de retención de agua (Singh & Sit, 2022). Esta influencia se ha observado también en la elaboración de panes (Stantiall & Serventi, 2018) y en la elaboración de productos como las natillas y la masa panarias (Awuchi et al., 2019).

La capacidad de absorción de aceite (OHC) hace referencia a la retención física del mismo. La OHC de las proteínas depende de su conformación y perfil de aminoácidos. Ciertos aminoácidos, como la leucina, la isoleucina y la valina, y la presencia de proteínas desnaturalizadas mejoran esta capacidad (Meganaharshini et al., 2023). La bollería, los donuts, las tortitas, los pasteles, los productos cárnicos, las sopas y los productos de confitería se benefician de la capacidad de retención de aceite para mantener el sabor, mejorar la palatabilidad y prolongar la vida útil (Segura-Campos et al., 2014). En muchos casos es necesaria una buena combinación de OHC y WHC, para la obtención de un producto adecuado.

La solubilidad es la capacidad de las proteínas para disolverse en agua u otros disolventes. Se trata de la propiedad funcional de las proteínas más importante, debido a su significativa influencia en las demás propiedades funcionales y por lo tanto suele ser la primera propiedad funcional que se determina durante el desarrollo y las pruebas de nuevos ingredientes proteicos. En la solubilidad de las proteínas influyen factores como el pH, la temperatura y la presencia de sales. Esta propiedad resulta fundamental en la elaboración de productos de base líquida como bebidas y sopas (Yang et al., 2023).

La capacidad emulsionante mide la capacidad de las proteínas para formar una dispersión de una fase oleosa en un medio acuoso (Damodaran, 2005). Esta capacidad se ve afectada por varios factores, como el pH, el tamaño de las gotas, la carga neta, la tensión interfacial, la viscosidad y la conformación de las proteínas (Chang et al., 2015; Lima et al., 2023). Las propiedades emulsionantes están muy relacionadas con la solubilidad acuosa de las proteínas (Bilgi & Celik, 2004). En las emulsiones, las proteínas reducen la tensión interfacial entre el aceite y el agua, facilitando su formación y estabilización (Fan et al., 2022) por lo tanto, la capacidad emulsionante de las proteínas contribuye en gran medida a la funcionalidad de los alimentos (Tang, 2017) y a la estabilidad y la textura de los productos emulsionados (Qamar et al., 2020; Toews & Wang, 2013). Productos como las mayonesas, embutidos y aliños incorporan concentrados y aislados proteicos en sus formulaciones por su capacidad emulsionante (Goldstein & Reifen, 2022; Rivera et al., 2022).

La capacidad espumante se refiere a la capacidad de las proteínas para formar capas estables que rodean las gotitas de gas en una fase líquida (Zayas, 2012). Las proteínas, cuando se montan o se baten, atrapan el aire para crear espumas estables (Bao, 2022). El comportamiento superficial y espumante de las proteínas no puede vincularse a un solo factor, ya que existen muchas interdependencias, así la solubilidad y carga superficial, la flexibilidad molecular e hidrofobicidad superficial de las proteínas así como factores extrínsecos como el pH o la temperatura, influyen sobre este comportamiento (Amagliani et al., 2021). Es una propiedad esencial en la producción de productos alimenticios aireados como merengues y mousses (Ellis y Lazidis, 2018) y dulces (Jideani, 2011).

La propiedad gelificante es la capacidad de formar una estructura de gel. Las propiedades de gelificación de los concentrados y aislados de proteínas se ven influidas por factores como la concentración de proteínas, la temperatura y el pH (Zheng et al., 2022). La capacidad de gelificación en las legumbres, pseudocereales y cereales parece estar influenciada por la naturaleza y el tipo de proteínas que constituyen el alimento, y los posibles complejos proteína-polisacárido que puedan formarse (Li et al., 2023). La gelificación, es una propiedad funcional fundamental en la producción de diversos productos como postres, aperitivos gelificados y análogos de la carne para conseguir la textura deseada (Nasrollahzadeh et al., 2021).

2.2.3. Concentrados y aislados de cereales sin gluten

Los concentrados y aislados de cereales sin gluten han adquirido una importancia considerable en respuesta a la creciente demanda de productos sin gluten, impulsada por una mayor concienciación sobre la celiacía y la sensibilidad al gluten (Singla et al., 2024). Estos productos se obtienen de cereales como el arroz, sorgo, mijo, maíz y avena, y proporcionan fuentes de proteínas alternativas para las personas que necesitan evitar los cereales con gluten, como el trigo, la cebada y el centeno.

Los concentrados y aislados de cereales sin gluten ofrecen propiedades funcionales similares a las de los cereales con gluten, lo que permite su aplicación en una amplia gama de productos sin gluten (Boukid et al., 2021).

El arroz es uno de los principales cultivos alimentarios, principalmente en los países asiáticos, donde proporciona la mayor parte de las proteínas que consumen millones de personas (Hoogenkamp et al., 2017). El arroz produce la segunda mayor cantidad de proteína alimentaria por hectárea después del trigo, pero su rendimiento de proteína utilizable es en realidad superior al del trigo (Amagliani et al., 2017a). La digestibilidad de las proteínas y el valor biológico del arroz son superiores a los de los otros cereales como el trigo, el maíz o la cebada (Amagliani et al., 2017b). Las proteínas influyen significativamente en las propiedades estructurales, funcionales y nutricionales del arroz (Yadav et al., 2013). Además, las proteínas de arroz se consideran generalmente hipoalergénicas (Dupont et al., 2020). Numerosos estudios han sugerido que las proteínas de arroz y los hidrolizados a base de proteínas de arroz y fracciones peptídicas específicas poseen propiedades antioxidantes (Liu et al., 2021), antihipertensivas (Li et al., 2007) y anticancerígenas. Por lo tanto, el arroz representa una fuente interesante de proteínas para el desarrollo de ingredientes enriquecidos con proteínas para la formulación y fabricación de productos nutricionales por su perfil de sabor neutro y su versatilidad en diversas aplicaciones alimentarias (Kalman, 2014). Los ingredientes de proteína de arroz se utilizan cada vez más en la nutrición deportiva como complemento de las proteínas de caseína, suero y soja (Amagliani et al., 2017a), como ingrediente de valor añadido en la producción de galletas (Motawei et al., 2022) y de pan (Shin et al., 2010).

Los concentrados de proteína de arroz integral presentan una limitada solubilidad en agua lo que lleva a que su aplicación principal sea en sustitutos de la carne, productos de panadería, cereales para el desayuno y barras proteicas (Shih & Daigle, 2000). La hidrólisis enzimática ayuda a mejorar las propiedades funcionales de la proteína de arroz permitiendo su aplicación

para la producción de sopas, salsas, aderezos ensaladas y bebidas fortificadas (Zang et al., 2019).

Otros concentrados de cereales sin gluten presentes en el mercado son los procedentes de maíz, sorgo, mijo y avena. Estos concentrados son ricos en carbohidratos complejos, proporcionando una fuente sostenida de energía, y también contienen cantidades importantes de proteínas. Además, son una excelente fuente de fibra dietética, que favorece la salud digestiva y contribuye a la sensación de saciedad (Pérez et al., 2010). En términos de sus propiedades funcionales, los concentrados de maíz, sorgo, mijo y avena exhiben capacidades de gelificación, emulsificación y estabilidad. En la práctica, estos concentrados se utilizan en la producción de una amplia gama de productos alimenticios, desde barras energéticas y cereales para el desayuno hasta panes integrales y productos horneados.

2.2.4. Concentrados y aislados de leguminosas

Las legumbres, debido a sus atributos agronómicos y de composición, han despertado un interés considerable (Bekhit et al., 2022). Los concentrados y aislados de legumbres están revolucionando el panorama nutricional, ofreciendo fuentes de proteínas versátiles y sostenibles derivadas de plantas como la soja, los guisantes y las lentejas. Estos productos, con un alto contenido de proteínas, aminoácidos esenciales, fibra y micronutrientes, impulsan el desarrollo de una amplia gama de alimentos de origen vegetal y, al mismo tiempo, satisfacen la creciente demanda de alternativas de origen vegetal (Singh et al., 2021). Desde los concentrados de proteína de soja reconocidos como fuentes completas de proteínas hasta los concentrados de proteína de guisantes apreciados por su sabor neutro y su perfil superior de aminoácidos, los concentrados de leguminosas desempeñan un papel fundamental en la mejora de la calidad nutricional de las dietas basadas en plantas. Además, su cultivo contribuye a la producción sostenible de alimentos al mejorar la fertilidad del suelo, conservar el agua y reducir el impacto ambiental, alineándose con los esfuerzos globales hacia sistemas alimentarios sostenibles (Garnett y Godfray, 2012).

Las legumbres son ricas en proteínas (20-25%) con interesantes propiedades nutricionales y funcionales como una buena solubilidad, capacidad de emulsificación y formación de espuma (Chéreau et al., 2016). Cada vez se reconoce más la importancia de las legumbres como ingredientes funcionales para aplicaciones de alimentos y bebidas, particularmente en el ámbito de los productos sin gluten. Sin embargo, las legumbres también contienen anti-nutrientes como inhibidores de proteínasa/amilasa, ácido fítico, lectinas, taninos, oxalatos y saponinas, que pueden tener efectos tanto deseables como indeseables sobre la salud y la

digestión de proteínas dependiendo de la cantidad ingerida (Boukid et al., 2021). Estos factores se pueden reducir con operaciones comunes de pretratamiento y procesamiento, como descascarado, remojo y cocción.

La proteína de soja, se obtienen como subproducto de la soja tras un proceso de extracción destinado principalmente a obtener aceite de soja (Dhillon, 2016). El alto rendimiento de proteína por hectárea a costos más bajos, junto con la calidad superior de la proteína de soja, la posiciona como una alternativa dietética convincente para abordar los desafíos nutricionales globales (Thrane et al., 2017). No obstante, factores como las limitaciones tecnológicas, las preferencias culturales, los marcos regulatorios y las consideraciones económicas pueden influir en una adopción más amplia de la proteína de soja en la nutrición humana (Henchion et al., 2017).

La soja destaca por su alto contenido en proteína, que suele oscilar entre el 30% y el 45%, llegando algunas variedades hasta el 55%. Las proteínas de soja cumplen diversas funciones biológicas, clasificadas en proteínas de reserva y proteínas metabólicas (Dwevedi & Kayastha, 2011). Las proteínas de reserva, representadas principalmente por globulinas como la glicinina y la conglucina, actúan como fuentes de carbono y nitrógeno durante el crecimiento y desarrollo de las plantas. Por otro lado, las proteínas metabólicas abarcan una variedad de enzimas, proteínas estructurales e inhibidores de enzimas (Carrão-Panizzi et al., 2008). Uno de los desafíos nutricionales clave que aborda la proteína de soja es la desnutrición proteico-energética, particularmente prevalente en los países en desarrollo. Los aislados de proteína de soja, caracterizados por su integridad y alta digestibilidad, ofrecen una valiosa alternativa nutricional, que satisface eficazmente los requisitos de aminoácidos esenciales definidos por organismos autorizados como la FAO/OMS. Si bien la metionina y la cisteína son aminoácidos limitantes en la proteína de soja, los avances en la ingeniería genética han facilitado estrategias para mejorar su contenido en las leguminosas (Gengo, 2015). Además, estudios recientes han demostrado que las proteínas de leguminosas, como la soja, poseen propiedades nutraceuticas que benefician la salud cardiovascular, previenen enfermedades como el cáncer, la obesidad y la diabetes (Barman et al., 2018). Las proteínas de soja presentan unas adecuadas propiedades funcionales. Ejemplos de alimentos enriquecidos con proteínas de soja incluyen pan, galletas, productos lácteos, pastas y productos cárnicos, así como bebidas y mousses enriquecidas (Nasrollahzadeh et al., 2021). Respecto a los factores anti-nutricionales la soja contiene inhibidor de tripsina y lectinas, así como compuestos termoestables como saponinas e isoflavonas. Las técnicas de procesamiento

son esenciales para mitigar los efectos adversos de estos factores antinutricionales y optimizar la digestibilidad y seguridad de los alimentos a base de proteína de soja (Liener, 2019).

El guisante (*Pisum sativum L.*), clasificado como cultivo de estación fría a diferencia de la soja es otra de las legumbres utilizadas para la obtención de concentrados y aislados de proteína. Los guisantes son una de las leguminosas más cultivadas y consumidas en el mundo, y principalmente en Canadá, Francia, China, Rusia y Estados Unidos. Las semillas de guisantes, según el cultivo, suelen tener una composición que comprende aproximadamente entre un 23% y un 31% de proteínas, entre un 60% y un 65% de carbohidratos y entre un 1% y un 2% de grasas. Tiene un alto valor nutricional y un alto contenido de lisina (Maxted & Ambrose, 2001). Este perfil nutricional, junto con sus características únicas, posiciona a la proteína de guisante como una alternativa prometedora a las fuentes de proteína tradicionales como las proteínas animales y la proteína de soja. Entre sus características destaca en primer lugar, su baja alergenicidad lo que lo hace adecuado para personas con sensibilidades o restricciones dietéticas específicas. Además, el estatus no transgénico de la proteína de guisante se alinea con la creciente preferencia de los consumidores por organismos no modificados genéticamente (OGM). También es una buena fuente para producir péptidos bioactivos, que pueden proporcionar actividad antioxidante y actividad inhibidora de la enzima convertidora de angiotensina I (ECA) para lograr efectos beneficiosos en la salud (Roy et al., 2010).

Las proteínas de guisante también ofrecen interesantes propiedades funcionales incluyendo solubilidad, capacidad emulsionante y espumante, y capacidad de formación de gel y película, siendo algunas de ellas similares a las de la proteína de soja (Burger & Zhang, 2019). Sin embargo, la utilización del aislado de proteína de guisante como emulsionante comercial en aplicaciones alimentarias aún es limitada (Burger et al., 2022). Los estudios sobre la formación y estabilidad de la espuma han destacado el papel que factores como la concentración, el tipo y los métodos de procesamiento de proteínas tienen sobre estas propiedades. Por ejemplo, el pH desempeña un papel importante en la modulación de la capacidad de emulsificación de la proteína de guisante (Lu et al., 2020). La solubilidad de la proteína del guisante, afectada por diversos parámetros, incluidos el pH, la temperatura y los métodos de extracción, es fundamental para sus propiedades tecno-funcionales. Las propiedades de gelificación están estrechamente relacionadas con las condiciones de extracción ya que se ve afectada por reacciones de disociación y reordenamiento de proteínas.

Las proteínas de guisantes pueden mejorar el contenido y la funcionalidad de las proteínas

cuando se emplean en la elaboración de diferentes alimentos y bebidas, pero persisten desafíos como el sabor, la textura y las propiedades nutricionales (Boukid et al., 2021). Abordar estos desafíos requiere enfoques innovadores en las técnicas de extracción y producción para lograr los atributos funcionales y organolépticos deseados y, en última instancia, desbloquear todo el potencial de la proteína de guisante en productos personalizados a base de proteínas vegetales (Ge et al., 2020).

2.2.5. Concentrados y aislados de pseudocereales y otras fuentes

Entre los concentrados y aislados de pseudocereales se incluye el amaranto, la quinoa y el trigo sarraceno. Los concentrados y aislados de pseudocereales ofrecen una nutrición excepcional, con un alto contenido de proteínas, aminoácidos esenciales, fibra y micronutrientes. Entre sus propiedades funcionales destacan la capacidad emulsionante y de formación de espuma, impulsan la innovación en productos sin gluten, particularmente en productos de panadería y confitería (Schoenlechner et al., 2008). Los aislados de proteína de quinoa, por ejemplo, han llamado la atención por su perfil equilibrado de aminoácidos, que incluye aminoácidos esenciales, y su digestibilidad (Sánchez-Reséndiz et al., 2019).

Los concentrados y aislados de proteína de cáñamo han surgido como alternativas prometedoras en el ámbito de las fuentes de proteínas de origen vegetal. Derivados de las semillas de la planta de cáñamo (*Cannabis sativa*), estos productos proteicos cuentan con un alto contenido de proteínas, aminoácidos esenciales, fibra y diversos micronutrientes (Shen et al., 2021). La proteína de cáñamo no desgrasada es rica en ácidos grasos esenciales, en particular ácidos grasos n-3 y n-6, lo que mejora aún más su perfil nutricional (Vutukuru, 2021).

Funcionalmente, la proteína de cáñamo exhibe propiedades de emulsificación, formación de espuma y gelificación. Las emulsiones estabilizadas con proteína de cáñamo han mostrado una estabilidad prometedora, mientras que su capacidad espumante permite la creación de texturas aireadas en diversas aplicaciones alimentarias. Además, las propiedades de gelificación de la proteína de cáñamo la hacen adecuada para su uso como aglutinante o agente texturizante en formulaciones alimentarias (Xu et al., 2022). Los concentrados y aislados de proteína de cáñamo encuentran aplicación en una amplia gama de productos, desde alternativas a la carne de origen vegetal hasta bebidas sin lácteos y productos horneados.

BIBLIOGRAFÍA

- Adsare, S. R., & Annapure, U. S. (2023). Partially defatted coconut flour as a functional ingredient in replacement of refined wheat flour for development of fiber rich muffins. *Journal of Food Science and Technology*, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s13197-023-05857-2>
- Aider, M., Sirois-Gosselin, M., & Boye, J. I. (2012). Pea, lentil and chickpea protein application in bread making. *Journal of Food Research*, 1(4), 160. <http://dx.doi.org/10.5539/jfr.v1n4p160>
- Akter, S. (2020). Formulation of gluten-free cake for gluten intolerant individuals and evaluation of nutritional quality. (Doctoral dissertation, Chattogram Veterinary and Animal Sciences University Chattogram-4225, Bangladesh).
- Alcorta, A., Porta, A., Tárrega, A., Alvarez, M. D., & Vaquero, M. P. (2021). Foods for plant-based diets: Challenges and innovations. *Foods*, 10(2), 293. <https://doi.org/10.3390/foods10020293>
- Al-Dmoor, H. M. (2013). Cake flour: functionality and quality. *European Scientific Journal*, 9(3).
- Aleman, R. S., Morris, A., Prinyawiwatkul, W., Moncada, M., & King, J. M. (2022). Physicochemical properties of Frontière rice flour and its application in a gluten-free cupcake. *Cereal Chemistry*, 99(2), 303-315. <https://doi.org/10.1002/cche.10484>
- Ali, W., Ahmad, M. M., Iftikhar, F., Qureshi, M., & Ceyhan, A. (2020). Nutritive potentials of Soybean and its significance for humans' health and animal production: A Review. *Eurasian Journal of Food Science and Technology*, 4(1), 41-53.
- Allaqaband, S., Dar, A. H., Patel, U., Kumar, N., Nayik, G. A., Khan, S. A., ... & Shaikh, A. M. (2022). Utilization of fruit seed-based bioactive compounds for formulating the nutraceuticals and functional food: A review. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1020. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.902554>
- Alotaibi, M. (2023). Climate change, its impact on crop production, challenges, and possible solutions. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 51(1), 13020-13020.
- Alvarez, P. A., & Boye, J. I. (2012). Food production and processing considerations of allergenic food ingredients: a review. *Journal of allergy*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/746125>
- Amagliani, L., O'Regan, J., Kelly, A. L., & O'Mahony, J. A. (2017a). Composition and protein profile analysis of rice protein ingredients. *Journal of Food Composition and Analysis*, 59, 18-26. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2016.12.026>
- Amagliani, L., O'Regan, J., Kelly, A. L., & O'Mahony, J. A. (2017b). The composition, extraction, functionality and applications of rice proteins: A review. *Trends in food science & technology*, 64, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.01.008>
- Amagliani, L., Silva, J. V., Saffon, M., & Dombrowski, J. (2021). On the foaming properties of plant proteins: Current status and future opportunities. *Trends in Food Science & Technology*, 118, 261-272. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.10.001>
- Amjid, M. R., Shehzad, A., Hussain, S., Shabbir, M. A., Khan, M. R., & Shoaib, M. (2013). A comprehensive review on wheat flour dough rheology. *Pakistan Journal of Food Sciences*, 23(2), 105-123.
- Ammann, J., Arbenz, A., Mack, G., Nemecek, T., & El Benni, N. (2023). A review on policy instruments for sustainable food consumption. *Sustainable Production and Consumption*. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.01.012>
- Andreani, G., Sogari, G., Marti, A., Frolidi, F., Dagevos, H., & Martini, D. (2023). Plant-based meat alternatives: technological, nutritional, environmental, market, and social challenges and opportunities. *Nutrients*, 15(2), 452. <https://doi.org/10.3390/nu15020452>
- Arenas-Jal, M., Suñé-Negre, J. M., Pérez-Lozano, P., & García-Montoya, E. (2020). Trends in the food and sports nutrition industry: A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 60(14), 2405-2421. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1643287>
- Arora, K., Tlais, A. Z. A., Augustin, G., Grano, D., Filannino, P., Gobetti, M., & Di Cagno, R. (2023a). Physicochemical, nutritional, and functional characterization of gluten-free ingredients and their impact on the bread texture. *LWT*, 177, 114566. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114566>

- Aschemann-Witzel, J., Gantriis, R. F., Fraga, P., & Perez-Cueto, F. J. (2021). Plant-based food and protein trend from a business perspective: Markets, consumers, and the challenges and opportunities in the future. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(18), 3119-3128. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1793730>
- Atwell, W. A., & Finnie, S. (2016). *Wheat flour*. Elsevier
- Auclair, O., Han, Y., & Burgos, S. A. (2019). Consumption of milk and alternatives and their contribution to nutrient intakes among Canadian adults: evidence from the 2015 Canadian Community Health Survey—Nutrition. *Nutrients*, 11(8), 1948. <https://doi.org/10.3390/nu11081948>
- Aung, M. M., & Chang, Y. S. (2014). Traceability in a food supply chain: Safety and quality perspectives. *Food control*, 39, 172-184. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.11.007>
- Awuchi, C. G., Igwe, V. S., & Echeta, C. K. (2019). The functional properties of foods and flours. *International Journal of Advanced Academic Research*, 5(11), 139-160.
- Ayseli, M. T. (2023). New frontiers in flavor, color, and sweeteners during the post-Covid-19 period: A systematic review. *Trends in Food Science & Technology*, 104144. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104144>
- Bachmann, H. P. (2001). Cheese analogues: a review. *International dairy journal*, 11(4-7), 505-515. [https://doi.org/10.1016/S0958-6946\(01\)00073-5](https://doi.org/10.1016/S0958-6946(01)00073-5)
- Badia-Melis, R., Mishra, P., & Ruiz-García, L. (2015). Food traceability: New trends and recent advances. A review. *Food control*, 57, 393-401. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.05.005>
- Baekelandt, A., Saltenis, V. L., Nacry, P., Malyska, A., Cornelissen, M., Nanda, A. K., ... & Parry, M. A. (2023). Paving the way towards future-proofing our crops. *Food and Energy Security*, 12(3), e441. <https://doi.org/10.1002/fes3.441>
- Bailey, H. M., Fanelli, N. S., & Stein, H. H. (2023). Effect of heat treatment on protein quality of rapeseed protein isolate compared with non-heated rapeseed isolate, soy and whey protein isolates, and rice and pea protein concentrates. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(14), 7251-7259. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12809>
- Bakr, Y., Al-Bloushi, H., & Mostafa, M. (2023). Consumer intention to buy plant-based meat alternatives: A cross-cultural analysis. *Journal of International Consumer Marketing*, 35(4), 420-435. <https://doi.org/10.1080/08961530.2022.2122103>
- Balakrishnan, G., & Schneider, R. G. (2022). The role of Amaranth, quinoa, and millets for the development of healthy, sustainable food products—A concise review. *Foods*, 11(16), 2442. <https://doi.org/10.3390/foods11162442>
- Baldwin, P. M. (2001). Starch granule-associated proteins and polypeptides: A review. *Starch-Stärke*, 53(10), 475-503. [https://doi.org/10.1002/1521-379X\(200110\)53:10%3C475::AID-STAR475%3E3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/1521-379X(200110)53:10%3C475::AID-STAR475%3E3.0.CO;2-E)
- Baljeet, S.Y., Ritika, B.Y., Roshan, L.Y. (2010) Studies on functional properties and incorporation of buckwheat flour for biscuit making. *International Food Research Journal*.;17:1067-1076
- Bao, J. (2022). *Foaming Properties of Dilute Pea Protein Solutions*. Dissertation Thesis University Massachusetts Amherst
- Barak, S., Mudgil, D., & Khatkar, B. S. (2013). Relationship of gliadin and glutenin proteins with dough rheology, flour pasting and bread making performance of wheat varieties. *LWT-Food Science and Technology*, 51(1), 211-217. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.09.011>
- Barman, A., Marak, C. M., Barman, R. M., & Sangma, C. S. (2018). Nutraceutical properties of legume seeds and their impact on human health. In *Legume seed nutraceutical research*. IntechOpen.
- Barone, A. M., & Aschemann-Witzel, J. (2022). Food handling practices and expiration dates: Consumers' perception of smart labels. *Food Control*, 133, 108615. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108615>
- Beck, M., Harvey, J., & Trauth, C. (2017). Veganism: Motivations and Difficulties. *Methodology*, 1, 5.

- Behnke, K., & Janssen, M. F. W. H. A. (2020). Boundary conditions for traceability in food supply chains using blockchain technology. *International Journal of Information Management*, 52, 101969. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.05.025>
- Bekhit, A. E. D. A., Riley, W. W., & Hussain, M. A. (Eds.). (2022). *Alternative Proteins: Safety and Food Security Considerations*. CRC Press.
- Bello, O. B., Ige, S. A., Azeez, M. A., Afolabi, M. S., Abdulmalik, S. Y., & Mahamood, J. (2012). Heritability and genetic advance for grain yield and its component characters in maize (*Zea mays* L.). *International Journal of Plant Research*, 2(5), 138-145. <https://doi.org/10.5923/j.plant.20120205.01>
- Bessada, S. M., Barreira, J. C., & Oliveira, M. B. P. (2019). Pulses and food security: Dietary protein, digestibility, bioactive and functional properties. *Trends in Food Science & Technology*, 93, 53-68. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.08.022>
- Bilgi, B., & Çelik, S. (2004). Solubility and emulsifying properties of barley protein concentrate. *European Food Research and Technology*, 218, 437-441. <https://doi.org/10.1007/s00217-004-0895-4>
- Bilgili, N. (2009). Effect of buckwheat flour on chemical and functional properties of tarhana. *Food Science and Technology*, 42:514-518. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.09.006>
- Binou, P., Yanni, A. E., & Karathanos, V. T. (2022). Physical properties, sensory acceptance, postprandial glycemic response, and satiety of cereal based foods enriched with legume flours: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(10), 2722-2740. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1858020>
- Bocevska, M., Aldabas, I., Andreevska, D., & Ilieva, V. (2009). Gelatinization behavior of grains and flour in relation to physico-chemical properties of milled rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of food quality*, 32(1), 108-124. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2008.00239.x>
- Borgmeier, I., & Westenhoefer, J. (2009). Impact of different food label formats on healthiness evaluation and food choice of consumers: a randomized-controlled study. *BMC public health*, 9(1), 1-12. <https://doi.org/10.1186/1471-2458-9-18>
- Borit, M. (2016). Legal requirements for food traceability in the European Union. In *Advances in food traceability techniques and technologies* (pp. 225-235). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100310-7.00012-0>
- Bou, R., Navarro-Vozmediano, P., Domínguez, R., López-Gómez, M., Pinent, M., Ribas-Agustí, A., ... & Jorba-Martín, R. (2022). Application of emerging technologies to obtain legume protein isolates with improved techno-functional properties and health effects. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(3), 2200-2232. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12936>
- Boukid, F., Rosell, C. M., & Castellari, M. (2021). Pea protein ingredients: A mainstream ingredient to (re) formulate innovative foods and beverages. *Trends in Food Science & Technology*, 110, 729-742. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.040>
- Boye, J. I., Aksay, S., Roufik, S., Ribéreau, S., Mondor, M., Farnworth, E., & Rajamohamed, S. H. (2010b). Comparison of the functional properties of pea, chickpea and lentil protein concentrates processed using ultrafiltration and isoelectric precipitation techniques. *Food Research International*, 43(2), 537-546. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.07.021>
- Boye, J., Zare, F., & Pletch, A. (2010a). Pulse proteins: Processing, characterization, functional properties and applications in food and feed. *Food research international*, 43(2), 414-431. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.09.003>
- Bravi, E., Sileoni, V., & Marconi, O. (2024). Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) as Functional Ingredient for the Formulation of Gluten-Free Shortbreads. <https://doi.org/10.20944/preprints202401.0221.v1>
- Bressiani, J., Oro, T., Santetti, G. S., Almeida, J. L., Bertolin, T. E., Gómez, M., & Gutkoski, L. C. (2017). Properties of whole grain wheat flour and performance in bakery products as a function of particle size. *Journal of Cereal Science*, 75, 269-277. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.05.001>
- Brito, I. L., de Souza, E. L., Felex, S. S. S., Madruga, M. S., Yamashita, F., & Magnani, M.

(2015). Nutritional and sensory characteristics of gluten-free quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd)-based cookies development using an experimental mixture design. *Journal of Food Science and Technology*, 52, 5866-5873. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1659-1>

Broucke, K., Van Pamel, E., Van Coillie, E., Herman, L., & Van Royen, G. (2023). Cultured meat and challenges ahead: A review on nutritional, technofunctional and sensorial properties, safety and legislation. *Meat science*, 195, 109006. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2022.109006>

Brückner-Gühmann, M., Kratzsch, A., Sozer, N., & Drusch, S. (2021). Oat protein as plant-derived gelling agent: Properties and potential of modification. *Future Foods*, 4, 100053. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100053>

Bryant, C., & Barnett, J. (2020). Consumer acceptance of cultured meat: an updated review (2018–2020). *Applied Sciences*, 10(15), 5201. <https://doi.org/10.3390/app10155201>

Burger, T. G., & Zhang, Y. (2019). Recent progress in the utilization of pea protein as an emulsifier for food applications. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.007>

Burger, T. G., Singh, I., Mayfield, C., Baumert, J. L., & Zhang, Y. (2022). Comparison of physicochemical and emulsifying properties of commercial pea protein powders. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(6), 2506-2514. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11592>

Cabanillas, B. (2020). Gluten-related disorders: Celiac disease, wheat allergy, and nonceliac gluten sensitivity. Critical reviews in food science and nutrition, 60(15), 2606-2621. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1651689>

Caliskan, A., Abdullah, N., & Ishak, N. (2020). Chemical properties of left over coconut pulp gluten free flour. *Asian Journal of Arts, Culture and Tourism*, 2(2), 33-43.

Cameron, D. K., & Wang, Y. J. (2005). A better understanding of factors that affect the hardness and stickiness of long-grain rice. *Cereal Chemistry*, 82(2), 113-119. <https://doi.org/10.1094/CC-82-0113>

Caminero, A., & Verdu, E. F. (2019). Metabolism of wheat proteins by intestinal microbes: Implications for wheat related disorders. *Gastroenterología y Hepatología (English edition)*, 42(7), 449-457. <https://doi.org/10.1016/j.gastre.2019.04.001>

Carrão-Panizzi, M. C., Kwanyuen, P., Erhan, S. Z., & Lopes, I. D. O. N. (2008). Genetic variation and environmental effects on beta-conglycinin and glycinin content in Brazilian soybean cultivars. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 43, 1105-1114. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000900002>

Carreno, I., & Dolle, T. (2018). Tofu steaks? Developments on the naming and marketing of plant-based foods in the aftermath of the TofuTown judgement. *European Journal of Risk Regulation*, 9(3), 575-584. <https://doi.org/10.1017/err.2018.43>

Catassi, C., Bai, J. C., Bonaz, B., Bouma, G., Calabrò, A., Carroccio, A., ... & Fasano, A. (2013). Non-celiac gluten sensitivity: the new frontier of gluten related disorders. *Nutrients*, 5(10), 3839-3853. <https://doi.org/10.3390/nu5103839>

Chandel, R., Raj, R., Kaur, A., Singh, K., & Kataria, S. K. (2024). Energy and yield optimization of field and vegetable crops in heavy crop residue for Indian conditions-climate smart techniques for food security. *Energy*, 287, 129555. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129555>

Chang, C., Tu, S., Ghosh, S., & Nickerson, M. T. (2015). Effect of pH on the inter-relationships between the physicochemical, interfacial and emulsifying properties for pea, soy, lentil and canola protein isolates. *Food Research International*, 77, 360-367. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.08.012>

Chauhan, A., Saxena, D.C., Singh, S. (2016). Physical, textural, and sensory characteristics of wheat and amaranth flour blend cookies. *Cogent Food and Agriculture*. 2:1-8. <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1125773>

Chávez-jáuregui RN, Santos RD, Macedo A, Chacra APM, Martinez TL, Arêas JAG. Effects of defatted amaranth (*Amaranthus caudatus*L.) snacks on lipid metabolism of patients with moderate hypercholesterolemia. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*. 2008;30:1007-1010.

<https://doi.org/10.1590/S0101-20612010000400026>

Cheney, D. (2016). *The New Milks: 100-Plus Dairy-Free Recipes for Making and Cooking with Soy, Nut, Seed, Grain, and Coconut Milks*. Simon and Schuster.

Cheng, A. (2018). Shaping a sustainable food future by rediscovering long-forgotten ancient grains. *Plant Science*, 269, 136-142. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2018.01.018>

Cheng, Z., Qiao, D., Zhao, S., Zhang, B., Lin, Q., & Xie, F. (2022). Whole grain rice: Updated understanding of starch digestibility and the regulation of glucose and lipid metabolism. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(4), 3244-3273. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12985>

Chéreau, D., Videcoq, P., Ruffieux, C., Pichon, L., Motte, J. C., Belaid, S., ... & Lopez, M. (2016). Combination of existing and alternative technologies to promote oilseeds and pulses proteins in food applications. *OCL*, 23(4), D406. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11592>

Chiffolleau, Y., & Dourian, T. (2020). Sustainable food supply chains: is shortening the answer? A literature review for a research and innovation agenda. *Sustainability*, 12(23), 9831. <https://doi.org/10.3390/su12239831>

Chu, Y. (Ed.). (2013). *Oats nutrition and technology*. John Wiley & Sons.

Clark, W., & Harley, A. (2019). *Sustainability science: Towards a synthesis*. Sustainability Science Program Working Papers.

Colombo, F., Di Lorenzo, C., Biella, S., Bani, C., & Restani, P. (2021). Ancient and modern cereals as ingredients of the gluten-free diet: are they safe enough for celiac consumers? *Foods*, 10(4), 906. <https://doi.org/10.3390/foods10040906>

Corallo, A., Latino, M. E., Menegoli, M., & Pizzi, R. (2021). Assuring effectiveness in consumer-oriented traceability; suggestions for food label design. *Agronomy*, 11(4), 613. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040613>

Craig, W. J., & Mangels, A. R. (2009). Position of the American Dietetic Association: vegetarian diets. *Journal of the American dietetic association*, 109(7), 1266.

Crosser, N. (2020). *Plant-Based Meat, Eggs, and Dairy: 2019 US State of the Industry Report*. Good Food Institute, 1-72.

Dagevos H. (2021) Finding flexitarians: Current studies on meat eaters and meat reducers. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 530- 39, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.021>

Dagevos, H., & Voordouw, J. (2013). Sustainability and meat consumption: is reduction realistic?. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 9(2), 60-69. <https://doi.org/10.1080/15487733.2013.1190811>

Dahlberg, J. A., Wilson, J. P., & Snyder, T. (2003). Sorghum and pearl millet: health foods and industrial products in developed countries. *Alternative uses of sorghum and pearl millet in Asia*, 12(3), 42-54.

Damodaran, S. (2005). Protein stabilization of emulsions and foams. *Journal of food science*, 70(3), R54-R66. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb07150.x>

Davey, G. K., Spencer, E. A., Appleby, P. N., Allen, N. E., Knox, K. H., & Key, T. J. (2003). EPIC-Oxford: lifestyle characteristics and nutrient intakes in a cohort of 33 883 meat-eaters and 31 546 non meat-eaters in the UK. *Public health nutrition*, 6(3), 259-268 <https://doi.org/10.1079/PHN2002430>

de la Hera Aguado, E. (2013). *Influencia de las propiedades físicas de harinas de cereales sin gluten en la digestibilidad y los parámetros de calidad de panes y bizcochos* (Doctoral dissertation, Universidad de Valladolid).

Demir, M.K. (2014) Use of quinoa flour in the production of gluten-free tarhana. *Food Science and Technology Research*. 20:1087-1092. <https://doi.org/10.3136/fstr.20.1087>

Derbyshire, E. J. (2017). Flexitarian diets and health: a review of the evidence-based literature. *Frontiers in nutrition*, 3, 55. <https://doi.org/10.3389/fnut.2016.00055>

- Dhillon, G. S. (2016). *Protein byproducts: transformation from environmental burden into value-added products*. Academic Press.
- Di Cairano, M., Tolve, R., Cela, N., Sportiello, L., Scarpa, T., & Galgano, F. (2022). Functional Cereal-Based Bakery Products, Breakfast Cereals, and Pasta Products. In *Functional Cereals and Cereal Foods: Properties, Functionality and Applications* (pp. 215-249). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-05611-6_9
- Dinu, M., Pagliai, G., & Sofi, F. (2017). A heart-healthy diet: recent insights and practical recommendations. *Current cardiology reports*, 19, 1-7. <https://doi.org/10.1007/s11886-017-0908-0>
- Du, S. K., Jiang, H., Yu, X., & Jane, J. L. (2014). Physicochemical and functional properties of whole legume flour. *LWT-Food Science and Technology*, 55(1), 308-313. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.06.001>
- Dupont, C., Bocquet, A., Tomé, D., Bernard, M., Campeotto, F., Dumond, P., ... & Kalach, N. (2020). Hydrolyzed rice protein-based formulas, a vegetal alternative in cow's milk allergy. *Nutrients*, 12(9), 2654. <https://doi.org/10.3390/nu12092654>
- Dwevedi, A., & Kayastha, A. M. (2011). Soybean: a multifaceted legume with enormous economic capabilities. *Soybean—biochemistry, chemistry and physiology*. InTech Publisher, Janeza Trdine, Croatia, 165-188.
- Edwards, L. (2012). Vegetarians and vegans. *Nutrition*, 14(3).
- Edwards, W. P. (2007). *The science of bakery products*. Royal Society of chemistry.
- El Khoury, D., Balfour-Ducharme, S., & Joye, I. J. (2018). A review on the gluten-free diet: Technological and nutritional challenges. *Nutrients*, 10(10), 1410. <https://doi.org/10.3390/nu10101410>
- Ellis, A. L., & Lazidis, A. (2018). Foams for food applications. *Polymers for Food Applications*, 271-327. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94625-2_11
- Eshel, G., & Martin, P. A. (2006). Diet, energy, and global warming. *Earth interactions*, 10(9), 1-17. <https://doi.org/10.1175/EI167.1>
- Espiñeira, M., & Santaclara, F. J. (Eds.). (2016). *Advances in food traceability techniques and technologies: improving quality throughout the food chain*. Woodhead Publishing.
- Fabjan, N., Rode, J., Kosir, J.I., Wang, Z., Zhang, Z., Kreft, I. (2003). Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* Gaertn.) as a source of dietary rutin and quercitrin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51:6542-6455. <https://doi.org/10.1021/jf034543e>
- Fan, L., Liu, Y., Huang, S., & Li, J. (2022). Effects of proteins on emulsion stability: The role of proteins at the oil–water interface. *Food Chemistry*, 133726. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133726>
- Farnworth, E. R., Mainville, I., Desjardins, M. P., Gardner, N., Fliss, I., & Champagne, C. (2007). Growth of probiotic bacteria and bifidobacteria in a soy yogurt formulation. *International journal of food microbiology*, 116(1), 174-181. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2006.12.015>
- Fasolin, L. H., Pereira, R. N., Pinheiro, A. C., Martins, J. T., Andrade, C. C. P., Ramos, O. L., & Vicente, A. A. (2019). Emergent food proteins—Towards sustainability, health and innovation. *Food Research International*, 125, 108586. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108586>
- Fehér, A., Gazdecki, M., Véha, M., Szakály, M., & Szakály, Z. (2020). A Comprehensive Review of the Benefits of and the Barriers to the Switch to a Plant-Based Diet. *Sustainability*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/su12104136>
- Filipčev, B., Šimurina, O., Sakač, M., Sedej, I., Jovanov, P., Pestorić, M., Bodroza-Solarov, M. (2011). Feasibility of use of buckwheat flour as an ingredient in ginger nut biscuit formulation. *Food Chemistry*, 125:164-170. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.08.055>
- Fischer, N. M., Pallazola, V. A., Xun, H., Cainzos-Achirica, M., & Michos, E. D. (2020). The evolution of the heart-healthy diet for vascular health: a walk through time. *Vascular Medicine*, 25(2), 184-193. <https://doi.org/10.1177/1358863X19901287>
- Fleming, A. (2018). *Go Dairy Free: The Ultimate Guide and Cookbook for Milk Allergies, Lactose Intolerance, and Casein-free Living*. BenBella Books.

Flysjö, A. M. (2012). Greenhouse gas emissions in milk and dairy product chains: Improving the carbon footprint of dairy products.

Foegeding, E. A., & Davis, J. P. (2011). Food protein functionality: A comprehensive approach. *Food hydrocolloids*, 25(8), 1853-1864. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.05.008>

Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., ... & Zaks, D. P. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369), 337-342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>

Foschia, M., Horstmann, S. W., Arendt, E. K., & Zannini, E. (2017). Legumes as functional ingredients in gluten-free bakery and pasta products. *Annual review of food science and technology*, 8, 75-96. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030216-030045>

Fox, N., & Ward, K. (2008). Health, ethics and environment: A qualitative study of vegetarian motivations. *Appetite*, 50(2-3), 422-429. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2007.09.007>

Fox, P. F., Guinee, T. P., Cogan, T. M., McSweeney, P. L., Fox, P. F., Guinee, T. P., ... & McSweeney, P. L. (2017). Processed cheese and substitute/imitation cheese products. *Fundamentals of cheese science*, 589-627.

Francois, G., Fabrice, V., & Didier, M. (2020). Traceability of fruits and vegetables. *Phytochemistry*, 173, 112291. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2020.112291>

Fresán, U., Martínez-González, M. A., Sabaté, J., & Bes-Rastrollo, M. (2019). Global sustainability (health, environment and monetary costs) of three dietary patterns: results from a Spanish cohort (the SUN project). *BMJ open*, 9(2), e021541. <http://dx.doi.org/10.1136/bmjopen-2018-021541>

Fuentes, C., & Fuentes, M. (2017). Making a market for alternatives: Marketing devices and the qualification of a vegan milk substitute. *Journal of Marketing Management*, 33(7-8), 529-555. <https://doi.org/10.1080/0267257X.2017.1328456>

Fuentes-Zaragoza, E., Riquelme-Navarrete, M. J., Sánchez-Zapata, E., & Pérez-Álvarez, J. A. (2010). Resistant starch as functional ingredient: A review. *Food Research International*, 43(4), 931-942. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.02.004>

Gajula, H. (2017). Effect of wheat bran on gluten network formation as studied through dough development, dough rheology and bread microstructure. Kansas State University.

Garba, U., & Kaur, S. (2014). Protein isolates: Production, functional properties and application. *International journal of current research and review*, 6(3), 35.

Garnett, E. E., Balmford, A., Sandbrook, C., Pilling, M. A., & Marteau, T. M. (2019). Impact of increasing vegetarian availability on meal selection and sales in cafeterias. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(42), 20923-20929. <https://doi.org/10.1073/pnas.1907207116>

Garnett, T., & Godfray, C. (2012). Sustainable intensification in agriculture. Navigating a course through competing food system priorities. *Food climate research network and the Oxford Martin programme on the future of food*, University of Oxford, UK, 51.

Ge, H., Yao, Y., & Yu, J. (2019). Study on temperature sensitive characteristics of UHF radio frequency identification temperature sensing tag. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 84, 107-113. <http://dx.doi.org/10.2528/PIERL19032604>

Ge, J., Sun, C. X., Corke, H., Gul, K., Gan, R. Y., & Fang, Y. (2020). The health benefits, functional properties, modifications, and applications of pea (*Pisum sativum* L.) protein: Current status, challenges, and perspectives. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(4), 1835-1876. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12573>

Gemedé, H. F. (2020). Nutritional and antinutritional evaluation of complementary foods formulated from maize, pea, and anchote flours. *Food Science & Nutrition*, 8(4), 2156-2164. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1516>

Gengo, f. B. (2015). *Evaluation of nutritional quality, physicochemical properties and sensory attributes of four soybean varieties grown in western Kenya* (Doctoral dissertation, University of Eldoret). <http://41.89.164.27:8080/xmlui/handle/123456789/1167>

Giacalone, D., Clausen, M. P., & Jaeger, S. R. (2022). Understanding barriers to consumption of

plant-based foods and beverages: insights from sensory and consumer science. *Current Opinion in Food Science*, 100919. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100919>

Giusti, A. M., Bignetti, E., & Cannella, C. (2008). Exploring new frontiers in total food quality definition and assessment: From chemical to neurochemical properties. *Food and Bioprocess Technology*, 1, 130-142. <https://doi.org/10.1007/s11947-007-0043-9>

Godfray, H. C. J., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Nisbett, N., ... & Whiteley, R. (2010). The future of the global food system. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 2769-2777. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0180>

Goldstein, N., & Reifen, R. (2022). The potential of legume-derived proteins in the food industry. *Grain & Oil Science and Technology*, 5(4), 167-178. <https://doi.org/10.1016/j.gaost.2022.06.002>

Gómez, M., & Martínez, M. M. (2016). Changing flour functionality through physical treatments for the production of gluten-free baking goods. *Journal of Cereal Science*, 67, 68-74. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.07.009>

Gómez, M., Oliete, B., Rosell, C. M., Pando, V., & Fernández, E. (2008). Studies on cake quality made of wheat-chickpea flour blends. *LWT-Food Science and Technology*, 41(9), 1701-1709. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.11.024>

Gómez, M., Pardo, J., Oliete, B., & Caballero, P. A. (2009). Effect of the milling process on quality characteristics of rye flour. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89(3), 470-476. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3475>

Grant, C. A., & Hicks, A. L. (2018). Comparative life cycle assessment of milk and plant-based alternatives. *Environmental Engineering Science*, 35(11), 1235-1247. <https://doi.org/10.1089/ees.2018.0233>

Grasso, N., Lynch, N. L., Arendt, E. K., & O'Mahony, J. A. (2022). Chickpea protein ingredients: A review of composition, functionality, and applications. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 21(1), 435-452. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12878>

Graziano, S., Agrimonti, C., Marmiroli, N., & Gulli, M. (2022). Utilisation and limitations of pseudocereals (quinoa, amaranth, and buckwheat) in food production: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 125, 154-165. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.007>

Grossmann, L., & McClements, D. J. (2021). The science of plant-based foods: Approaches to create nutritious and sustainable plant-based cheese analogs. *Trends in Food Science & Technology*, 118, 207-229. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.10.004>

Guiné, R. P., Florença, S. G., Barroca, M. J., & Anjos, O. (2021). The duality of innovation and food development versus purely traditional foods. *Trends in food science & technology*, 109, 16-24. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.010>

Gurusamy, S., Vidhya, C. S., Khasherao, B. Y., & Shanmugam, A. (2022). Pulses for health and their varied ways of processing and consumption in India-a review. *Applied Food Research*, 100171. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100171>

Haddad, E. H., & Tanzman, J. S. (2003). What do vegetarians in the United States eat?. *The American journal of clinical nutrition*, 78(3), 626S-632S.

Hager, A. S., Wolter, A., Czerny, M., Bez, J., Zannini, E., Arendt, E. K., & Czerny, M. (2012). Investigation of product quality, sensory profile and ultrastructure of breads made from a range of commercial gluten-free flours compared to their wheat counterparts. *European Food Research and Technology*, 235, 333-344. <https://doi.org/10.1007/s00217-012-1763-2>

Hallström, E., Davis, J., Håkansson, N., Ahlgren, S., Åkesson, A., Wolk, A., & Sonesson, U. (2022). Dietary environmental impacts relative to planetary boundaries for six environmental indicators—A population-based study. *Journal of Cleaner Production*, 373, 133949. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133949>

Hallström, E., Davis, J., Woodhouse, A., & Sonesson, U. (2018). Using dietary quality scores to assess sustainability of food products and human diets: a systematic review. *Ecological indicators*, 93, 219-230. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.071>

- Hansen, L., Bu, F., & Ismail, B. P. (2022). Structure-function guided extraction and scale-up of pea protein isolate production. *Foods*, 11(23), 3773. <https://doi.org/10.3390/foods11233773>
- Hargreaves, S. M., Rosenfeld, D. L., Moreira, A. V. B., & Zandonadi, R. P. (2023). Plant-based and vegetarian diets: An overview and definition of these dietary patterns. *European journal of nutrition*, 62(3), 1109-1121. <https://doi.org/10.1007/s00394-023-03086-z>
- Harland, J., & Garton, L. (2016). An update of the evidence relating to plant-based diets and cardiovascular disease, type 2 diabetes and overweight. *Nutrition Bulletin*, 41(4), 323-338. <https://doi.org/10.1111/nbu.12235>
- Haroon, A., Basharat, M., Khattak, A. M., & Ejaz, W. (2019, October). Internet of things platform for transparency and traceability of food supply chain. In 2019 IEEE 10th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON) (pp. 0013-0019). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEMCON.2019.8936158>
- Harper, A. R., Dobson, R. C., Morris, V. K., & Moggré, G. J. (2022). Fermentation of plant-based dairy alternatives by lactic acid bacteria. *Microbial Biotechnology*, 15(5), 1404-1421. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14008>
- Hatanaka, M., Bain, C., & Busch, L. (2005). Third-party certification in the global agrifood system. *Food policy*, 30(3), 354-369. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2005.05.006>
- Hayward, L., & McSweeney, M. B. (2020). Acceptability of bread made with hemp (*Cannabis sativa* subsp. *sativa*) flour evaluated fresh and following a partial bake method. *Journal of Food Science*, 85(9), 2915-2922. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15372>
- Heertje, I. (2014). Structure and function of food products: A review. *Food structure*, 1(1), 3-23. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2013.06.001>
- Henchion, M. M., De Backer, C. J., Hudders, L., & O'Reilly, S. (2022). Ethical and sustainable aspects of meat production; consumer perceptions and system credibility. In *New aspects of meat quality* (pp. 829-851). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85879-3.00001-5>
- Henchion, M., Hayes, M., Mullen, A. M., Fenelon, M., & Tiwari, B. (2017). Future protein supply and demand: strategies and factors influencing a sustainable equilibrium. *Foods*, 6(7), 53. <https://doi.org/10.3390/foods6070053>
- Hever, J. (2014). *The Vegeterranean Diet: The New and Improved Mediterranean Eating Plan--with Deliciously Satisfying Vegan Recipes for Optimal Health*. Hachette UK.
- Hill, H. (2022). Utilization of dry beans and other pulses as ingredients in diverse food products. *Dry beans and pulses: Production, processing, and nutrition*, 307-329. <https://doi.org/10.1002/9781119776802.ch12>
- Hobbs, J. E. (2006). Traceability in the agri-food sector: issues, insights and implications. *CABI Reviews*, (2006), 7-pp. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR20061029>
- Hoehnel, A., Zannini, E., & Arendt, E. K. (2022). Targeted formulation of plant-based protein-foods: Supporting the food system's transformation in the context of human health, environmental sustainability and consumer trends. *Trends in Food Science & Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.08.007>
- Hoogenkamp, H., Kumagai, H., & Wanasundara, J. P. D. (2017). Rice protein and rice protein products. In *Sustainable protein sources* (pp. 47-65). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802778-3.00003-2>
- Hoogland, C. T., de Boer, J., & Boersema, J. J. (2007). Food and sustainability: do consumers recognize, understand and value on-package information on production standards?. *Appetite*, 49(1), 47-57. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2006.11.009>
- Hopkin, L., Broadbent, H., & Ahlborn, G. J. (2022). Influence of almond and coconut flours on Ketogenic, Gluten-Free cupcakes. *Food chemistry: X*, 13, 100182. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2021.100182>
- Hussain, M. I., Farooq, M., Muscolo, A., & Rehman, A. (2020). Crop diversification and saline water irrigation as potential strategies to save freshwater resources and reclamation of marginal soils—A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(23), 28695-28729.

<https://doi.org/10.1007/s11356-020-09111-6>

IPCC (2019). Global warming of 1.5°C. Summary for Policy Makers. Switzerland: World Meteorological Organization, United Nations Environment Program, and Intergovernmental Panel on Climate Change. Bern

Ismail, I., Hwang, Y. H., & Joo, S. T. (2020). Meat analog as future food: A review. *Journal of animal science and technology*, 62(2), 111. <https://doi.org/10.5187%2Fjast.2020.62.2.111>

Jancurová, M., Minarovicová, L., Dandar, A. (2009). Quinoa—a review. *Czech Journal of Food Sciences*. 27:71-79

Jennings, R., Henderson, A. D., Phelps, A., Janda, K. M., & van den Berg, A. E. (2023). Five US Dietary Patterns and Their Relationship to Land Use, Water Use, and Greenhouse Gas Emissions: Implications for Future Food Security. *Nutrients*, 15(1), 215. <https://doi.org/10.3390/nu15010215>

Jeske, S., Zannini, E., & Arendt, E. K. (2018). Past, present and future: The strength of plant-based dairy substitutes based on gluten-free raw materials. *Food research international*, 110, 42-51. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.03.045>

Jideani, V. A. (2011). Functional properties of soybean food ingredients in food systems. *Soybean-Biochemistry, chemistry and physiology*, 345-366.

Johnsen, T., Howard, M., & Miemczyk, J. (2018). Purchasing and supply chain management: A sustainability perspective. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315160245>

Joy, M. (2010). Why we love dogs, eat pigs, and wear cows: An introduction to carnism. Red Wheel.

Juan, W., Yamini, S., & Britten, P. (2015). Food intake patterns of self-identified vegetarians among the US population, 2007-2010. *Procedia Food Science*, 4, 86-93. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2015.06.013>

Kaack, K., & Pedersen, L. (2005). Application of by-products from industrial processing of potato flour and yellow peas as ingredients in low-fat high-fibre sausages. *European Food Research and Technology*, 221, 313-319. <https://doi.org/10.1007/s00217-005-1167-7>

Kadan, R. S., Robinson, M. G., Thibodeaux, D. P., & Pepperman Jr, A. B. (2001). Texture and other physicochemical properties of whole rice bread. *Journal of food science*, 66(7), 940-944. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2001.tb08216.x>

Kalman, D. S. (2014). Amino acid composition of an organic brown rice protein concentrate and isolate compared to soy and whey concentrates and isolates. *Foods*, 3(3), 394-402. <https://doi.org/10.3390/foods3030394>

Kamath, R., Basak, S., & Gokhale, J. (2022). Recent trends in the development of healthy and functional cheese analogues—a review. *LWT*, 155, 112991. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112991>

Khoddami, A., Messina, V., Vadabali Venkata, K., Farahnaky, A., Blanchard, C. L., & Roberts, T. H. (2023). Sorghum in foods: Functionality and potential in innovative products. *Critical reviews in food science and nutrition*, 63(9), 1170-1186. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1960793>

Koos, S. (2011). Varieties of environmental labelling, market structures, and sustainable consumption across Europe: A comparative analysis of organizational and market supply determinants of environmental-labelled goods. *Journal of Consumer Policy*, 34, 127-151. <https://doi.org/10.1007/s10603-010-9153-2>

Kraig, B., & Sen, C. T. (Eds.). (2013). Street food around the world: an encyclopedia of food and culture. Bloomsbury Publishing USA.

Krebber, E. (2017). Low Sugar, So Simple: 100 Delicious Low-Sugar, Low-Carb, Gluten-Free Recipes for Eating Clean and Living Healthy. Fair Winds Press

Kristo, E., & Corredig, M. (2014). Functional properties of food proteins. *Applied food protein chemistry*, 47-73. <https://doi.org/10.1002/9781118860588.ch5>

Kuesten, C., & Hu, C. (2020). Functional foods and protein supplementation. *Handbook of eating and drinking: Interdisciplinary perspectives*, 941-964. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14504-0_175

- Kumar, M., Tomar, M., Potkule, J., Punia, S., Dhakane-Lad, J., Singh, S., ... & Kennedy, J. F. (2022b). Functional characterization of plant-based protein to determine its quality for food applications. *Food Hydrocolloids*, 123, 106986. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106986>
- Kumar, M., Tomar, M., Punia, S., Dhakane-Lad, J., Dhumal, S., Changan, S., ... & Kennedy, J. F. (2022a). Plant-based proteins and their multifaceted industrial applications. *Lwt*, 154, 112620. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112620>
- Kumar, P., Chatli, M. K., Mehta, N., Singh, P., Malav, O. P., & Verma, A. K. (2017). Meat analogues: Health promising sustainable meat substitutes. Critical reviews in food science and nutrition, 57(5), 923-932. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.939739>
- Kumar, S., Kumar, V., Sharma, R., Paul, A. A., Suthar, P., & Saini, R. (2020). Plant proteins as healthy, sustainable and integrative meat alternates. In *Veganism-a Fashion Trend or Food as a Medicine*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.94094>
- Kussmann, M., Cunha, D. H. A., & Berciano, S. (2023). Bioactive compounds for human and planetary health. *Frontiers in Nutrition*, 10. <https://doi.org/10.3389%2Ffnut.2023.1193848>
- Kyriacou, M. C., & Roupheal, Y. (2018). Towards a new definition of quality for fresh fruits and vegetables. *Scientia Horticulturae*, 234, 463-469. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.09.046>
- Kyriakopoulou, K., Dekkers, B., & van der Goot, A. J. (2019). Plant-based meat analogues. In *Sustainable meat production and processing* (pp. 103-126). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814874-7.00006-7>
- Laestadius, L. I., & Wolfson, J. A. (2019). Unsustainable societal demands on the food system. In *Environmental Nutrition* (pp. 75-100). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811660-9.00005-9>
- Lai, H. M., & Lin, T. C. (2006). 148 Bakery Products. *Handbook of Food Science, Technology, and Engineering*, 149(1).
- Laleg, K., Cassan, D., Barron, C., Prabhasankar, P., & Micard, V. (2016). Structural, culinary, nutritional and anti-nutritional properties of high protein, gluten free, 100% legume pasta. *PLoS One*, 11(9), e0160721. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160721>
- Larceneux, F., Benoit-Moreau, F., & Renaudin, V. (2012). Why might organic labels fail to influence consumer choices? Marginal labelling and brand equity effects. *Journal of Consumer Policy*, 35, 85-104. <https://doi.org/10.1007/s10603-011-9186-1>
- Latino, M. E., Menegoli, M., Lazoi, M., & Corallo, A. (2022). Voluntary traceability in food supply chain: a framework leading its implementation in Agriculture 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 178, 121564. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121564>
- Lazaridou, A., & Biliaderis, C. G. (2007). Molecular aspects of cereal β -glucan functionality: Physical properties, technological applications and physiological effects. *Journal of cereal science*, 46(2), 101-118. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.05.003>
- Le, L. T., & Sabaté, J. (2014). Beyond meatless, the health effects of vegan diets: findings from the Adventist cohorts. *Nutrients*, 6(6), 2131-2147. <https://doi.org/10.3390/nu6062131>
- Lea, E., & Worsley, A. (2001). Influences on meat consumption in Australia. *Appetite*, 36(2), 127-136. <https://doi.org/10.1006/appe.2000.0386>
- Lehtinen, U. (2011). Traceability in Agrifood Chains. *Intelligent agrifood chains and networks*, 151-166.
- León, A. E., Rosell, C. M., Gómez Pallarés, M., Brites, C., Haros, M., Trigo, M. J., ... & Benedito Mengod, C. (2007). De tales harinas, tales panes. Granos, harinas y productos de panificación en Iberoamérica. ISEKI-Food.
- Li, G. H., Qu, M. R., Wan, J. Z., & You, J. M. (2007). Antihypertensive effect of rice protein hydrolysate with in vitro angiotensin I-converting enzyme inhibitory activity in spontaneously hypertensive rats. *Asia Pac J Clin Nutr*, 16(Suppl 1), 275-280.
- Li, M., Hou, X., Lin, L., Jiang, F., Qiao, D., & Xie, F. (2023). Legume protein/polysaccharide food hydrogels: Preparation methods, improvement strategies and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 125217.

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125217>

Liener, I. E. (2019, December). Anti-nutritional factors as determinants of soybean quality. In *World Soybean Research Conference II* (pp. 703-712). CRC Press.

Lima, R. R., Stephani, R., Perrone, Í. T., & de Carvalho, A. F. (2023). Plant-based proteins: A review of factors modifying the protein structure and affecting emulsifying properties. *Food Chemistry Advances*, 100397. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100397>

Liu, J., Chriki, S., Kombolo, M., Santinello, M., Pflanzner, S. B., Hocquette, É., ... & Hocquette, J. F. (2023). Consumer perception of the challenges facing livestock production and meat consumption. *Meat Science*, 200, 109144. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2023.109144>

Liu, K. (2012). *Soybeans: chemistry, technology, and utilization*. Springer.

Liu, K., Zheng, J., & Chen, F. (2021). Heat-induced changes in the physicochemical properties and in vitro digestibility of rice protein fractions. *Journal of Food Science and Technology*, 58, 1368-1377. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04648-3>

Liu, Q. (2005). Understanding starches and their role in foods. *Food carbohydrates: Chemistry, physical properties and applications*, 340.

Lobell, D. B., & Gourdji, S. M. (2012). The influence of climate change on global crop productivity. *Plant physiology*, 160(4), 1686-1697. <https://doi.org/10.1104/pp.112.208298>

Lonnie, M., Laurie, I., Myers, M., Horgan, G., Russell, W. R., & Johnstone, A. M. (2020). Exploring health-promoting attributes of plant proteins as a functional ingredient for the food sector: a systematic review of human interventional studies. *Nutrients*, 12(8), 2291. <https://doi.org/10.3390/nu12082291>

Loubes, M. A., & Tolaba, M. P. (2014). Thermo-mechanical rice flour modification by planetary ball milling. *LWT-Food Science and Technology*, 57(1), 320-328. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.12.048>

Loughnan, S., Haslam, N., & Bastian, B. (2010). The role of meat consumption in the denial of moral status and mind to meat animals. *Appetite*, 55(1), 156-159. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2010.05.043>

Lu, Z. X., He, J. F., Zhang, Y. C., & Bing, D. J. (2020). Composition, physicochemical properties of pea protein and its application in functional foods. *Critical reviews in food science and nutrition*, 60(15), 2593-2605. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1651248>

Luo, S., Chan, E., Masatcioglu, M. T., Erkinbaev, C., Paliwal, J., & Koxsel, F. (2020). Effects of extrusion conditions and nitrogen injection on physical, mechanical, and microstructural properties of red lentil puffed snacks. *Food and Bioprocess Technology*, 121, 143-153. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.02.002>

Machovina, B., Feeley, K. J., & Ripple, W. J. (2015). Biodiversity conservation: The key is reducing meat consumption. *Science of the Total Environment*, 536, 419-431. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.022>

Małeck, J., Muszyński, S., & Sołowiej, B. G. (2021). Proteins in food systems—Bionanomaterials, conventional and unconventional sources, functional properties, and development opportunities. *Polymers*, 13(15), 2506. <https://doi.org/10.3390/polym13152506>

Mangels, A. R. (2014). Bone nutrients for vegetarians. *The American journal of clinical nutrition*, 100(suppl_1), 469S-475S.

Mao, H., Xu, M., Ji, J., Zhou, M., Li, H., Wen, Y., ... & Sun, B. (2022). The utilization of oat for the production of wholegrain foods: Processing technology and products. *Food Frontiers*, 3(1), 28-45. <https://doi.org/10.1002/fft2.120>

Martínez, M. M., Marcos, P., & Gómez, M. (2013). Texture development in gluten-free breads: Effect of different enzymes and extruded flour. *Journal of Texture Studies*, 44(6), 480-489.

Martínez-Villaluenga, C., Peñas, E., & Hernández-Ledesma, B. (2020). Pseudocereal grains: Nutritional value, health benefits and current applications for the development of gluten-free foods.

Food and Chemical Toxicology, 137, 111178. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2020.111178>

Mateti, T., Laha, A., & Shenoy, P. (2022). Artificial meat industry: Production methodology, challenges, and future. *Jom*, 74(9), 3428-3444. <https://doi.org/10.1007/s11837-022-05316-x>

Maxted, N., & Ambrose, M. (2001). Peas (*Pisum L.*). In *Plant genetic resources of legumes in the Mediterranean* (pp. 181-190). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9823-1_10

McClements, D. J., & Grossmann, L. (2021a). A brief review of the science behind the design of healthy and sustainable plant-based foods. *NPJ science of food*, 5(1), 17. <https://doi.org/10.1038/s41538-021-00099-y>

McClements, D. J., & Grossmann, L. (2021b). The science of plant-based foods: Constructing next-generation meat, fish, milk, and egg analogs. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(4), 4049-4100. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12771>

McClements, D. J., & Grossmann, L. (2022). *Next-Generation Plant-based Foods* (pp. 341-388). Springer.

Meganaharshini, M., Sudhakar, V., Dhivyabharathi, N., & Deepak, S. (2023). Review on recent trends in the application of protein concentrates and isolates—A food industry perspective. *Food and Humanity*. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2023.05.022>

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2012). A global assessment of the water footprint of farm animal products. *Ecosystems*, 15(3), 401-415. <https://doi.org/10.1007/s10021-011-9517-8>

Mensink, R. P., Zock, P. L., Kester, A. D., & Katan, M. B. (2003). Effects of dietary fatty acids and carbohydrates on the ratio of serum total to HDL cholesterol and on serum lipids and apolipoproteins: a meta-analysis of 60 controlled trials. *The American journal of clinical nutrition*, 77(5), 1146-1155.

Meuwissen, M. P., Velthuis, A. G., Hogeveen, H., & Huirne, R. B. (2003). Technical and economic considerations about traceability and certification in livestock production chains. *New approaches to food safety economics*, Wageningen, 41-54.

Misselwitz, B., Butter, M., Verbeke, K., & Fox, M. R. (2019). Update on lactose malabsorption and intolerance: pathogenesis, diagnosis and clinical management. *Gut*, 68(11), 2080-2091. <https://doi.org/10.1136/gutjnl-2019-318404>

Mistry, M., George, A., & Thomas, S. (2020). Alternatives to meat for halting the stable to table continuum—an update. *Arab Journal of Basic and Applied Sciences*, 27(1), 324-334. <https://doi.org/10.1080/25765299.2020.1807084>

Mohd Shukri, A., Alias, A. K., Murad, M., Yen, K. S., & Cheng, L. H. (2022). A review of natural cheese and imitation cheese. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(1), e16112. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16112>

Mondor, M., & Hernández-Álvarez, A. J. (2022). Processing technologies to produce plant protein concentrates and isolates. In *Plant Protein Foods* (pp. 61-108). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91206-2_3

Montemurro, M., Beccaccioli, M., Perri, G., Rizzello, C. G., Reverberi, M., & Pontonio, E. (2023). A chestnut-hemp type-II sourdough to improve technological, nutritional, and sensory properties of gluten-free bread. *International journal of food microbiology*, 404, 110322. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2023.110322>

Motawei, A. M., Hussien, M. M., & Yousef, E. A. (2022). Preparation of Gluten Free Biscuits from Quinoa, Rice and Chickpeas for Celiac Disease Patients. *Journal of Food and Dairy Sciences*, 13(3), 41-45. <https://dx.doi.org/10.21608/jfds.2022.131672.1045>

Mudryj, A. N., Yu, N., & Aukema, H. M. (2014). Nutritional and health benefits of pulses. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 39(11), 1197-1204. <https://doi.org/10.1139/apnm-2013-0557>

Muoki, P. N., Kinnear, M., Emmambux, M. N., & de Kock, H. L. (2015). Effect of the addition of soy flour on sensory quality of extrusion and conventionally cooked cassava complementary porridges. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(4), 730-738.

<https://doi.org/10.1002/jsfa.6820>

Muraro, A., Agache, I., Clark, A., Sheikh, A., Roberts, G., Akdis, C. A., ... & Wickman, M. (2014). EAACI food allergy and anaphylaxis guidelines: managing patients with food allergy in the community. *Allergy*, 69(8), 1046-1057. <https://doi.org/10.1111/all.12441>

Murdia, L. K., Wadhvani, R., Wadhawan, N., Bajpai, P., & Shekhawat, S. (2016). Maize utilization in India: an overview. *American Journal of Food and Nutrition*, 4(6), 169-176. <https://doi.org/10.12691/ajfn-4-6-5>

Na, L., Qian, C., Haifeng, L., & Xiaoguang, H. (2021). Effect of oat flour on wheat dough characteristics and biscuit quality. *Food Research & Development*, 42(1).

Nachay, K., & Malochleb, M. (2018). Clean, Green, and Lean: IFT18 Ingredient Trends. *Food Technology*, 72(9), 52-81.

Nadathur, S., Wanasundara, J. P., & Scanlin, L. (Eds.). (2016). *Sustainable protein sources*. Academic Press.

Nasrollahzadeh, M., Nezafat, Z., & Shafiei, N. (2021). Proteins in food industry. *Biopolymer-based metal nanoparticle chemistry for sustainable applications*, 2, 97-136.

Nevara, G. A., Giwa Ibrahim, S. A., Syed Muhammad, S. K., Zawawi, N., Mustapha, N. A., & Karim, R. (2023). Oilseed meals into foods: An approach for the valorization of oilseed by-products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(23), 6330-6343. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2031092>

Nezlek, J. B., & Forestell, C. A. (2020). Vegetarianism as a social identity. *Current Opinion in Food Science*, 33, 45-51. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.12.005>

Noorfarahzilah, M., Lee, J. S., Sharifudin, M. S., Mohd Fadzelly, A. B., & Hasmadi, M. (2014). Applications of composite flour in development of food products. *International Food Research Journal*, 21(6).

Nwachukwu, I. D., & Aluko, R. E. (2021). Food protein structures, functionality and product development. <https://doi.org/10.1039/9781839163425-00001>

Ogle, S. M., Olander, L., Wollenberg, L., Rosenstock, T., Tubiello, F., Paustian, K., ... & Smith, P. (2014). Reducing greenhouse gas emissions and adapting agricultural management for climate change in developing countries: providing the basis for action. *Global change biology*, 20(1), 1-6. <https://doi.org/10.1111/gcb.12361>

Olsen, P., & Borit, M. (2013). How to define traceability. *Trends in food science & technology*, 29(2), 142-150. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.10.003>

Olsen, P., & Borit, M. (2018). The components of a food traceability system. *Trends in Food Science & Technology*, 77, 143-149. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.05.004>

Olugbenga Ben, O., Blessing, M. O., & Blessing, O. (2023). Progress in Food Fortification in Nigeria-Historical Overview, Current Issues, Consumer Perceptions and Awareness, and the Need for Additional Vehicles. *Food Sci Nutr Res*, 6(2), 1-17.

Öncü Öner, T. (2023). Health Effects of Plant-Based Foods and Their Components. In *Plant-Based Foods: Ingredients, Technology and Health Aspects* (pp. 137-178). Cham: Springer International Publishing.

Onvani, S., Haghighatdoost, F., Surkan, P. J., Larijani, B., & Azadbakht, L. (2017). Adherence to the Healthy Eating Index and Alternative Healthy Eating Index dietary patterns and mortality from all causes, cardiovascular disease and cancer: a meta-analysis of observational studies. *Journal of Human Nutrition and Dietetics*, 30(2), 216-226. <https://doi.org/10.1111/jhn.12415>

Onwezen, M. C., Bouwman, E. P., Reinders, M. J., & Dagevos, H. (2021). A systematic review on consumer acceptance of alternative proteins: Pulses, algae, insects, plant-based meat alternatives, and cultured meat. *Appetite*, 159, 105058. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2020.105058>

Ortolan, F., & Steel, C. J. (2017). Protein characteristics that affect the quality of vital wheat gluten to be used in baking: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16(3), 369-381. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12259>

- Pandey, S. (2022). Nutritional aspects and health implications of gluten-free products. Challenges and Potential Solutions in Gluten Free Product Development, 17-34. https://doi.org/10.1007/978-3-030-88697-4_2
- Park, J., & Kim, H. S. (2023). Rice-Based Gluten-Free Foods and Technologies: A Review. *Foods*, 12(22), 4110. <https://doi.org/10.3390/foods12224110>
- Paul, A. A., Kumar, S., Kumar, V., & Sharma, R. (2020). Milk Analog: Plant based alternatives to conventional milk, production, potential and health concerns. *Critical reviews in food science and nutrition*, 60(18), 3005-3023. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1674243>
- Pawlak, K. (2016). Food security situation of selected highly developed countries against developing countries. *Journal of Agribusiness and Rural Development*, 40(2), 385-398. <https://doi.org/10.17306/JARD.2016.42>
- Pedrosa, M. M., Varela, A., Domínguez-Timón, F., Tovar, C. A., Moreno, H. M., Borderías, A. J., & Díaz, M. T. (2020). Comparison of bioactive compounds content and techno-functional properties of pea and bean flours and their protein isolates. *Plant Foods for Human Nutrition*, 75, 642-650. <https://doi.org/10.1007/s11130-020-00866-4>
- Pérez, A., Saucedo, O., Iglesias, J., Wencomo, H. B., Reyes, F., Oquendo, G., & Milián, I. (2010). Caracterización y potencialidades del grano de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Pastos y forrajes*, 33(1), 1-1.
- Pinto, E., Ferreira, H., Santos, C. S., da Silva, M. N., Styles, D., Migliorini, P., ... & Vasconcelos, M. W. (2022). Healthier and Sustainable Food Systems: Integrating Underutilised Crops in a ‘Theory of Change Approach’. In *Biodiversity, Functional Ecosystems and Sustainable Food Production* (pp. 275-323). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07434-9_9
- Pojić, M., Mišan, A., & Tiwari, B. (2018). Eco-innovative technologies for extraction of proteins for human consumption from renewable protein sources of plant origin. *Trends in Food Science & Technology*, 75, 93-104. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.03.010>
- Poławaska, E., Cooper, R. G., Jóźwik, A., & Pomianowski, J. (2013). Meat from alternative species—nutritive and dietetic value, and its benefit for human health—a review. *CyTA-Journal of Food*, 11(1), 37-42. <https://doi.org/10.1080/19476337.2012.680916>
- Pomeranz, Y., Robbins, G.S. (1972) Amino acid composition of buckwheat. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 20:270-274. <https://doi.org/10.1021/jf60180a029>
- Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food’s environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987-992. <https://doi.org/10.1126/science.aag0216>
- Portman, D., Blanchard, C., Maharjan, P., McDonald, L. S., Mawson, J., Naiker, M., & Panozzo, J. F. (2018). Blending studies using wheat and lentil cotyledon flour—Effects on rheology and bread quality. *Cereal Chemistry*, 95(6), 849-860. <https://doi.org/10.1002/cche.10103>
- Post, M. J., Levenberg, S., Kaplan, D. L., Genovese, N., Fu, J., Bryant, C. J., ... & Moutsatsou, P. (2020). Scientific, sustainability and regulatory challenges of cultured meat. *Nature Food*, 1(7), 403-415. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0112-z>
- Prescott, S. L., Pawankar, R., Allen, K. J., Campbell, D. E., Sinn, J. K., Fiocchi, A., ... & Lee, B. W. (2013). A global survey of changing patterns of food allergy burden in children. *World Allergy Organization Journal*, 6, 1-12. <https://doi.org/10.1186/1939-4551-6-21>
- Puerta, P., Laguna, L., Villegas, B., Rizo, A., Fiszman, S., & Tárrega, A. (2020). Oral processing and dynamics of texture perception in commercial gluten-free breads. *Food research international*, 134, 109233. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109233>
- Qamar, S., Manrique, Y. J., Parekh, H., & Falconer, J. R. (2020). Nuts, cereals, seeds and legumes proteins derived emulsifiers as a source of plant protein beverages: A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 60(16), 2742-2762. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1657062>
- Qian, J., Xing, B., Zhang, B., & Yang, H. (2021). Optimizing QR code readability for curved agro-food packages using response surface methodology to improve mobile phone-based traceability. *Food Packaging and Shelf Life*, 28, 100638. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100638>
- Qin, P., Wang, T., & Luo, Y. (2022). A review on plant-based proteins from soybean: Health

benefits and soy product development. *Journal of Agriculture and Food Research*, 7, 100265. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100265>

Rachwa-Rosiak, D., Nebesny, E., & Budryn, G. (2015). Chickpeas—composition, nutritional value, health benefits, application to bread and snacks: a review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 55(8), 1137-1145. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.687418>

Rai, K. N., Gowda, C. L. L., Reddy, B. V. S., & Sehgal, S. (2008). Adaptation and potential uses of sorghum and pearl millet in alternative and health foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 7(4), 320-396. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1541-4337.2008.00049.x>

Rajbhandari, B. P., & Bhatta, G. D. (2008). Food crops: Agro-ecology and modern agro-techniques. Kathmandu, Nepal. Himalayan College of Agricultural Sciences and Technology, 72-75.

Ramsing, R., Santo, R., Kim, B. F., Altema-Johnson, D., Wooden, A., Chang, K. B., ... & Love, D. C. (2023). Dairy and Plant-Based Milks: Implications for Nutrition and Planetary Health. *Current environmental health reports*, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s40572-023-00400-z>

Randers, L., Grønhoj, A., & Thøgersen, J. (2021). Coping with multiple identities related to meat consumption. *Psychology & Marketing*, 38(1), 159-182. <https://doi.org/10.1002/mar.21432>

Rasane, P., Jha, A., Sabikhi, L., Kumar, A., & Unnikrishnan, V. S. (2015). Nutritional advantages of oats and opportunities for its processing as value added foods-a review. *Journal of food science and technology*, 52, 662-675. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1072-1>

Rawat, N., & Indrani, D. (2015). Functional ingredients of wheat-based bakery, traditional, pasta, and other food products. *Food Reviews International*, 31(2), 125-146. <https://doi.org/10.1080/87559129.2014.974267>

Read, R. S. (2002). Macronutrient innovations and their educational implications: Proteins, peptides and amino acids. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*, 11, S174-S183. <https://doi.org/10.1046/j.1440-6047.11.s6.5.x>

Repo-Carrasco-Valencia, R., Hellström, J. K., Pihlava, J. M., & Mattila, P. H. (2009). Flavonoids and other phenolic compounds in Andean indigenous grains: Quinoa (*Chenopodium quinoa*), kaniwa (*Chenopodium pallidicaule*) and kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Food Chemistry*, 120(1), 128–133.

Rivera, J., Siliveru, K., & Li, Y. (2022). A comprehensive review on pulse protein fractionation and extraction: processes, functionality, and food applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1-23. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2139223>

Rizzo, G., Storz, M. A., & Calapai, G. (2023). The Role of Hemp (*Cannabis sativa* L.) as a Functional Food in Vegetarian Nutrition. *Foods*, 12(18), 3505. <https://doi.org/10.3390/foods12183505>

Robinson, G. H. J., Balk, J., & Domoney, C. (2019). Improving pulse crops as a source of protein, starch and micronutrients. *Nutrition bulletin*, 44(3), 202-215. <https://doi.org/10.1111/nbu.12399>

Roccia, P., Ribotta, P. D., Pérez, G. T., & León, A. E. (2009). Influence of soy protein on rheological properties and water retention capacity of wheat gluten. *LWT-Food Science and technology*, 42(1), 358-362. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.03.002>

Rohmer, S. U. K., Gerdessen, J. C., Claassen, G. D. H., Bloemhof, J. M., & Van't Veer, P. (2018). A nutritional comparison and production perspective: Reducing the environmental footprint of the future. *Journal of Cleaner Production*, 196, 1407-1417. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.125>

Romano, A., Gallo, V., Ferranti, P., & Masi, P. (2021). Lentil flour: Nutritional and technological properties, in vitro digestibility and perspectives for use in the food industry. *Current Opinion in Food Science*, 40, 157-167. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.04.003>

Rooney, L. W., Waniska, R. D., & Subramanian, R. (1997). Overcoming constraints to utilization of sorghum and millet.

Rosenfeld, D. L., & Burrow, A. L. (2017a). The unified model of vegetarian identity: A conceptual framework for understanding plant-based food choices. *Appetite*, 112, 78-95. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2017.01.017>

Rosenfeld, D. L., & Burrow, A. L. (2017b). Vegetarian on purpose: Understanding the

motivations of plant-based dieters. *Appetite*, 116, 456-463. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2017.05.039>

Rossi, J., & Garner, S. A. (2014). Industrial farm animal production: A comprehensive moral critique. *Journal of agricultural and environmental ethics*, 27, 479-522. <https://doi.org/10.1007/s10806-014-9497-8>

Rothgerber H. (2014) A comparison of attitudes toward meat and animals among strict and semi-vegetarians *Appetite*, 72, 98- 05. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2013.10.002>

Roy, F., Boye, J. I., & Simpson, B. K. (2010). Bioactive proteins and peptides in pulse crops: Pea, chickpea and lentil. *Food research international*, 43(2), 432-442. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.09.002>

Russin, T. A., Boye, J. I., Arcand, Y., & Rajamohamed, S. H. (2011). Alternative techniques for defatting soy: a practical review. *Food and Bioprocess Technology*, 4, 200-223. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0367-8>

Rusu, I. E., Marc, R. A., Mureșan, C. C., Mureșan, A. E., Mureșan, V., Pop, C. R., ... & Muste, S. (2021). Hemp (*Cannabis sativa* L.) flour-based wheat bread as fortified bakery product. *Plants*, 10(8), 1558. <https://doi.org/10.3390/plants10081558>

Sammur, J., Gopi, K., Saintilan, N., & Mazumder, D. (2021). Facing the challenges of food fraud in the global food system. In *Food Authentication and Traceability* (pp. 35-63). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821104-5.00009-X>

Sánchez-Reséndiz, A. I., Escalante-Aburto, A., Andía-Ayme, V., & Chuck-Hernández, C. (2019). Structural properties, functional evaluation, and in vitro protein digestibility of black and yellow quinoa (*Chenopodium petiolare*) protein isolates. *CyTA-Journal of Food*, 17(1), 864-872. <https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1669714>

Sanjeeva, W. T., Wanasundara, J. P., Pietrasik, Z., & Shand, P. J. (2010). Characterization of chickpea (*Cicer arietinum* L.) flours and application in low-fat pork bologna as a model system. *Food Research International*, 43(2), 617-626. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.07.024>

Satija, A., Bhupathiraju, S. N., Spiegelman, D., Chiuve, S. E., Manson, J. E., Willett, W., ... & Hu, F. B. (2017). Healthful and unhealthful plant-based diets and the risk of coronary heart disease in US adults. *Journal of the American college of cardiology*, 70(4), 411-422. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2017.05.047>

Savenkova, T. V., Soldatova, E. A., Misteneva, S. Y., & Taleysnik, M. A. (2019). Technological properties of flour and their effect on quality indicators of sugar cookies. *Food systems*, 2(2), 13-19. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2019-2-2-13-19>

Scarborough, P., Appleby, P. N., Mizdrak, A., Briggs, A. D., Travis, R. C., Bradbury, K. E., & Key, T. J. (2014). Dietary greenhouse gas emissions of meat-eaters, fish-eaters, vegetarians and vegans in the UK. *Climatic change*, 125(2), 179-192. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1169-1>

Schmid, E. M., Farahnaky, A., Adhikari, B., Savadkoobi, S., & Torley, P. J. (2024). Investigation into the physiochemical properties of soy protein isolate and concentrate powders from different manufacturers. *International Journal of Food Science & Technology*. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16923>

Schoenlechner, R., Siebenhandl, S., & Berghofer, E. (2008). Pseudocereals. In *Gluten-free cereal products and beverages* (pp. 149-VI). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012373739-7.50009-5>

Schouteten, J. J., De Steur, H., De Pelsmaeker, S., Lagast, S., Juvinal, J. G., De Bourdeaudhuij, I., & Gellynck, X. (2016). Emotional and sensory profiling of insect-, plant-and meat-based burgers under blind, expected and informed conditions. *Food quality and preference*, 52, 27-31. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2016.03.011>

Schreiner, M., Korn, M., Stenger, M., Holzgreve, L., & Altmann, M. (2013). Current understanding and use of quality characteristics of horticulture products. *Scientia horticulturae*, 163, 63-69. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.09.027>

Segura-Campos, M. R., Ciau-Solís, N., Rosado-Rubio, G., Chel-Guerrero, L., & Betancur-

- Ancona, D. (2014). Chemical and functional properties of chia seed (*Salvia hispanica* L.) gum. *International journal of food science*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/241053>
- Serna Saldívar, S. O., & Hernández, D. S. (2020). Dietary fiber in cereals, legumes, pseudocereals and other seeds. *Science and technology of fibers in food systems*, 87-122.
- Sethi, S., Tyagi, S. K., & Anurag, R. K. (2016). Plant-based milk alternatives an emerging segment of functional beverages: a review. *Journal of food science and technology*, 53, 3408-3423. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2328-3>
- Sha, L., & Xiong, Y. L. (2020). Plant protein-based alternatives of reconstructed meat: Science, technology, and challenges. *Trends in Food Science & Technology*, 102, 51-61. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.05.022>
- Shah, A., Nazari, M., Antar, M., Msimbira, L. A., Naamala, J., Lyu, D., ... & Smith, D. L. (2021). PGPR in agriculture: A sustainable approach to increasing climate change resilience. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 667546. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.667546>
- Shahzadi, N. A. U. R. E. E. N., Butt, M. S., Rehman, S. U., & Sharif, K. A. M. R. A. N. (2005). Chemical characteristics of various composite flours. *International Journal of Agriculture and Biology*, 7(1), 105-108.
- Sheen, F., Lim, A. J., & Forde, C. G. (2023). Diversity Among Flexitarian Consumers; stratifying meat reducers by their underlying motivations to move to a plant-based diet. *Food Quality and Preference*, 105022
- Shembe, P. S., Ngobese, N. Z., Siwela, M., & Kolanisi, U. (2023). The potential repositioning of South African underutilised plants for food and nutrition security: A scoping review. *Heliyon*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17232>
- Shen, P., Gao, Z., Fang, B., Rao, J., & Chen, B. (2021). Ferreting out the secrets of industrial hemp protein as emerging functional food ingredients. *Trends in Food Science & Technology*, 112, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.03.022>
- Shewfelt, R. L. (1999). What is quality?. *Postharvest biology and technology*, 15(3), 197-200. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(98\)00084-2](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(98)00084-2)
- Shewry, P. (2019). What is gluten—why is it special?. *Frontiers in nutrition*, 101. <https://doi.org/10.3389/fnut.2019.00101>
- Shewry, P. R., & Hey, S. (2015). Do “ancient” wheat species differ from modern bread wheat in their contents of bioactive components? *Journal of Cereal Science*, 65, 236-243. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.07.014>
- Shih, F. F., & Daigle, K. W. (2000). Preparation and characterization of rice protein isolates. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 77(8), 885-889. <https://doi.org/10.1007/s11746-000-0141-2>
- Shin, M., Gang, D. O., & Song, J. Y. (2010). Effects of protein and transglutaminase on the preparation of gluten-free rice bread. *Food Science and Biotechnology*, 19, 951-956. <https://doi.org/10.1007/s10068-010-0133-8>
- Shukla, P. R., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H. O., Roberts, D. C., ... & Malley, J. (2019). IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.
- Sicherer, S. H., & Sampson, H. A. (2014). Food allergy: epidemiology, pathogenesis, diagnosis, and treatment. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 133(2), 291-307. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2013.11.020>
- Sicherer, S. H., Sampson, H. A., Eichenfield, L. F., & Rotrosen, D. (2017). The benefits of new guidelines to prevent peanut allergy. *Pediatrics*, 139(6). <https://doi.org/10.1542/peds.2016-4293>
- Siegrist, M., Sütterlin, B., & Hartmann, C. (2018). Perceived naturalness and evoked disgust influence acceptance of cultured meat. *Meat science*, 139, 213-219. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.02.007>
- Silva Souza, L. G., Atkinson, A., & Montague, B. (2020). Perceptions about veganism.

(Technical Report) Birmingham, U.K.: The Vegan Society. 50 pp.
https://www.vegansociety.com/sites/default/files/uploads/downloads/Perceptions_about_Veganism%20%28002%29.pdf

Silva, A. R., Silva, M. M., & Ribeiro, B. D. (2020). Health issues and technological aspects of plant-based alternative milk. *Food Research International*, 131, 108972.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108972>

Sim, S. Y. J., Srv, A., Chiang, J. H., & Henry, C. J. (2021). Plant proteins for future foods: A roadmap. *Foods*, 10(8), 1967. <https://doi.org/10.3390/foods10081967>

Sindhuja, A., Sudha, M.L., Rahim, A. (2005). Effect of incorporation of amaranth flour on the quality of cookies. *European Food Research Technology*. 221:597-601.
<https://doi.org/10.1007/s00217-005-0039-5>

Singh, A., & Sit, N. (2022). Meat analogues: Types, methods of production and their effect on attributes of developed meat analogues. *Food and bioprocess technology*, 15(12), 2664-2682.
<https://doi.org/10.1007/s11947-022-02859-4>

Singh, A., Das, M., Bal, S., Banerjee, R., Ferreira-Guine, R. P., & Reis-Correa, P. M. (2013). Rice processing. Engineering aspects of cereals and cereal based products. CRC Press, Boca Raton, FL, 71-97.

Singh, M., Trivedi, N., Enamala, M. K., Kuppam, C., Parikh, P., Nikolova, M. P., & Chavali, M. (2021). Plant-based meat analogue (PBMA) as a sustainable food: A concise review. *European Food Research and Technology*, 247, 2499-2526. <https://doi.org/10.1007/s00217-021-03810-1>

Singh, N., Singh, J., Kaur, L., Sodhi, N. S., & Gill, B. S. (2003). Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. *Food chemistry*, 81(2), 219-231.
[https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00416-8](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00416-8)

Singla, D., Malik, T., Singh, A., Thakur, S., & Kumar, P. (2024). Advances in understanding wheat-related disorders: A comprehensive review on gluten-free products with emphasis on wheat allergy, celiac and non-celiac gluten sensitivity. *Food Chemistry Advances*, 4, 100627.
<https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100627>

Smith, G. C., Tatum, J. D., Belk, K. E., Scanga, J. A., Grandin, T., & Sofos, J. N. (2005). Traceability from a US perspective. *Meat science*, 71(1), 174-193.
<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.04.002>

Springmann, M., Clark, M., Mason-D'Croz, D., Wiebe, K., Bodirsky, B. L., Lassaletta, L., ... & Willett, W. (2018). Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature*, 562(7728), 519-525. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0594-0>

Stantiall, S. E., & Serventi, L. (2018). Nutritional and sensory challenges of gluten-free bakery products: a review. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 69(4), 427-436.
<https://doi.org/10.1080/09637486.2017.1378626>

Stehfest, E., Bouwman, L., Van Vuuren, D. P., Den Elzen, M. G., Eickhout, B., & Kabat, P. (2009). Climate benefits of changing diet. *Climatic change*, 95(1-2), 83-102.
<https://doi.org/10.1007/s10584-008-9534-6>

Stone, A. K., Nosworthy, M. G., Chiremba, C., House, J. D., & Nickerson, M. T. (2019). A comparative study of the functionality and protein quality of a variety of legume and cereal flours. *Cereal Chemistry*, 96(6), 1159-1169. <https://doi.org/10.1002/cche.10226>

Stubbs, R. J., Scott, S. E., & Duarte, C. (2018). Responding to food, environment and health challenges by changing meat consumption behaviours in consumers.
<https://doi.org/10.1111/nbu.12318>

Sukeerthi, S.S., Singh, D.J.K. (2017) Formulation and nutritional analysis of biscuits made from quinoa. flax seed and brown rice. *International Journal of Food Science and Nutrition*. 2:27-30.

Sunico, D. J. A., Rodriguez, F. M., Tuaño, A. P. P., Mopera, L. E., Atienza, L. M., & Juanico, C. B. (2021). Physicochemical and nutritional properties of nixtamalized quality protein maize flour and its potential as substitute in philippine salt bread. *CMUJ. Nat. Sci*, 20(2), e2021035.

Tacer-Caba, Z. (2019). The concept of superfoods in diet. In *The role of alternative and*

innovative food ingredients and products in consumer wellness (pp. 73-101). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816453-2.00003-6>

Taghdir, M., Mazloomi, S. M., Honar, N., Sepandi, M., Ashourpour, M., & Salehi, M. (2017). Effect of soy flour on nutritional, physicochemical, and sensory characteristics of gluten-free bread. *Food Science & Nutrition*, 5(3), 439-445. <https://doi.org/10.1002/fsn3.411>

Tan, M., Nawaz, M. A., & Buckow, R. (2023). Functional and food application of plant proteins—a review. *Food Reviews International*, 39(5), 2428-2456. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1955918>

Tang, C. H. (2017). Emulsifying properties of soy proteins: A critical review with emphasis on the role of conformational flexibility. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(12), 2636-2679. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1067594>

Tangyu, M., Muller, J., Bolten, C. J., & Wittmann, C. (2019). Fermentation of plant-based milk alternatives for improved flavour and nutritional value. *Applied microbiology and biotechnology*, 103, 9263-9275. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-10175-9>

Taranova, E. S., Zenina, E. A., Mel'nikov, A. G., Kryuchkova, T. E., Skorokhodov, E. A., & Ileneva, S. V. (2021, November). Use of chickpea flour in food production. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 845, No. 1, p. 012120). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/845/1/012120>

Tarrega, A., Rizo, A., Murciano, A., Laguna, L., & Fiszman, S. (2020). Are mixed meat and vegetable protein products good alternatives for reducing meat consumption? A case study with burgers. *Current research in food science*, 3, 30-40. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2020.02.003>

Teterycz, D., Sobota, A., Zarzycki, P., & Latoch, A. (2020). Legume flour as a natural colouring component in pasta production. *Journal of food science and technology*, 57, 301-309. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04061-5>

Thrane, M., Paulsen, P. V., Orcutt, M. W., & Krieger, T. M. (2017). Soy protein: Impacts, production, and applications. In *Sustainable protein sources* (pp. 23-45). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802778-3.00002-0>

Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the national academy of sciences*, 108(50), 20260-20264. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>

Toews, R., & Wang, N. (2013). Physicochemical and functional properties of protein concentrates from pulses. *Food Research International*, 52(2), 445-451. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.12.009>

Tonkin, E., Wilson, A. M., Coveney, J., Webb, T., & Meyer, S. B. (2015). Trust in and through labelling—a systematic review and critique. *British Food Journal*, 117(1), 318-338

Tonstad, S., Butler, T., Yan, R., & Fraser, G. E. (2009). Type of vegetarian diet, body weight, and prevalence of type 2 diabetes. *Diabetes care*, 32(5), 791-796. <https://doi.org/10.2337/dc08-1886>

Trimigno, A., Marincola, F. C., Dellarosa, N., Picone, G., & Laghi, L. (2015). Definition of food quality by NMR-based foodomics. *Current Opinion in Food Science*, 4, 99-104. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2015.06.008>

Tuorila, H., & Hartmann, C. (2020). Consumer responses to novel and unfamiliar foods. *Current Opinion in Food Science*, 33, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.09.004>

Turner-McGrievy, G. M., Wirth, M. D., Shivappa, N., Wingard, E. E., Fayad, R., Wilcox, S., ... & Hébert, J. R. (2015). Randomization to plant-based dietary approaches leads to larger short-term improvements in Dietary Inflammatory Index scores and macronutrient intake compared with diets that contain meat. *Nutrition research*, 35(2), 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.nutres.2014.11.007>

Udayarajan, C. T., Mohan, K., & Nisha, P. (2022). Tree nuts: Treasure mine for prebiotic and probiotic dairy free vegan products. *Trends in Food Science & Technology*, 124, 208-218. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.022>

Van Rijswijk, W., & Frewer, L. J. (2012). Consumer needs and requirements for food and ingredient traceability information. *International Journal of Consumer Studies*, 36(3), 282-290.

<https://doi.org/10.1111/j.1470-6431.2011.01001.x>

Vapnek, J., Purnhagen, K., & Hillel, B. (2021). Regulatory and legislative framework for novel foods. Food formulation: Novel ingredients and processing techniques, 285-308. <https://doi.org/10.1002/9781119614760.ch14>

Verbeke, W. (2009). Stakeholder, citizen and consumer interests in farm animal welfare. *Animal Welfare*, 18(4), 325-333. <https://doi.org/10.1017/S0962728600000725>

Verbeke, W., & Roosen, J. (2009). Market differentiation potential of country-of-origin, quality and traceability labeling. *The Estey Centre Journal of International Law and Trade Policy*, 10(1), 20-35. <http://hdl.handle.net/1854/LU-517761>

Verbeke, W., Sans, P., & Van Loo, E. J. (2015). Challenges and prospects for consumer acceptance of cultured meat. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(2), 285-294. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(14\)60884-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60884-4)

Vermeulen, S. J., Campbell, B. M., & Ingram, J. S. (2012). Climate change and food systems. *Annual review of environment and resources*, 37, 195-222. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-020411-130608>

Vignola, M. B., Bustos, M. C., & Pérez, G. T. (2018). Comparison of quality attributes of refined and whole wheat extruded pasta. *LWT*, 89, 329-335. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.10.062>

Voinea, L., Popescu, D. V., Bucur, M., Negrea, T. M., Dina, R., & Enache, C. (2020). Reshaping the traditional pattern of food consumption in romania through the integration of sustainable diet principles. A qualitative study. *Sustainability*, 12(14), 5826. <https://doi.org/10.3390/su12145826>

Vutukuru, J. S. S. (2021). *Protein Structure-Function Relationship Of Commercial Hempseed (Cannabis sativa L.) Protein Concentrates* (Doctoral dissertation, University of Guelph).

Wang, Y., Han, J. H., & Beynon-Davies, P. (2019). Understanding blockchain technology for future supply chains: a systematic literature review and research agenda. *Supply Chain Management: An International Journal*, 24(1), 62-84. <https://doi.org/10.1108/SCM-03-2018-0148>

Wang, Y., Hill, E. R., Campbell, W. W., & O'Connor, L. E. (2022). Plant-and animal-based protein-rich foods and cardiovascular health. *Current Atherosclerosis Reports*, 24(4), 197-213. <https://doi.org/10.1007/s11883-022-01003-z>

Warner, R. D. (2023). The eating quality of meat: IV—Water holding capacity and juiciness. In *Lawrie's meat science* (pp. 457-508). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85408-5.00008-X>

Wesley, S. D., André, B. H. M., & Clerici, M. T. P. S. (2021). Gluten-free rice & bean biscuit: Characterization of a new food product. *Heliyon*, 7(1).

Wheeler, T., & Von Braun, J. (2013). Climate change impacts on global food security. *Science*, 341(6145), 508-513. <https://doi.org/10.1126/science.1239402>

Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., ... & Murray, C. J. (2019). Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The lancet*, 393(10170), 447-492. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)

Wójtowicz, A., Kolasa, A., & Mościcki, L. (2013). Influence of buckwheat addition on physical properties, texture and sensory characteristics of extruded corn snacks. *Polish Journal of Food and Nutrition Science*. 63:239-244. <https://doi.org/10.2478/v10222-012-0076-2>

Wrigley, C. W., & Bekes, F. (2001). Cereal-grain proteins. Chemical and functional properties of food proteins, 373-406.

Wu, G., Fanzo, J., Miller, D. D., Pingali, P., Post, M., Steiner, J. L., & Thalacker-Mercer, A. E. (2014). Production and supply of high-quality food protein for human consumption: sustainability, challenges, and innovations. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1321(1), 1-19. <https://doi.org/10.1111/nyas.12500>

Xu, J., Zhang, Y., Wang, W., & Li, Y. (2020). Advanced properties of gluten-free cookies, cakes, and crackers: A review. *Trends in food science & technology*, 103, 200-213. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.07.017>

- Xu, Y., Sismour, E., Britland, J. W., Sellers, A., Abraha-Eyob, Z., Yousuf, A., ... & Zhao, W. (2022). Physicochemical, structural, and functional properties of hemp protein vs several commercially available plant and animal proteins: A comparative study. *ACS Food Science & Technology*, 2(10), 1672-1680.
- Yadav, R. B., Khatkar, B. S., & Yadav, B. S. (2013). Electrophoretic characterization and functional properties of rice proteins from Indian rice cultivars. *International journal of food properties*, 16(8), 1776-1788. <https://doi.org/10.1080/10942912.2011.608471>
- Yang, J., Zhang, S., Chu, Y., & Chen, L. (2023). Effects of Extraction Technologies on the Functionalities and Applications of Plant Proteins. In *Green Protein Processing Technologies from Plants: Novel Extraction and Purification Methods for Product Development* (pp. 307-346). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16968-7_13
- Yano, H., & Fu, W. (2022). Effective use of plant proteins for the development of “new” foods. *Foods*, 11(9), 1185. <https://doi.org/10.3390/foods11091185>
- Yildiz, E., & Gocmen, D. (2021). Use of almond flour and stevia in rice-based gluten-free cookie production. *Journal of Food Science and Technology*, 58, 940-951. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04608-x>
- Yli-Huuma, J., Ko, D., Choi, S., Park, S., & Smolander, K. (2016). Where is current research on blockchain technology?—a systematic review. *PloS one*, 11(10), e0163477. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163477>
- Yuliarti, O., Kovis, T. J. K., & Yi, N. J. (2021). Structuring the meat analogue by using plant-based derived composites. *Journal of food engineering*, 288, 110138. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.11013>
- Zang, X., Yue, C., Wang, Y., Shao, M., & Yu, G. (2019). Effect of limited enzymatic hydrolysis on the structure and emulsifying properties of rice bran protein. *Journal of Cereal Science*, 85, 168-174. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.09.001>
- Zayas, J. F. (2012). *Functionality of proteins in food*. Springer science & business media.
- Zhang, Y. (2021). Investigating dough rheology and texture properties of bakery products containing soy or pulse flours (Doctoral dissertation).
- Zheng, L., Regenstein, J. M., Zhou, L., & Wang, Z. (2022). Soy protein isolates: A review of their composition, aggregation, and gelation. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(2), 1940-1957. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12925>
- Zhou, Y., Dhital, S., Zhao, C., Ye, F., Chen, J., & Zhao, G. (2021). Dietary fiber-gluten protein interaction in wheat flour dough: Analysis, consequences and proposed mechanisms. *Food Hydrocolloids*, 111, 106203. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106203>
- Zhu, L. J., Liu, Q. Q., Sang, Y., Gu, M. H., & Shi, Y. C. (2010). Underlying reasons for waxy rice flours having different pasting properties. *Food Chemistry*, 120(1), 94-100. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.09.076>

IV. RESULTADOS

Artículo 1

Título: Nutritional Value, Mineral Composition, Fatty Acid Profile and Bioactive Compounds of Commercial Plant-Based Gluten-Free Flours

Autores: Ana M. Vivar-Quintana, Yamina Absi, Miriam Hernández-Jiménez, Isabel Revilla

Revista: Applied Sciences 2023, 13, 2309

<https://doi.org/10.3390/app13042309>

Índices de calidad:

Cuartil: Q2

Área: ENGINEERING, MULTIDISCIPLINARY

Posición de la revista: 42/90

Factor de impacto: 2,7 (2022)

Resumen

Los consumidores actuales muestran una creciente atención hacia la mejora de sus hábitos alimenticios y su bienestar general. Las preferencias nutricionales han ido cambiando y los productos lácteos y cárnicos van dejando de ser las fuentes principales de proteínas en las dietas, siendo paulatinamente reemplazados por productos a base de plantas. En este contexto, las harinas no tradicionales se han vuelto objeto de interés tanto para investigadores como para la industria alimentaria. Estos productos adquieren relevancia debido a su idoneidad para dietas veganas y vegetariana, lo que responde a la creciente conciencia ambiental y a la necesidad de reducir el consumo de productos animales en relación con el cambio climático. La versatilidad de estas harinas va más allá de la nutrición, ya que también se emplean para mejorar las propiedades de textura de los alimentos y para ajustar su composición nutricional. La capacidad de mejorar el comportamiento reológico de las masas ha llevado a su incorporación en la elaboración de productos de panificación que tradicionalmente contenían trigo. Asimismo, se utilizan en la fortificación de alimentos para equilibrar el perfil nutricional general de las dietas, restaurar nutrientes perdidos durante el procesamiento de alimentos y hacer que los productos sean más atractivos para los consumidores.

Diferentes materias primas están siendo utilizadas para la elaboración de estas harinas. Entre los cereales y pseudocereales sin gluten destaca la harina de arroz que presenta una gran aceptación en la industria alimentaria siendo aplicada en productos como pasteles, pan y pastas gracia a su adaptabilidad. Además de los cereales, destaca el interés por las harinas de legumbre, que ofrecen niveles elevados de proteínas de alta calidad y fibra dietética. Aunque se consideran proteínas de menor valor biológico que las animales debido a su bajo contenido de aminoácidos azufrados, son ricas en otros aminoácidos esenciales como lisina, leucina, isoleucina y fenilalanina. Su alto contenido de almidón también hace que estas harinas sean ideales para productos de panadería. La inclusión de harinas de legumbres ha mejorado el valor nutricional de alimentos sin gluten como pasta, pan y aperitivos. Este tipo de harinas contienen otros componentes como lectinas, inhibidores de enzimas y ácido fítico, que tradicionalmente se han considerado como antinutricionales debido a su capacidad para unirse a micronutrientes y reducir la digestibilidad de los macronutrientes. Sin embargo, algunos estudios sugieren que, en niveles bajos, estos compuestos pueden ofrecer beneficios para la salud desempeñando un

papel beneficioso en procesos celulares tales como actividades antioxidantes y antiinflamatorias.

Existen otras semillas no tradicionales que están siendo ampliamente estudiadas, entre ellas destaca el cáñamo que es la variedad no farmacológica de *Cannabis sativa* subsp. *sativa*. Las harinas de cáñamo presentan un alto contenido de proteínas y grasas, principalmente ácidos grasos poliinsaturados (PUFA), así como fibra y minerales. La harina de cáñamo se ha utilizado en la producción de productos sin gluten como pan y productos de panadería.

Aunque los consumidores perciben estas harinas vegetales como productos similares, su composición nutricional puede variar significativamente según las materias primas y el proceso de producción. A partir de esta premisa el objetivo de este trabajo es evaluar la calidad nutricional de diez harinas vegetales comerciales en relación con las directrices nutricionales actuales y los requisitos dietéticos.

Para ello se adquirieron harinas comerciales de garbanzo, soja, guisante, cáñamo y arroz en mercados locales de Zamora (España) y por comercio electrónico. Se realizaron análisis de composición proximal, incluyendo proteínas, grasas, carbohidratos, almidón, humedad, ceniza y fibra, mediante el uso de los métodos de la Oficina Internacional de Métodos de Análisis (AOAC). Además, se llevó a cabo un análisis mineral mediante ICP-MS analizándose macro y micro-elementos, así como metales tóxicos (Na, Mg, P, K, Ca, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Se, Cr, Cd y Pb). La composición de ácidos grasos se determinó mediante cromatografía de gases, y se evaluó la capacidad antioxidante y el contenido fenólico de las harinas. Los resultados se analizaron utilizando un estadístico ANOVA y pruebas de Fisher, también se aplicó un análisis de componentes principales (PCA) para clasificar las muestras según parámetros fisicoquímicos.

El estudio de la composición nutricional de las harinas mostró que la humedad de las mismas se situaba en un rango del 6,0% a 9,9%, siendo las harinas de garbanzo y guisante las que presentan los mayores contenidos de humedad. La proporción de proteínas en estas harinas también muestra una amplia variabilidad, siendo la harina de soja la que presenta el mayor contenido de proteínas (41,5%), mientras que la harina de arroz exhibe el valor más bajo (7,2%). En cuanto al contenido de grasas, las harinas de soja y cáñamo muestran las concentraciones más altas (23,0% y 11,5%, respectivamente), mientras que la harina de arroz presenta el contenido más bajo (0,6%). El análisis de carbohidratos revela que todas

las harinas tienen cantidades significativas de los mismos (>31,8%), siendo el almidón el componente predominante en las harinas de arroz (76,6%), guisante (48,0%) y garbanzo (41,1%). Por otro lado, las harinas de cáñamo y soja presentan los contenidos más elevados de fibra (50,2% y 28,6%, respectivamente). Las comparaciones entre las marcas comerciales revelan diferencias significativas en varios parámetros analizados, especialmente en los contenidos de grasas, fibra y almidón de las harinas de soja y cáñamo. Estas variaciones subrayan la importancia de considerar la marca específica al elegir estas harinas para su uso en productos alimentarios.

En cuanto a los minerales, se analizaron 14 elementos, destacando el potasio como el macroelemento más abundante en todas las harinas, seguido por el fósforo. Las harinas de soja y cáñamo presentan los contenidos más altos de macroelementos y también exhiben las concentraciones más elevadas de microelementos como hierro, zinc y manganeso. Sin embargo, se observa una gran variabilidad en las concentraciones minerales según la marca comercial, lo cual puede atribuirse a factores como variaciones fenotípicas, condiciones climáticas, fertilizantes utilizados, calidad del suelo, procesamiento y almacenamiento. Respecto a la presencia de minerales potencialmente tóxicos, los niveles de Cd se mantienen dentro de los límites establecidos por la legislación europea, sin embargo, se observan altos niveles de Pb en algunas muestras, superando los límites establecidos por la regulación de la Unión Europea.

En cuanto al perfil de ácidos grasos, se observaron diferencias significativas entre especies vegetales y marcas comerciales, siendo C18:2 n6 el ácido graso más abundante en leguminosas y cáñamo. Sin embargo, la harina de arroz mostró un valor muy bajo para este ácido graso. Se observaron diferencias en C18:1, para el que la harina de soja tuvo el valor más alto, y en C18:3 n3, para el que la harina de cáñamo mostró los niveles más altos. La harina de arroz mostró el contenido más alto de C16:0 y C18:0. Algunos ácidos grasos, como el γ -linolénico, se encontraron solo en la harina de cáñamo, con diferencias significativas entre las dos marcas analizadas. El ácido eicosatrienoico se encontró solo en arroz, y el DHA solo se determinó en harinas de soja, con niveles muy bajos y sin diferencias significativas entre marcas. Las leguminosas presentaron contenidos muy altos de ácidos grasos poliinsaturados (PUFA) (50–65%), especialmente n6 PUFA (48–54%), seguidos de ácidos grasos monoinsaturados (MUFA) (18–31%) y bajos valores de ácidos grasos saturados (SFA) (13–17%). Las harinas de guisante y soja se caracterizaron por los altos contenidos de n3 PUFA, mientras que los garbanzos tenían los valores más bajos,

hecho que está de acuerdo con estudios previos.

En cuanto a los compuestos bioactivos, el contenido fenólico total, el contenido flavonoide total, y el contenido de flavanonas y dihidroflavonoles mostró diferencias dependiendo tanto de la especie de planta como de la marca comercial. El contenido fenólico total varió desde 6,33 mg GAE/100 g en harina de arroz hasta 139,31 mg GAE/100 g en harina de soja. Las harinas de leguminosas mostraron valores significativamente más altos que la harina de cereal (arroz) para todos los parámetros estudiados. La harina de guisante mostró valores similares a la harina de cáñamo para este grupo de compuestos fenólicos, mientras que la harina de arroz presentó los valores más bajos en todos los compuestos bioactivos estudiados. Respecto a la capacidad antioxidante total equivalente (TEAC), se observó que la harina de soja tenía los valores más altos y la harina de guisante los más bajos, sin diferencias significativas entre marcas.

El análisis de componentes principales produjo seis PC con un valor propio >1 , que explicaron el 96,43% de la variabilidad. Las muestras de soja se relacionaron con valores positivos en los componentes PC1 y PC2, debido a la fuerte contribución de proteínas, cenizas, contenido fenólico total (TPC), Ca y K al PC1, junto con la correlación de C22:0 y C18:1 a PC2. Las muestras de harina de cáñamo presentaron valores positivos de PC1 debido a la correlación de este PC1 con cenizas y fibra, pero también con contenido flavonoide total (TFC) y contenido de Cu. Estas muestras también mostraron valores negativos de PC2, correlacionados con variables como C18:2, Mg y Fe, pero principalmente con los niveles de C18:3. Por su parte las muestras de garbanzo presentaron valores positivos en el PC2, correlacionados con los niveles observados de C18:1 y C18:0. De hecho, las muestras de garbanzo tenían valores negativos de PC1 debido a la fuerte correlación con Na. Las muestras de guisante y arroz mostraron valores negativos en ambos componentes PC1 y PC2. Así, las muestras de arroz tenían los niveles más altos de C16:0 y C18:1n9t, pero también de carbohidratos y almidón, junto con los valores más bajos de TFC, TPC, C18:2 y la mayoría de los minerales. Las muestras de guisante tenían un alto contenido de humedad, pero también valores bajos de Mg, P y Ca. Sin embargo, mostraban los valores más altos de Pb, asociados con los valores negativos de PC2. Al igual que en el caso del arroz, las muestras de guisante mostraban valores relativamente bajos de TPC y TEAC.

Como conclusión de este trabajo se pudo observar que, aunque las harinas a base de

plantas comparten la designación genérica, no todas tienen una composición similar ni aportan lo mismo desde un punto de vista nutricional. Además de las diferencias entre especies vegetales, se encontró una variabilidad significativa entre marcas comerciales. Por lo tanto, es esencial que los consumidores verifiquen las etiquetas nutricionales de este tipo de alimentos para garantizar una dieta saludable. Es de destacar en este estudio que se detectó la presencia de niveles elevados de plomo en algunas harinas, lo que pone de manifiesto la necesidad de que las autoridades sanitarias implementen mecanismos de control para estas harinas a base de plantas.

Article

Nutritional Value, Mineral Composition, Fatty Acid Profile and Bioactive Compounds of Commercial Plant-Based Gluten-Free Flours

Ana M. Vivar-Quintana ^{*}, Yamina Absi , Miriam Hernández-Jiménez  and Isabel Revilla 

Food Technology, Escuela Politécnica Superior de Zamora, Universidad de Salamanca, 49022 Zamora, Spain

^{*} Correspondence: avivar@usal.es; Tel.: +34-6-7069-9623

Abstract: Nowadays, a wide range of non-traditional gluten-free products can be purchased. Although consumers identify all these as being similar, their nutritional composition can differ depending on the raw materials used and the production process itself. The aim of the current study was to evaluate the nutritional quality of ten commercially available flours made from rice, pea, chickpea, soybean and hemp. The proximate composition (moisture, fat, fiber, protein, starch and carbohydrates), the mineral composition (Na, Mg, P, K, Ca, Cr, Ni, Se, Cu, Zn, Mn, Fe, Cd, Pb), the phenolic composition (total phenols, total flavonoids, flavanones and dihydroflavonols, and total antioxidant capacity) and the fatty acid profile were analyzed. Results showed an important influence of the vegetable species but also of the brand on the flour composition. Soybean flours, followed by hemp, showed the highest phenolic content and antioxidant capacity. Hemp flour showed a low n6/n3 ratio, while pea flour contained a small amount of fat with a large amount of oleic acid and a satisfactory n6/n3 ratio.

Keywords: chickpea; pea; hemp; soybean; rice; commercial flour; proximate composition; phenolic content; antioxidant activity; fatty acid profile



Citation: Vivar-Quintana, A.M.; Absi, Y.; Hernández-Jiménez, M.; Revilla, I. Nutritional Value, Mineral Composition, Fatty Acid Profile and Bioactive Compounds of Commercial Plant-Based Gluten-Free Flours. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 2309. <https://doi.org/10.3390/app13042309>

Academic Editor: Monika Gibis

Received: 20 January 2023

Revised: 3 February 2023

Accepted: 8 February 2023

Published: 10 February 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Modern consumer requirements are reflecting more and more their concern about improving their diet, health and well-being [1]. In recent years, there has been a growing interest in the potential use of different sources of protein in human nutrition. Dairy and meat products are no longer the main sources of protein in diets, with an increase in the number of plant-based protein products [2]. In this context, non-traditional flours obtained from various raw products are attracting the interest of researchers and the food industry [3]. These kinds of products are suitable for use in vegan or vegetarian diets and for consumers who are aware of the need to reduce the consumption of animal products due to their relation to climate change. In addition, these flours can be used to meet the demand for gluten-free (GF) formulations [4] owing to the requirements of the growing population suffering from celiac disease [5]. Gluten-elimination studies performed on non-celiac individuals showed that a GF diet has beneficial effects in preventing not only gluten-related disorders (GRDs) but also other disorders such as irritable bowel syndrome (IBS) and diabetes [6].

On the other hand, these flours can be used to improve the textural properties of foods and/or improve their nutritional composition. Their ability to improve the rheological behavior of doughs has led to their incorporation into wheat for baking products [7,8]. They are also being used in fortification as a tool to balance the overall nutritional profile of diets, to restore nutrients lost in food processing, and to make products more attractive to consumers [9].

As mentioned above, growing interest has been observed in the use of gluten-free cereals and pseudocereals. These grains are mainly consumed in the form of flours and

seeds, which can be easily added to different preparations. Among these cereals, rice is an important source of protein for humans. Like other cereals, rice seed proteins are deficient in some essential amino acids [10], which has led to intensive work on modifying the amino acid profile of rice grain to develop varieties of high nutritional value [11]. The components such as protein, available starch, and dietary fiber may be present in varying amounts in different rice cultivars [12]. Rice flour has been incorporated into gluten-free products such as cakes [13], yellow alkaline noodles [14], bread [15], and pasta [16], among other products.

Pulses have also attracted the interest of both the food industry and consumers. Pulse flours provide high levels of good-quality protein and dietary fiber [17]. Owing to the low level of sulfur amino acids, they are considered to be proteins of less biological value than animal proteins [18]. However, they are a rich source of other amino acids, such as lysine, leucine, isoleucine and phenylalanine and therefore provide a well-balanced essential amino acid profile when combined with other grains such as wheat or rice [19]. In addition, the high starch content of pulses makes their flour highly suitable for use in bakery products [20]. Legume flours have also been used to enhance the nutritional value of gluten-free foods such as pasta, breads and snacks [21,22]. Other minor components of pulse flour include proteins, such as lectins and enzyme inhibitors, and phytic acid. Although these have previously been considered anti-nutritional due to their ability to bind micronutrients and reduce the digestibility of macronutrients, some studies also show the potential health benefits of including low levels of these compounds in one's diet [23]. The correct ratio of anti-nutrients to nutrients can reduce the negative impact on digestibility and play a beneficial role in cellular processes, including antioxidant and anti-inflammatory activities [24]. Among the pulses, different flours have been studied, such as soy flour [25–27], chickpea and lentil flour [21], fava bean flour [28], carob flour [29], green and yellow pea flour [2] and flour of the *Prosopis* species [30], among others.

Other non-traditional seeds have been processed into flour, and their viability for incorporation into different products has been studied. Hemp is the non-pharmacological variety of *Cannabis sativa* subsp. *sativa*, the cultivation of which is legal in several countries [31]. Hemp seeds contain a high proportion of protein (20–25%) and a high fat content (25–35%), comprising mainly polyunsaturated fatty acids (PUFAs), and also interesting amounts of fiber and minerals [32]. Their flour has been used for the production of gluten-free bread [33] and bakery by-products [34]. Amaranth flour for the production of gluten-free breads and biscuits [35], quinoa flour for the production of dairy yogurt [36] or muffins [37] and sorghum flour for the preparation of pasta [38] and flatbread [39] have also been studied.

Plant-based foods are a growing trend among consumers, which has led to these flours quickly becoming popular [40]. At present, a wide range of these products can be purchased in supermarkets or online. Although consumers identify all these flours as similar products, their nutritional composition can be very different depending on the raw materials used and the production process itself. The aim of the current study was to evaluate the nutritional quality of ten commercially available flours made from rice, pea, chickpea, soybean and hemp in relation to current nutritional guidelines and dietary requirements.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

Commercial flours from chickpea (*Cicer arietinum*), soybean (*Glycine maxima*), pea (*Pisum sativum*), hemp (*Cannabis sativa*) and rice (*Oryza sativa*) were purchased in local markets (Zamora, Spain) and by electronic commerce, each being of one type from two different food companies.

2.2. Proximate Composition of Flour

The samples were analyzed for nutritional composition (protein, fat, carbohydrates and starch) by using the AOAC procedures [41]. The crude protein content of the samples ($N \times 6.25$) was estimated by the macro-Kjeldahl method; crude fat was determined using a Soxhlet apparatus by extracting a known weight of the sample with petroleum ether.

The moisture content of the flours was determined by using the AACC method 14-15 A [42]. Ash content was determined by incineration at 550 ± 10 °C using the AACC method 08-01.01 [43]. The total fiber was determined according to the AOAC Method 991.43 [44] by using the ANKOM dietary fiber analyzer (ANKOM technology, New York, NY, USA). Total carbohydrates were calculated by their difference, and the % energy provided was calculated considering that protein and carbohydrate provide 4 kcal/g and that fat provides of 9 kcal/g. All the determinations were performed in triplicate.

2.3. Mineral Analysis

Element concentrations were determined by ICP-MS (Na, Mg, P, K, Ca, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Se, Cr, Cd and Pb). Amounts of approximately 0.2 g samples were placed in Teflon vessels with HNO₃ and a Milestone digestion microwave system was used. Concentrations were determined using an Agilent 7800 ICP mass spectrometer (Agilent, Santa Clara, CA, USA) with the following operating conditions: Rf. Power 1550 W, Plasma Ar flow 15 L/min, Auxiliary Air flow 0.9 L/min, Nebulizer Air flow 0.99 L/min.

Quantification was carried out by using certified standard solutions (1 g/L) (Panreac, Castellar del Vallès, Spain) grouping the elements into two multi-elemental standards. The results were expressed as mg kg⁻¹ of sample.

2.4. Fatty Acid Analysis

The extraction of lipids from 10 g of the flours was performed using a soxhlet extractor (Soxtherm Gerhardt Variostat; Soxtherm V7.5, Wiesbaden, Germany) using petroleum ether. The fatty acids were analyzed after methylation with methanolic KOH by gas chromatography using the method described by Lurueña et al. [45]. Two to five microliters of the sample were injected into the equipment (GC 6890 N, Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA) using a 100 m × 0.25 mm × 0.20 µm capillary column (SP-2560, Supelco, Inc., Bellefonte, PA, USA) equipped with a split/splitless injector and an FID detector. The fatty acids were identified according to their retention times by comparison with a mixture of commercial standards (47885-U Supelco, Sigma–Aldrich, Darmstadt, Germany). The quantification was expressed as g per 100 g of total fatty acid methyl esters. The determinations were performed in triplicate.

2.5. Determination of the Phenolic Composition and Antioxidant Capacity

2.5.1. Extraction of Flour Samples

The extracts of different flour samples were prepared as described by Betances Salcedo et al. [46]. The different flours (1 g each accurately weighed) were added to 20 mL of 70% ethanol aqueous solution. After keeping the mixture in an ultrasonic water bath for 8 min, it was centrifuged at $3000 \times g$ for 20 min at 20 °C. The supernatant was separated and then completed in a 25 mL volumetric flask with 70% ethanol. The extractions were performed in duplicate, and all the subsequent determinations were performed in triplicate.

2.5.2. Determination of the Total Phenolic Content

The total phenolic content of the extracts was measured using the Folin–Ciocalteu (FC) reagent using the method described by Millar et al. [2]. Approximately 0.5 mL of FC was added to 0.5 mL of the sample. Then, 10 mL of Na₂CO₃ 10 H₂O (7.5%) was added, and the solution was mixed thoroughly. The volume of the mixture was made up to 25 mL with distilled water. The total phenolic content of the sample extract was determined at a 750 nm wavelength in a spectrophotometer (Shimadzu UV 1280, Shimadzu, Kyoto, Japan).

The results are expressed as mg gallic acid equivalent (GAE)/100g of fresh weight. The calibration equation used was $y = 0.232x - 0.019$; $r^2 = 0.996$.

2.5.3. Determination of the Total Flavonoid Content

The total flavonoid content (flavones and flavonols) of the sample extracts was determined using the colorimetric method based on the formation of the aluminum chloride complex as described by Valencia et al. [47], with slight modifications. Five hundred microliters (0.5 mL) of 5% AlCl_3 was added to 2 mL of sample extracts and brought up to 25 mL with 96% ethanol. The mixture was kept for 30 min in the dark at room temperature. The absorbance was measured at 425 nm using a spectrophotometer (Shimadzu UV 1280, Shimadzu, Kyoto, Japan). The results are expressed as milligrams of rutin per 100 gram of sample. The calibration equation used was $y = 2.839x - 0.004$; $r^2 = 0.997$.

2.5.4. Total Flavanone and Dihydroflavonol Content Determination

The content of flavanones and dihydroflavonols was determined spectrophotometrically, according to the method described by Popova et al. [48], with slight modifications. An aliquot (1 mL) of the flour extract and 2 mL of the DNP (2,4 dinitrophenylhydrazine) solution was heated to 50 °C for 50 min. After cooling to room temperature, 10% potassium hydroxide (KOH) in methanol (w/v) was added to the solution up to 10 mL. The absorbance at 486 nm of 1 mL of the resulting solution was measured using a spectrophotometer ((Shimadzu UV 1280, Shimadzu, Kyoto, Japan). The presence of pinocembrin has been described in the literature in rice and chickpea, so the authors decided to use it as a standard and to express the results as mg of pinocembrin/100 g of the flour sample extract. The calibration equation used was $y = 1.340x - 0.015$; $r^2 = 0.993$.

2.5.5. Determination of the Total Antioxidant Capacity

The total equivalent antioxidant capacity (TEAC) was determined by the ABTS (2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)) method according to the method described by Chen et al. [49] using the vitamin E analogue Trolox (6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid) as a standard. An appropriate amount of the sample (20 μL) was added to the ABTS reagent, and the mixture was incubated at 25 °C. Absorbance was recorded every minute for 10 min using a Shimadzu spectrophotometer (Shimadzu UV 1280, Shimadzu, Kyoto, Japan). Appropriate solvent blanks were run in each assay. The percentage of inhibition of absorbance at 734 nm was calculated and plotted as a function of the concentration of Trolox to give the total equivalent antioxidant capacity (TEAC). The determinations were performed in triplicate and calculated from the calibration curve determined by linear regression (r^2 : 0.9852): Trolox eq = (% decrease in Abs + 2.107)/1.1815.

2.6. Statistical Analysis

ANOVA and LSD Fisher Tests were used to identify significant differences between groups using the SPSS Package 25 (IBM, Chicago, IL, USA).

Unsupervised pattern recognition analysis through principal component analysis (PCA) was applied to group the samples. The data for PCA modeling were the analyzed physicochemical parameters, which showed values >0 in all the samples. These data were normalized, scaled, and mean-centered. Subsequently, the original variables were linearly transformed into a new set of variables (principal components PCs) which retain the information of the original set. The number of PCs for classifying purposes was determined by selecting those with an eigenvalue of >1 . The calculations were performed using the SPSS Package 25 (IBM, Chicago, IL, USA).

3. Results and Discussion

3.1. Proximate Composition

The nutritional composition of the different flours analyzed can be seen in Table 1. The moisture content varied between 6.0% and 9.9%, with chickpea and pea flours having the highest moisture contents. There is a large variability in the moisture contents of these types of flours described in the bibliography, ranging from 0.2% described for hemp flour [50] to 10.11% described for pea flour [51]. The lowest protein content was found in rice flours (7.2%), while the highest was found in soybean flours (41.5%). In relation to fat content, soybean flours (23.0%) and hemp flours (11.5%) showed the highest concentrations, while the lowest concentrations were obtained in rice flours (0.6%). All the flours analyzed showed high amounts of carbohydrates (CHO) (>31.8%), with starch being the most important carbohydrate in the rice flour samples (76.6%), followed by pea flours (48.0%) and chickpea flours (41.1%). The highest fiber contents were found in hemp (50.2%) and soybean (28.6%) flours.

Chickpea and pea flours showed high carbohydrate contents and significant starch, fiber and protein contents. Similar values for chickpea flour (24.61%) and pea flour (22.96%) have been reported for protein content [52]. Similarly, the carbohydrate content reported for chickpea flour (57.78%) and pea flour (57.94%) agrees with the results obtained in this study [52]. Rice flours were characterized by a high carbohydrate content, with a high starch content and very low fat, fiber and ash contents, matching those described by Bolarinwa et al. [53]. Soybean and hemp flours showed high protein and fiber contents with higher amounts of fat and ash than the other flours tested, while their carbohydrate and starch contents were much lower. These results agree with those obtained by Uwem et al. [54] and Alphonse et al. [55] for soybean flours and [50] for hemp flours. As far as energy is concerned, the values are similar, and non-significant differences were observed between the products analyzed except for soybean, which showed significantly higher values owing to its higher fat content.

If we compare the different commercial brands analyzed, it can be observed that in all cases there are statistically significant differences in several of the parameters analyzed, with these being particularly striking in the fat, fiber and starch contents of soybean and hemp flours.

From the nutritional composition point of view, the content of fiber and fat in these flours is of particular interest. The current recommendation as outlined by the European Food Safety Authority (EFSA) is for consumption of >25 g fiber a day to maintain normal bowel function, prevent gastrointestinal disorders, aid in weight management and reduce the risks of coronary heart diseases and type 2 diabetes [56]. The role of fiber in weight management is due to its role in adding bulk to the diet to induce satiety and its lower energy density [57]. On the other hand, the high fat content can be a disadvantage for the use of these flours, owing to the lipoxygenase-catalyzed oxidation of unsaturated fatty acids to volatile compounds, which can affect both the taste and the shelf life of foods [58]. Among the tested flours, soybean and hemp flours differ from other flours in terms of their high fat and fiber, and pea and chickpea flours have a high concentration of fiber with a very low fat content; in contrast, rice flour has a low fiber and fat content.

The starch and protein content is another important aspect to take into account in the composition of these flours. The starch content affects human health through its contribution to the glycemic index and levels of resistant starch. Incomplete digestion–absorption of resistant starch in the small intestine results in non-digestible starch fractions with physiological functions similar to those of dietary fiber and therefore with important health benefits [59]. Starch contributes 50–70% of the energy in the human diet, as it provides a direct source of glucose, which is an essential substrate in brain and red blood cells for generating metabolic energy [60]. Considering the indications of the Food Safety Authority of Ireland, a product is considered to be high in protein when at least 20% of the total energy comes from protein. According to this approach, all the flours analyzed in this study are high-protein foods except rice flour. Soybean and hemp differ from other flours

in terms of their low starch content and also in their high protein content. In contrast, rice flour is mainly composed of starch with a low protein content. Pea and chickpea flours have a high concentration of protein and starch, with a very low fat content, which makes them particularly interesting from a nutritional point of view.

3.2. Mineral Content

The concentrations of the 14 minerals analyzed (Na, Mg, P, K, Ca, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Se, Cr, Cd and Pb) for each of the flours studied can be seen in Table 2. The minerals calcium, phosphorus, sodium, potassium and magnesium are called macroelements as their nutritional requirements are higher than 100 mg/dL day [61]. In all the flours analyzed, potassium is the major macroelement, followed by phosphorus. Sodium is the least abundant macroelement in chickpea, soybean and hemp flours, while in rice and pea flours, calcium is the minority macroelement. Soybean flours have the highest potassium content (18,223.35 mg/kg), while hemp flours have the highest concentrations of phosphorus (9908.3 mg/kg) and magnesium (4978.6 mg/kg). On the other hand, rice flours have the lowest macroelement content, with particularly low concentrations of calcium, potassium and magnesium compared to the other types of flour analyzed.

Those elements of which trace amounts are necessary are called microelements and include copper, iron, manganese, selenium, zinc, chromium and nickel. In all the flours analyzed, the microelement with the highest concentration is iron, followed by zinc and manganese. The highest concentrations of all of these elements were found in the hemp flour, whereas selenium was only detected in one sample of pea flour. The results obtained for macro- and microelements are similar to those described by other authors in chickpea flour [62], rice [63], soybean [64] and pea flour [2] but lower than those described for hemp flour [65]. In all the minerals analyzed, a large variability in their concentrations was found depending on the commercial brand analyzed. This is due to the fact that the mineral composition varies according to parameters such as phenotypic variation, climatic conditions, the fertilizers used, soil quality, processing and storage [66].

Minerals are essential elements in our diet for long and healthy life; some macro- and microelements are found in the structure of teeth (Ca, P and F) and bones (Ca, Mg, Mn, P, B and F) and in the control of blood pressure (Ca and K), and some act as catalysts for metabolic reactions (Zn, Cu, Se, Mg, Mn). They play a vital role as a structural part of many enzymes (Cu, Fe, Mn, Mg, Se and Zn) and are involved in the immune (Ca, Mg, Cu, Se and Zn) and brain (Cr and Mn) systems [67]. Plant foods are in themselves an important source of essential minerals, but they can also be used in the fortification of other foods as a strategy to reduce micronutrient malnutrition. Mineral deficiency is therefore more prevalent in developing countries, where access to fresh food is scarce, whereas in industrialized countries, Ca deficiency is a major problem [68]. However, it should be noted that the total amount of a mineral in a food does not reflect the amount available in the body through absorption, as only a certain amount of the mineral is bioavailable [67]. Dietary deficiency of some of these minerals may be due to low mineral intake, but in some cases, the cause is poor mineral absorption. Phytic acid present in cereals and some legumes has been described as one of the main inhibitors of Fe and Zn absorption and, to a lesser extent, of calcium, with oxalic acid being the main inhibitor of Ca absorption [69].

Table 1. The proximate composition (g/100 g fresh weight) of different flours. Data presented as means $\pm$ standard deviation from triplicate analysis.

	Chickpea		Pea		Soybean		Hemp		Rice	
	A *	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Moisture	8.1 $\pm$ 0.3 ^d	9.0 $\pm$ 0.1 ^e	9.9 $\pm$ 0.5 ^f	8.9 $\pm$ 0.1 ^e	7.3 $\pm$ 0.1 ^c	6.0 $\pm$ 0.1 ^a	6.2 $\pm$ 0.1 ^a	6.6 $\pm$ 0.1 ^b	7.7 $\pm$ 0.2 ^c	9.8 $\pm$ 0.1 ^f
Ash	3.1 $\pm$ 0.0 ^e	2.7 $\pm$ 0.0 ^c	3.0 $\pm$ 0.0 ^d	3.2 $\pm$ 0.0 ^f	5.0 $\pm$ 0.0 ^g	5.3 $\pm$ 0.0 ^h	6.5 $\pm$ 0.0 ^j	6.0 $\pm$ 0.0 ⁱ	0.7 $\pm$ 0.1 ^b	0.5 $\pm$ 0.1 ^a
Fat	4.3 $\pm$ 0.9 ^b	5.6 $\pm$ 0.4 ^c	1.5 $\pm$ 0.5 ^a	1.1 $\pm$ 0.0 ^a	18.3 $\pm$ 0.6 ^f	23.0 $\pm$ 0.0 ^g	7.3 $\pm$ 0.0 ^d	11.5 $\pm$ 0.0 ^e	1.0 $\pm$ 0.1 ^a	0.6 $\pm$ 0.0 ^a
Fiber	16.7 $\pm$ 0.1 ^d	17.1 $\pm$ 0.0 ^d	8.6 $\pm$ 0.3 ^b	11.5 $\pm$ 0.2 ^c	28.6 $\pm$ 0.5 ^f	25.4 $\pm$ 0.4 ^e	50.2 $\pm$ 0.4 ^h	38.2 $\pm$ 0.9 ^g	1.0 $\pm$ 0.0 ^a	1.0 $\pm$ 0.0 ^a
Proteins	23.4 $\pm$ 0.0 ^f	19.3 $\pm$ 0.0 ^c	21.7 $\pm$ 0.1 ^e	21.3 $\pm$ 0.2 ^d	38.1 $\pm$ 0.0 ⁱ	41.5 $\pm$ 0.4 ^j	29.4 $\pm$ 0.1 ^g	32.1 $\pm$ 0.4 ^h	7.6 $\pm$ 0.0 ^b	7.2 $\pm$ 0.0 ^a
Starch	40.9 $\pm$ 0.0 ^e	41.1 $\pm$ 0.0 ^e	48.0 $\pm$ 0.0 ^g	45.6 $\pm$ 0.4 ^f	3.5 $\pm$ 0.1 ^c	4.1 $\pm$ 0.0 ^d	0.1 $\pm$ 0.0 ^a	0.8 $\pm$ 0.1 ^b	76.6 $\pm$ 0.2 ⁱ	72.4 $\pm$ 0.1 ^h
CHO	63.5 $\pm$ 4.5 ^{de}	65.2 $\pm$ 3.1 ^{de}	65.4 $\pm$ 2.5 ^{de}	65.8 $\pm$ 0.3 ^e	39.1 $\pm$ 13.5 ^{ab}	31.8 $\pm$ 13.4 ^a	53.0 $\pm$ 4.4 ^{cd}	47.6 $\pm$ 6.2 ^{bc}	83.3 $\pm$ 0.8 ^f	82.0 $\pm$ 0.3 ^f
Energy (Kcal/100 g)	373.6 $\pm$ 5.9 ^{ab}	371.7 $\pm$ 16.6 ^{ab}	357.4 $\pm$ 4.1 ^a	355.5 $\pm$ 3.5 ^a	418.3 $\pm$ 40.9 ^{bc}	431.2 $\pm$ 66.8 ^c	373.7 $\pm$ 20.8 ^{ab}	387.8 $\pm$ 33.3 ^{abc}	369.7 $\pm$ 2.1 ^{ab}	360.2 $\pm$ 2.0 ^a

* A and B are different commercial brands. a–j: values followed by different superscripts in the same row are significantly different ($p < 0.05$).**Table 2.** The mineral composition (mg/kg fresh weight) of different flours. Data presented as means $\pm$ standard deviation from triplicate analysis.

	Chickpea		Pea		Soybean		Hemp		Rice	
	A *	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Macroelements										
Na	1196.8 $\pm$ 46.3 ^e	1028.8 $\pm$ 4.4 ^d	1057.9 $\pm$ 58.9 ^d	967.1 $\pm$ 41.2 ^{cd}	1009.9 $\pm$ 17.8 ^d	987.7 $\pm$ 12.6 ^d	641.4 $\pm$ 6.6 ^a	846.1 $\pm$ 5.6 ^b	991.2 $\pm$ 19.8 ^d	861.7 $\pm$ 4.9 ^{bc}
Mg	1430.7 $\pm$ 71.7 ^c	1316.9 $\pm$ 12.4 ^c	1224.1 $\pm$ 55.7 ^{bc}	958.4 $\pm$ 6.9 ^b	2390.9 $\pm$ 46.2 ^d	2144.2 $\pm$ 182.1 ^d	5255.2 $\pm$ 69.0 ^f	4702.0 $\pm$ 149.6 ^e	392.5 $\pm$ 7.1 ^a	374.7 $\pm$ 31.1 ^a
P	2268.9 $\pm$ 105.1 ^b	2580.0 $\pm$ 79.2 ^b	2530.2 $\pm$ 104.9 ^b	2524.9 $\pm$ 0.7 ^b	4147.8 $\pm$ 69.8 ^c	5347.0 $\pm$ 110.1 ^d	10,717.6 $\pm$ 24.5 ^f	9099.0 $\pm$ 141.1 ^e	873.1 $\pm$ 19.3 ^a	1138.3 $\pm$ 60.3 ^a
K	10,848.4 $\pm$ 40.6 ^c	9412.9 $\pm$ 56.0 ^b	10,356.6 $\pm$ 61.6 ^c	10,464.9 $\pm$ 16.6 ^c	17,595.8 $\pm$ 235.2 ^d	18,850.9 $\pm$ 53.0 ^e	10,686.2 $\pm$ 174.4 ^c	10,419.2 $\pm$ 14.4 ^c	1237.0 $\pm$ 12.7 ^a	1316.8 $\pm$ 12.5 ^a
Ca	1274.3 $\pm$ 52.9 ^d	1596.8 $\pm$ 37.3 ^e	677.6 $\pm$ 3.2 ^c	406.5 $\pm$ 8.4 ^b	1609.2 $\pm$ 22.7 ^e	2097.3 $\pm$ 136.6 ^f	1776.8 $\pm$ 17.9 ^e	1290.4 $\pm$ 0.7 ^d	69.7 $\pm$ 0.6 ^a	74.3 $\pm$ 0.4 ^a
Microelements										
Cr	0.119 $\pm$ 0.07 ^a	0.189 $\pm$ 0.06 ^b	0.119 $\pm$ 0.07 ^a	0.429 $\pm$ 0.01 ^e	0.950 $\pm$ 0.01 ^g	0.125 $\pm$ 0.09 ^a	0.331 $\pm$ 0.01 ^d	1.04 $\pm$ 0.02 ^h	0.485 $\pm$ 0.08 ^f	0.238 $\pm$ 0.01 ^c
Ni	4.150 $\pm$ 0.19 ^d	0.885 $\pm$ 0.09 ^a	3.596 $\pm$ 0.16 ^c	34.044 $\pm$ 0.18 ^g	8.436 $\pm$ 0.83 ^e	5.379 $\pm$ 0.15 ^d	3.443 $\pm$ 0.25 ^c	16.055 $\pm$ 0.07 ^f	1.152 $\pm$ 0.17 ^b	1.272 $\pm$ 0.23 ^b
Se	ND	ND	ND	0.322 $\pm$ 0.02	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cu	9.6 $\pm$ 0.4 ^e	4.9 $\pm$ 0.4 ^{bc}	7.6 $\pm$ 0.4 ^d	6.3 $\pm$ 0.1 ^{cd}	8.7 $\pm$ 0.0 ^e	14.1 $\pm$ 0.2 ^f	18.9 $\pm$ 1.0 ^g	14.9 $\pm$ 1.1 ^f	2.9 $\pm$ 0.1 ^{ab}	2.0 $\pm$ 0.1 ^a
Zn	32.7 $\pm$ 1.5 ^{cd}	21.7 $\pm$ 0.2 ^{ab}	26.1 $\pm$ 1.3 ^{bcd}	25.7 $\pm$ 0.1 ^{bc}	25.9 $\pm$ 0.1 ^{bc}	33.6 $\pm$ 5.6 ^d	77.0 $\pm$ 0.4 ^f	48.1 $\pm$ 0.8 ^e	14.7 $\pm$ 0.3 ^a	14.5 $\pm$ 0.1 ^a
Mn	22.4 $\pm$ 1.0 ^b	26.9 $\pm$ 1.1 ^c	11.0 $\pm$ 0.6 ^a	9.8 $\pm$ 0.3 ^a	27.2 $\pm$ 0.3 ^c	25.0 $\pm$ 0.2 ^{bc}	142.2 $\pm$ 0.6 ^e	102.6 $\pm$ 1.2 ^d	11.2 $\pm$ 0.2 ^a	11.4 $\pm$ 0.0 ^a
Fe	69.6 $\pm$ 3.6 ^e	49.2 $\pm$ 0.4 ^c	85.6 $\pm$ 4.2 ^f	35.1 $\pm$ 1.2 ^b	103.6 $\pm$ 1.3 ^g	59.3 $\pm$ 0.9 ^d	166.6 $\pm$ 0.9 ^h	204.0 $\pm$ 2.5 ⁱ	20.8 $\pm$ 0.3 ^a	68.1 $\pm$ 1.2 ^e
Trace Toxic Elements										
Cd	ND	ND	0.014 $\pm$ 0.04 ^a	0.289 $\pm$ 0.08 ^g	0.034 $\pm$ 0.02 ^b	0.040 $\pm$ 0.05 ^c	0.057 $\pm$ 0.01 ^e	0.075 $\pm$ 0.06 ^f	0.053 $\pm$ 0.03 ^d	0.036 $\pm$ 0.07 ^b
Pb	0.108 $\pm$ 0.05 ^a	0.115 $\pm$ 0.07 ^a	0.327 $\pm$ 0.01 ^d	0.602 $\pm$ 0.01 ^f	0.492 $\pm$ 0.06 ^e	0.176 $\pm$ 0.01 ^{ab}	0.481 $\pm$ 0.09 ^e	2.945 $\pm$ 0.06 ^g	0.216 $\pm$ 0.04 ^{bc}	0.263 $\pm$ 0.09 ^{cd}

* A and B are different commercial brands. a–i Values followed by different superscripts in the same row are significantly different ($p < 0.05$). ND not detected.

In addition to these elements, some minerals such as Cd and Pb have no known biological activity but accumulate in living organisms and can be highly toxic. Cadmium has not been detected in any of the chickpea flours analyzed, and the concentrations found in the other flours are low except in one of the pea flour samples. Although there is no specific legislation regarding Cd and Pb content in plant-based flours, there is European legislation regulating the Cd and Pb content in cereals and legumes. As far as cadmium content is concerned, REGULATION (EU) 2021/1323 sets a limit of 0.04 mg/kg in dry legumes and 0.15 mg/kg in rice. The results obtained from the samples analyzed show that all of them are below the established limits, except for one sample of pea flour, which shows very high Cd contents (0.289 mg/kg). Ingestion of Cd-contaminated food has been linked to renal tubular damage, osteoporosis and cancer [70].

However, all the flours analyzed showed the presence of lead. In one of the samples of soybean flour and pea flour and in the two samples of hemp flour, high concentrations of this mineral were found, which were particularly high in one hemp flour (2.94 mg/kg). The levels found in the samples analyzed are higher than those recommended by REGULATION (EU) 2021/1317, which sets a maximum limit for cereals and pulses of 0.2 mg/kg of Pb. Only the two samples of chickpea flour and one sample of soybean flour were below this value. Prolonged exposure to Pb has been linked to kidney problems or high blood pressure in adults and delayed physical and mental development in children [71].

3.3. Phenolic Composition and Antioxidant Activity

All the studied parameters, the total phenolic content (TPC), the total flavonoid content (TFC), the flavanone and dihydroflavonol content, varied significantly in the different samples studied (Table 3), depending both on the plant species and on the commercial brand. Therefore, the total phenolic content (TPC) varied from 6.33 mg GAE/100 g in rice (B) flour to 139.31 mg GAE/100 g in soybean (B) flour; the total flavonoid content ranged from 1.47 for rice to 66.65 mg of rutin/100 g for hemp, and flavanones and dihydroflavonols showed values between 328.31 for rice and 638.45 mg of pinocembrin/100 g for pea. These results showed that soybean flour had the highest values of TPC, followed by hemp, which showed the highest values of TFC and flavanones and dihydroflavonols, while pea showed similar values to hemp for this group of phenolic compounds. On the other hand, rice showed the lowest values of all the bioactive compounds. Variations between brands were observed in the TPC for chickpea, pea and especially for soybean and in flavanones and dihydroflavonols for pea and soybean, but this variation was particularly noticeable in TFC also for chickpea, pea and soybean.

As can be observed in Table 3, all pulse flours showed significantly higher values than cereal flour (rice) for all the parameters determined. These results are in agreement with those previously reported by Millar et al. [2], which showed that pulses (fava, green pea and yellow pea) had higher phenolic contents than wheat flour, and with those of the Rocchetti et al. [72], which found lower TPC in white rice than in the chickpea. Regarding pulses, chickpeas showed a higher content of TPC than peas agreeing with the results of Xu et al. [73], although Magalhães et al. [74] showed the opposite for field peas. However, for TFC, the values found in this work for peas were similar to or higher than those found for chickpea, which was in agreement with the results found by Magalhães et al. [74] but not with those reported by other authors [73,75]. On the other hand, hemp showed higher contents of TPC than green pea [76], although this work pointed out that wheat (cereal) showed higher TPC content than green peas, differing from the results of Millar et al. [2] and those obtained in this study. Moreover, the research by Multari et al. [76] found similar contents of TFC for green pea and hemp, which were significantly higher than that observed for wheat, in agreement with the present study. Xu et al. [73] reported significantly higher values for TPC and TFC values in soybean than in pea and chickpea, as observed in this study, although the differences were lower.

Table 3. The phenolic composition and antioxidant capacity (per 100 g of fresh weight) of different flours. Data presented as means $\pm$ standard deviation from triplicate analysis.

	Chickpea		Pea		Soybean		Hemp		Rice	
	A *	B	A	B	A	B	A	B	A	B
TPC	41.85 $\pm$ 2.04 ^c	24.26 $\pm$ 1.63 ^b	21.91 $\pm$ 0.01 ^b	7.48 $\pm$ 1.64 ^a	95.45 $\pm$ 9.25 ^f	139.30 $\pm$ 1.74 ^g	79.53 $\pm$ 2.81 ^e	66.42 $\pm$ 0.72 ^d	6.90 $\pm$ 0.80 ^a	6.33 $\pm$ 0.81 ^a
TFC	39.73 $\pm$ 2.00 ^{cd}	17.08 $\pm$ 6.01 ^b	48.21 $\pm$ 2.04 ^{de}	32.65 $\pm$ 0.05 ^c	32.61 $\pm$ 0.05 ^c	56.66 $\pm$ 10.12 ^{ef}	58.24 $\pm$ 4.05 ^{fg}	66.65 $\pm$ 0.09 ^g	5.73 $\pm$ 2.02 ^a	1.48 $\pm$ 0.01 ^a
F/DF	471.59 $\pm$ 18.91 ^c	436.58 $\pm$ 50.17 ^{bc}	638.46 $\pm$ 10.89 ^e	570.56 $\pm$ 12.44 ^d	457.73 $\pm$ 40.93 ^c	390.75 $\pm$ 1.06 ^{ab}	620.31 $\pm$ 6.19 ^{de}	580.62 $\pm$ 37.71 ^{de}	331.33 $\pm$ 13.95 ^a	328.31 $\pm$ 35.28 ^a
TEAC	3.79 $\pm$ 0.79 ^c	2.82 $\pm$ 0.18 ^{bc}	1.86 $\pm$ 0.08 ^{ab}	1.08 $\pm$ 0.84 ^a	7.91 $\pm$ 0.64 ^d	8.69 $\pm$ 0.71 ^d	3.45 $\pm$ 0.09 ^c	3.75 $\pm$ 0.87 ^c	1.27 $\pm$ 0.04 ^a	1.66 $\pm$ 0.20 ^{ab}

* A and B are different commercial brands. TPC: total phenolic content (mg GAE/100 g), TFC: total flavonoid content (mg rutin/100 g), F/ DF: flavanones and dihydroflavonols (mg pinocembrin/100 g), TEAC: total antioxidant activity (nmol Trolox/100 g). a–g: values followed by different superscripts in the same row are significantly different ($p < 0.05$).

The TPC of chickpea was lower than that previously reported [73,77,78] but close to the value (54 mg/100 g) found by Fernandez-Orozco et al. [79] and higher than the values found by Magalhães et al. [74]. Previous studies also showed that the most important phenolic compounds in chickpeas are phenolic acids [74,80], with p-hydroxybenzoic acid being the most relevant in relation to the antioxidant properties [81]. Some studies also showed the presence of flavonoids, as was found in the present study, but this depended on the variety [80,81].

The TPC of peas was also lower than previously reported for both yellow and green pea [2,73]. Previous studies also showed that it is possible to find both phenolic acids (protocatechuic and p-hydroxybenzoic acids) and flavonoid compounds such as luteolin and apigenin [74,82]. Regarding soybean flour, the TPC was in the lower half of the range reported by Slavin et al. [83] and Kumar et al. [84] and slightly lower than that previously reported by Xu et al. [73] but slightly higher than the value found for soybean flour by Villalobos et al. [85]. The most relevant phenolic compounds in soybean are isoflavones daidzein and genistein, although it also contains phenolic acids, such as gallic and protocatechuic acids, and flavonoids such as rutin and quercetin [86]. As mentioned above, the rice flour showed the lowest content of TPC; indeed, the values observed were slightly lower than those found in white rice flour [87] and significantly lower than the values described for wild, black or violet rice flours [72] because pigmented varieties have higher TPCs related to reducing disease risk [88]. The main individual phenolic compounds present in rice flour are phenolic acids such as vanillic, chlorogenic and ferulic acids and flavonoids such as epicatechin [87,89]. Finally, hemp flour showed TPC values similar to or slightly lower than those previously reported, ranging from 74.4 to 98.7 [3], but lower than the values reported by Irakli et al. [90]. The most important phenols found in hemp flour are phenolic acids such as protocatechuic, p-hydroxybenzoic, cinnamic acid and p-coumaric [76,90].

The total equivalent antioxidant capacity (TEAC) also showed a significant variation among flours depending more on the plant species rather than the commercial brand, as no significant differences were detected regarding this factor. The TEAC values ranged from 8.69 nmols for soybean to 1.08 nmols for Trolox per 100 g of pea. Soybean showed the highest statistically significant values of TEAC, followed by hemp and chickpea which did not show significant differences between them, while rice and pea showed the lowest values without statistically significant differences between them. As antioxidant activity can be measured by different methods, the results of the ABTS methods in the bibliography are scarce, although in general, higher values were reported [85,90]. This can be related to the fact that the bioactivity depends on the extraction and assay conditions, and the lack of standardization in these methods can make comparisons difficult [91]. However, previous studies have pointed out that soybean and hemp have a higher antioxidant capacity than peas, as observed in these commercial flours [73,75]. Indeed, hemp showed higher DPPH values than wheat, which means that this species has a higher antioxidant capacity than cereals, as has been observed in this study in rice [3]. Other studies also found that chickpea has a higher antioxidant activity, measured by FRAP and ORAC methods, than rice [87], which is in agreement with the results obtained in this study for the ABTS method.

As previously mentioned, the highest antioxidant activity and the highest phenolic content (Table 3) were observed in soybean flour. Then, the Pearson correlations between phenolic groups and ABTS were subsequently calculated. A positive correlation between the ABTS and TPC was observed ($r^2 = 0.935$, $p < 0.01$), agreeing with previous reports by Millar et al. [2], and also between the TFC and ABTS ($r^2 = 0.652$, $p < 0.05$).

Phenolic compounds are known to interact with proteins to form complexes that, in turn, decrease the solubility of proteins and make protein complexes less susceptible to proteolytic attack than the same proteins in isolation [92]. Furthermore, they impair starch and disaccharide assimilation and interact with proteolytic enzymes to inhibit their activity. Then, the lower TPC content of some flours may result in greater protein bioavailability, because the total phenols include tannins and phenolic acids, which can affect the overall

digestibility of pulse flour [93]. However, plant phenolics are attracting increased interest owing to their potential role as protective factors against free-radical-mediated pathologies, such as cancer and atherosclerosis in humans [94]. Indeed, phenolic compounds have a multitude of physiological functions such as anti-inflammatory and cardioprotective activity [95]. Owing to their intrinsic antioxidant activity, they are commonly used as food additives for the protection of food products against oxidation [96]. Knowledge of the biological activities of these plant chemicals is continually growing; they have the potential to play a preventative role in inflammatory conditions and the metabolic syndrome, as has been highlighted in several reviews [23,97,98].

The results presented in this study demonstrate the potential of incorporating such flours into cereal-based foods to increase the level of these beneficial plant chemicals in the diet. This was shown by Turco et al. [28], who used a wheat–pulse flour composite to increase the nutritive value of semolina pasta; a significant increase of 18% in antioxidant activity (ORAC) was observed. Similarly, [2] used wheat–pulse flour composites in the formulation of unleavened crackers. The authors reported an increase of up to 182% in antioxidant activity (DPPH).

3.4. Fatty Acid Profile

The results corresponding to the fatty acid composition of the various flours analyzed are shown in Table 4. Significant differences due to the vegetal species were observed for all the fatty acids but also between brands for pea, soybean and hemp, where these differences are very important for the first two.

The most abundant fatty acid in pulses and hemp was C18:2 n6, ranging from 40.7 to 56.5%, except for the B brand of soybean (28.1%), whereas rice flour showed a very low value of this fatty acid (4.8% on average). For these flours, the most abundant fatty acid was C16:0, with average values of 51.5% on average. The chickpea and hemp flours showed the highest values for C18:2 n6 acid without significant differences between them, followed by pea and soybean, with similar values. In fact, the significant differences observed for pea and soybean were between brands, with the difference being very important for this soybean flour.

The second most abundant fatty acid in pulses and rice flour was C18:1 (24.8–33.6%), except for the B brand of soybean (33.6%) for which C18:1 was the most abundant. Then, the highest values of this fatty acid were found for soybean and pea flours, followed by chickpea and rice, while hemp flours showed the lowest values.

However, for hemp flour and the B brand of pea, the second most abundant fatty acid was C18:3 n3, with C18:1 being the third most abundant fatty acid. In fact, marked differences among samples were observed for C18:3 n3, with hemp flours and the A brand of pea showing the highest levels, followed by soybean (A brand) and chickpea, while rice flour showed very low values.

On the other hand, chickpea, the A brand of pea and soybean flours showed higher values of the C16:0 (9.9–11.1%) than those observed for C18:3 n3, with the content in the B brand of soybean sample (21.7%) being especially high. As mentioned above, rice flour showed the highest values of this fatty acid, and it was the most abundant and different from all other flours. The pulses showed intermediate values, while hemp flours had the lowest contents of this fatty acid.

As far as C18:0 is concerned, significant differences were observed between vegetable species but also between brands. Therefore, the highest content of this fatty acid was therefore observed for the B brand of soybean, followed by the A brand of soybean, rice and pea without significant differences being found between the samples.

Table 4. The fatty acid composition of different flours (g per 100 g of total fatty acid methyl esters). Data presented as means $\pm$ standard deviation from triplicate analysis.

	Chickpea		Pea		Soyabean		Hemp		Rice	
	A *	B	A	B	A	B	A	B	A	B
C14: 0	0.14 $\pm$ 0.00 ^b	0.14 $\pm$ 0.00 ^b	0.51 $\pm$ 0.01 ^{bc}	0.81 $\pm$ 0.10 ^c	0.07 $\pm$ 0.0 ^a	0.16 $\pm$ 0.00 ^b	ND	ND	3.01 $\pm$ 0.35 ^e	1.79 $\pm$ 0.29 ^d
C15:0	0.06 $\pm$ 0.01 ^a	0.06 $\pm$ 0.00 ^a	ND	ND	0.02 $\pm$ 0.0 ^a	0.045 $\pm$ 0.01 ^a	ND	ND	0.26 $\pm$ 0.07 ^b	0.52 $\pm$ 0.32 ^b
C16:0	9.89 $\pm$ 0.01 ^c	10.76 $\pm$ 0.90 ^c	10.65 $\pm$ 0.51 ^c	10.83 $\pm$ 1.23 ^c	11.11 $\pm$ 1.17 ^c	21.69 $\pm$ 0.31 ^d	6.98 $\pm$ 0.04 ^a	8.67 $\pm$ 0.37 ^b	51.08 $\pm$ 0.81 ^e	52.50 $\pm$ 0.59 ^e
C16:1	0.24 $\pm$ 0.00 ^{cd}	0.26 $\pm$ 0.01 ^{de}	0.08 $\pm$ 0.01 ^a	0.18 $\pm$ 0.01 ^b	0.08 $\pm$ 0.01 ^a	0.11 $\pm$ 0.00 ^a	0.11 $\pm$ 0.00 ^a	0.21 $\pm$ 0.02 ^{bc}	0.29 $\pm$ 0.04 ^e	0.20 $\pm$ 0.03 ^{bc}
C17:0	0.07 $\pm$ 0.00 ^a	0.07 $\pm$ 0.01 ^a	ND	ND	0.13 $\pm$ 0.00 ^a	0.22 $\pm$ 0.02 ^a	ND	ND	1.08 $\pm$ 0.40 ^b	0.42 $\pm$ 0.43 ^a
C17:1	0.07 $\pm$ 0.00 ^a	0.18 $\pm$ 0.14 ^a	0.05 $\pm$ 0.02 ^a	0.94 $\pm$ 0.58 ^a	ND	ND	ND	ND	0.53 $\pm$ 0.60 ^a	0.15 $\pm$ 0.07 ^a
C18:0	1.56 $\pm$ 0.02 ^a	1.57 $\pm$ 0.04 ^a	4.50 $\pm$ 0.37 ^d	2.83 $\pm$ 0.70 ^b	4.61 $\pm$ 0.18 ^d	9.62 $\pm$ 0.25 ^e	3.16 $\pm$ 0.01 ^{bc}	2.17 $\pm$ 0.47 ^{ab}	4.82 $\pm$ 1.15 ^d	4.04 $\pm$ 0.04 ^{cd}
C18:1 n9	0.05 $\pm$ 0.01 ^{ab}	0.02 $\pm$ 0.01 ^a	0.10 $\pm$ 0.01 ^{ab}	0.49 $\pm$ 0.08 ^{cd}	0.07 $\pm$ 0.03 ^{ab}	0.38 $\pm$ 0.03 ^{bc}	0.02 $\pm$ 0.00 ^a	0.84 $\pm$ 0.42 ^e	1.23 $\pm$ 0.09 ^f	0.78 $\pm$ 0.05 ^{de}
C18:1	26.51 $\pm$ 0.24 ^c	26.63 $\pm$ 0.67 ^c	31.51 $\pm$ 0.52 ^d	15.15 $\pm$ 1.64 ^b	24.81 $\pm$ 1.80 ^c	33.65 $\pm$ 0.10 ^d	13.55 $\pm$ 0.06 ^b	10.81 $\pm$ 1.33 ^a	25.80 $\pm$ 0.21 ^c	25.25 $\pm$ 1.56 ^c
C18:1n7	1.36 $\pm$ 0.00 ^c	0.85 $\pm$ 0.11 ^b	ND	ND	1.03 $\pm$ 0.11 ^b	1.67 $\pm$ 0.06 ^a	0.63 $\pm$ 0.02 ^a	0.94 $\pm$ 0.13 ^b	ND	ND
C18:2 n6t	0.01 $\pm$ 0.00 ^a	0.08 $\pm$ 0.01 ^a	ND	ND	ND	ND	ND	ND	2.83 $\pm$ 0.82 ^b	2.58 $\pm$ 1.37 ^b
C18:2 n6	54.51 $\pm$ 0.18 ^{ef}	53.81 $\pm$ 0.50 ^e	40.72 $\pm$ 0.36 ^c	47.82 $\pm$ 1.03 ^d	48.09 $\pm$ 1.90 ^d	28.14 $\pm$ 0.78 ^b	56.58 $\pm$ 0.05 ^f	52.85 $\pm$ 1.61 ^e	4.25 $\pm$ 1.80 ^a	5.37 $\pm$ 0.74 ^a
C20:0	0.93 $\pm$ 0.02 ^a	0.97 $\pm$ 0.01 ^a	0.94 $\pm$ 0.23 ^a	0.92 $\pm$ 0.93 ^a	0.46 $\pm$ 0.00 ^a	0.88 $\pm$ 0.01 ^a	0.89 $\pm$ 0.01 ^a	0.71 $\pm$ 0.21 ^a	0.83 $\pm$ 0.09 ^a	0.67 $\pm$ 0.19 ^a
C20:1 n9	0.02 $\pm$ 0.00 ^a	0.01 $\pm$ 0.00 ^a	ND	ND	0.03 $\pm$ 0.00 ^b	0.06 $\pm$ 0.00 ^c	ND	ND	ND	ND
C18:3 n3	3.45 $\pm$ 0.03 ^a	3.43 $\pm$ 0.01 ^a	9.72 $\pm$ 1.48 ^b	17.33 $\pm$ 3.15 ^c	8.36 $\pm$ 1.22 ^b	1.50 $\pm$ 0.07 ^a	16.75 $\pm$ 0.06 ^c	15.19 $\pm$ 1.35 ^c	0.96 $\pm$ 1.11 ^a	1.75 $\pm$ 0.11 ^a
C21:0	0.10 $\pm$ 0.00 ^b	0.09 $\pm$ 0.00 ^b	ND	ND	0.05 $\pm$ 0.00 ^a	0.08 $\pm$ 0.01 ^b	ND	ND	ND	ND
C20:2 n6	0.09 $\pm$ 0.00 ^a	0.10 $\pm$ 0.00 ^a	ND	ND	0.04 $\pm$ 0.00 ^a	0.06 $\pm$ 0.00 ^a	ND	ND	0.48 $\pm$ 0.20 ^b	0.39 $\pm$ 0.15 ^b
C22:0	0.68 $\pm$ 0.02 ^{de}	0.64 $\pm$ 0.02 ^{cde}	0.28 $\pm$ 0.05 ^{ab}	0.19 $\pm$ 0.10 ^a	0.62 $\pm$ 0.04 ^{bcde}	0.89 $\pm$ 0.03 ^e	0.44 $\pm$ 0.01 ^{abcd}	0.56 $\pm$ 0.43 ^{bcde}	0.30 $\pm$ 0.04 ^{abc}	0.40 $\pm$ 0.02 ^{abcd}
C22:1 n9	0.04 $\pm$ 0.00 ^a	0.04 $\pm$ 0.01 ^a	0.08 $\pm$ 0.02 ^a	0.43 $\pm$ 0.10 ^a	0.01 $\pm$ 0.00 ^a	0.06 $\pm$ 0.00 ^a	ND	ND	0.66 $\pm$ 0.15 ^a	2.19 $\pm$ 1.77 ^b
C20:3 n3	ND	ND	0.01 $\pm$ 0.01 ^a	0.09 $\pm$ 0.07 ^a	ND	ND	ND	ND	0.54 $\pm$ 0.05 ^b	0.40 $\pm$ 0.15 ^b
C20:4 n6	0.11 $\pm$ 0.01 ^b	0.11 $\pm$ 0.00 ^b	ND	ND	0.06 $\pm$ 0.01 ^a	0.11 $\pm$ 0.01 ^b	ND	ND	ND	ND
C22:2 n6	0.04 $\pm$ 0.04 ^a	0.10 $\pm$ 0.05 ^a	0.05 $\pm$ 0.04 ^a	0.33 $\pm$ 0.25 ^a	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C24:0	ND	ND	0.69 $\pm$ 0.06 ^b	0.29 $\pm$ 0.05 ^a	ND	ND	ND	ND	0.80 $\pm$ 0.09 ^b	0.46 $\pm$ 0.03 ^a
C20:5 n3	ND	ND	ND	ND	0.20 $\pm$ 0.01 ^a	0.36 $\pm$ 0.02 ^b	0.19 $\pm$ 0.00 ^a	0.26 $\pm$ 0.10 ^{ab}	ND	ND
C24:1 n9	0.02 $\pm$ 0.01 ^a	0.01 $\pm$ 0.01 ^a	0.06 $\pm$ 0.03 ^a	1.33 $\pm$ 0.44 ^b	0.08 $\pm$ 0.04 ^a	0.18 $\pm$ 0.04 ^a	ND	ND	ND	ND
SFA	13.45 $\pm$ 0.02 ^{ab}	14.34 $\pm$ 0.83 ^{abc}	17.58 $\pm$ 1.20 ^c	15.88 $\pm$ 2.61 ^{bc}	17.08 $\pm$ 1.33 ^c	33.60 $\pm$ 0.56 ^d	11.47 $\pm$ 0.07 ^a	12.13 $\pm$ 1.48 ^a	62.20 $\pm$ 2.60 ^e	60.83 $\pm$ 0.75 ^e
MUFA	28.31 $\pm$ 0.21 ^c	28.03 $\pm$ 0.38 ^c	31.90 $\pm$ 0.59 ^d	18.52 $\pm$ 1.75 ^b	26.11 $\pm$ 1.78 ^c	36.11 $\pm$ 0.23 ^e	14.32 $\pm$ 0.04 ^a	12.81 $\pm$ 1.90 ^a	28.52 $\pm$ 0.72 ^c	28.59 $\pm$ 0.21 ^c
PUFA	58.23 $\pm$ 0.23 ^d	57.63 $\pm$ 0.45 ^d	50.52 $\pm$ 1.80 ^c	65.59 $\pm$ 4.36 ^e	56.81 $\pm$ 3.11 ^d	30.28 $\pm$ 0.78 ^b	74.21 $\pm$ 0.11 ^f	75.05 $\pm$ 3.39 ^f	9.27 $\pm$ 1.87 ^a	10.58 $\pm$ 0.54 ^a
n3	3.45 $\pm$ 0.03 ^a	3.43 $\pm$ 0.01 ^a	9.75 $\pm$ 1.48 ^b	17.43 $\pm$ 3.08 ^c	8.61 $\pm$ 1.21 ^b	1.97 $\pm$ 0.01 ^a	16.95 $\pm$ 0.06 ^c	15.45 $\pm$ 1.24 ^c	1.51 $\pm$ 1.16 ^a	2.15 $\pm$ 0.05 ^a
n6	54.78 $\pm$ 0.21 ^e	54.20 $\pm$ 0.44 ^e	40.77 $\pm$ 0.32 ^c	48.15 $\pm$ 1.28 ^d	48.19 $\pm$ 1.90 ^d	28.31 $\pm$ 0.77 ^b	57.26 $\pm$ 0.06 ^f	59.60 $\pm$ 2.13 ^f	7.77 $\pm$ 0.72 ^a	8.42 $\pm$ 0.49 ^a
n6/n3	15.89 $\pm$ 0.08 ^c	15.79 $\pm$ 0.06 ^c	4.23 $\pm$ 0.61 ^a	2.80 $\pm$ 0.42 ^a	5.63 $\pm$ 0.57 ^b	14.34 $\pm$ 0.27 ^c	3.38 $\pm$ 0.01 ^a	3.86 $\pm$ 0.17 ^a	5.0 $\pm$ 2.96 ^b	3.90 $\pm$ 0.14 ^a

* A and B are different commercial brands. a–f: values followed by different superscripts in the same row are significantly different ($p < 0.05$). ND not detected.

Some fatty acids were found in certain vegetable species but not in others such as C15:0, C17:0 or C18:1n9t. Other fatty acids were determined only in some samples such as linolenic- γ , which was found in hemp; the amount of the two brands analyzed was different, as that of the B brand was 6 times higher than that of the A brand (6.75 vs. 0.68%). Eicosatrienoic was found only in rice, and DHA was determined only in soybean flours; in both cases, the levels were very low (<1%) and there were no significant differences between brands. It is noteworthy that hemp had the lowest variety of fatty acids, while chickpeas showed the highest number of fatty acids.

According to these values, pulses showed very high contents of polyunsaturated fatty acids (PUFA) (50–65%), especially n6 PUFA (48–54%), followed by monounsaturated fatty acids (MUFA) (18–31%) and with low values of saturated fatty acids (SFA) (13–17%), except for the B brand of soybean, which showed a different behavior, and the levels of the three FA groups were similar. Moreover, pea, followed by soybean, was characterized by the high contents of n3 PUFA, while chickpea had the lowest values. These results are in agreement with those previously reported by Jahreis et al. [99].

The findings of this study regarding the fatty acid profile of chickpeas are similar to those reported by other authors who found the SFA to be between 12.6 and 16.5% (13.4%), the MUFA between 19 and 39% (28.2%) and the PUFA between 44 and 63% (58%) [99–103]. Among the PUFAs, the percentage of n3 and the n6/n3 ratio were within the range previously reported (15–21%) [99,102]. These studies also found that the most dominant fatty acid in chickpea is linoleic acid (42.1–61.4%), followed by oleic acid (20.1–38.5%), palmitic acid (9.1–12.1%), linolenic acid (2.1–6.6%) and stearic acid (1.3–2.4%). The variations reported can be attributed to environmental factors and the cultivar [103].

The results from pea indicate that the values found for the A brand for SFA, MUFA and PUFA are within the range described by previous studies, i.e., 11–23%, 26–34% and 41–56%, respectively [99,104,105]; however the B brand showed slightly higher values for PUFA and lower values for MUFA. The n6/n3 ratios in the analyzed A and B flours were slightly lower than the values previously found [99,105], and the values were significantly lower than those found for chickpeas. For chickpeas and other pulses, the main fatty acid was linoleic acid, followed by oleic acid, and the values were similar to those reported in other studies (34.7–47.7% and 25.0–33.3%, respectively) [99,103,105,106]. In general, the amount of linoleic acid and oleic acid was similar to that of other pulses, such as beans and lentils, which have 46.7 and 44.4% linoleic acid and 28.1 and 20.9% oleic acid, respectively [103]. These fatty acids were followed by linolenic acid, in contrast to chickpeas, and showed slightly higher values than those previously reported (6.5–8.3%), while palmitic acid showed lower values (15.5–12.6%) [99,105].

Soybean flour A showed a similar percentage of SFA, MUFA and PUFA to pea and chickpea. This result and the percentages observed are in agreement with the data reported by Jahreis et al. [99] and Dahmer et al. [107], who also found that the n6/n3 ratio varied between 5.8 and 8.2, as was observed for the A flour. Then, the main fatty acids of the A brand flour were linoleic, oleic, palmitic and α -linolenic acid, as previously observed [99,108–111], with the percentages observed for these four fatty acids within the range described by these authors being 40.4–54.8%, 17.5–21.4%, 10.8–13.1% and 5.3–9.9%, respectively. However, the B flour showed a lower amount of PUFA and a higher amount of the two other fatty acid groups and a very low amount of n3. The differences in the technological process, which led to a variation in the fat content (18 vs. 23%), may be the origin of the difference in the level of fatty acids, together with differences in environmental factors and the cultivar [112].

Hemp flour showed the highest PUFA contents among the flours analyzed, with a value of 74–75%, while the MUFA and SFA were about 11–14%. These results are in agreement with the values described in both flours and hemp seeds [90,113–115]. The high proportion of n3 fatty acids, which makes the ratio of n6/n3 one of the lowest among the flours analyzed, is noteworthy. These studies also highlight the high percentage of linoleic acid (51.6–56.4%) followed by α -linolenic (10.5–17.3%) and oleic acid (10.7–17.9%), with

significant levels of γ -linolenic acid (3–18%), which is in accordance with the findings of this study.

Finally, rice flour showed a very different fatty acid profile, with high amounts of SFA, low amounts of PUFA compared with the remainder of the flours and with the data reported in the literature pointing to levels of SFA between 25 and 39.3%, and low amounts of MUFA between 34.9 and 50.9% and of PUFA between 9.9 and 37.2% for milled rice flour [116–118]. The closest values were found for parboiled milled rice, with an SFA content of 55.5% [116]. These results highlight the strong influence of the rice variety and the technological process on the fatty acid profile of rice flour [116]. The main fatty acids in the flours analyzed were palmitic acid, followed by oleic, linoleic and stearic acids, in contrast to the findings of previous studies, which reported that the main fatty acids were oleic, palmitic and linoleic acid for white rice flours and oleic, linoleic and palmitic acids for brown rice flours [118,119].

Fatty acids of specific chain length and saturation are required by humans for their structural and metabolic needs. Linoleic acid is responsible for the production of prostaglandins, which prevent the concentration of heavy cholesterol on the blood vessel walls [120], but is also correlated with an improved blood lipid profile, lower incidence of type 2 diabetes, improved insulin sensitivity and anti-arrhythmic effects. Oleic acid is known to have beneficial effects on autoimmune and inflammatory diseases, as well as cancer and the healing of wounds [121]. α -Linolenic acid is an essential fatty acid correlated to inflammatory and immunosuppressive activities by means of the formation of several intermediates such as leukotrienes, thromboxane and prostaglandins [122]. However, unsaturated fatty acids are susceptible to lipid oxidation, which results in undesirable changes in organoleptic properties owing to the presence of off flavors [123]. In this sense, oleic and linoleic acids show less propensity towards oxidation compared to linolenic acid during processing [124]. Pulses and hemp flours were characterized by high levels of all these fatty acids, which are correlated with the above-mentioned health benefits, with pea and hemp flours showing the highest levels of linolenic acid.

However, not only PUFA levels but also the n-6/n-3 PUFA ratio should be taken into account. According to the World Health Organization, this ratio should be below 4:1, as is shown by both brands of both pea and hemp flours. In this context, if any flour with a high n6/n3 ratio is to be partially replaced, it would be desirable to use hemp flour, owing to its low n6/n3 ratio or pea flour, as this contains only a small amount of fat with a large amount of oleic acid and an adequate n6/n3 ratio.

3.5. PCA Method

Principal component analysis yielded six PCs with an eigenvalue >1 , which explained 96.43% of the variance. Figure 1 shows the projection plot of the samples and the original variables in the space defined by the first two PCs, which explain 70.36% of the variance.

Soybean samples were found in the upper-right quadrant, with positive values of both PCs, due to the strong contribution of protein, ash, TPC, Ca and K to PC1, together with the correlation of C22:0 and C18:1 to the PC2. The hemp flour samples presented positive PC1 values due to the correlation of this PC1 with ash and fiber, as previously mentioned, but also with TFC and Cu contents. These samples also showed negative PC2 values, which were correlated with C18:2, Mg and Fe variables, but mainly with C18:3 levels. In the opposite quadrant were chickpea samples showing positive PC2 values, which correlated with the observed levels of C18:1 and C18:0 (as for soybean and one pea sample, which have positive PC1 values). In fact, chickpea samples had negative PC1 values due to the strong correlation with Na.

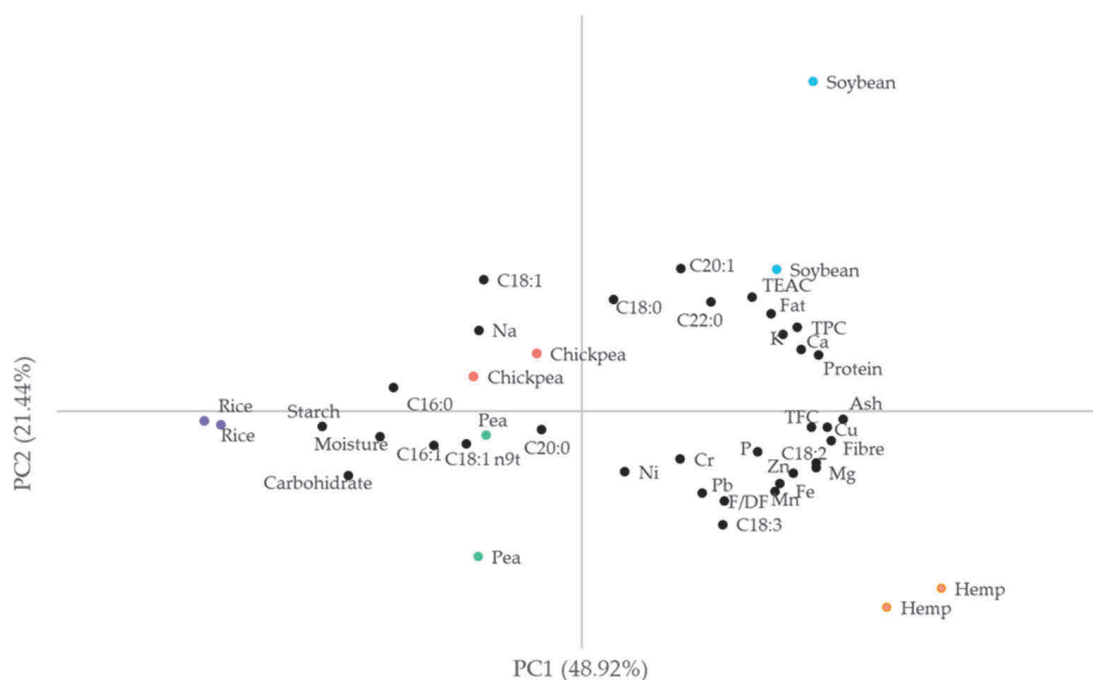


Figure 1. Projection plot of the flour samples in the space defined by the two firsts PCs. TPC: total phenolic content, TFC: total flavonoid content, F/DF: flavanones and dihydroflavonols, TEAC: total equivalent antioxidant activity (nmol Trolox/100 g).

Pea and rice samples were in the lower-left quadrant and showed negative PC1 and PC2 values. Thus, rice samples had the highest levels of C16:0 and C18:1n9t but also of carbohydrates and starch, together with the lowest values of TFC, TPC, C18:2 and most minerals. The pea samples had a high moisture content but also low values of Mg, P and Ca. However, they showed the highest values of Pb, which was associated with the negative values of PC2. As in the case of rice, the pea samples showed relatively low TPC and TEAC values. One sample showed very low amounts of C18:1, which justifies the low PC2 value observed.

The figure also shows that the samples of the two brands of rice, hemp and chickpea were close, while the two samples of pea and especially soybean were separated due to the observed compositional differences. Indeed, the soybean, rice and hemp flours were very different from each other, while the chickpea flour and one of the pea samples were quite close.

4. Conclusions

Although plant-based flours are referred to as a generic term, not all products under this name have a similar composition and therefore do not make a similar contribution from a nutritional point of view. All the flours analyzed in this study (chickpea, pea, soybean and hemp) have carbohydrates as their main component and provide a similar amount of energy (Kcal/100 g). However, pea and chickpea flours contain large amounts of protein and fiber, while soybean and hemp flours provide significant amounts of fat. Regarding the mineral composition, potassium and phosphorus as macro-elements and iron as a microelement are the major components in all flours. The phenolic composition, antioxidant activity and fatty acid profile of these meals vary greatly depending on the plant species. In addition to these differences, plant-based flours have been shown to have highly variable compositions between different commercial brands, which makes it necessary to educate consumers to check the nutritional labels of this type of food in order to ensure healthy diets. Surprisingly, the presence of high amounts of lead has also been detected in some of these flours, so health authorities should be aware of this fact in order to implement control mechanisms for plant-based flours.

Author Contributions: Conceptualization and methodology, A.M.V.-Q. and I.R.; formal analysis, Y.A.; data curation, M.H.-J.; writing—original draft preparation, M.H.-J. and Y.A.; writing—review and editing, A.M.V.-Q. and I.R. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Data Availability Statement: The data presented in this study are available on request from the corresponding author.

Acknowledgments: Y. Absi acknowledges the Algerian government for the grant long-term residential doctoral program abroad and M. Hernández-Jimenez acknowledges the Own Program III: Grants for Pre-doctoral Contracts of the University of Salamanca co-funded by Banco Santander.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Bigliardi, B.; Galati, F. Innovation trends in the food industry: The case of functional foods. *Trends Food Sci. Technol.* **2013**, *31*, 118–129. [\[CrossRef\]](#)
- Millar, K.A.; Gallagher, E.; Burke, R.; McCarthy, S.; Barry-Ryan, C. Proximate composition and anti-nutritional factors of fava-bean (*Vicia faba*), green-pea and yellow-pea (*Pisum sativum*) flour. *J. Food Compos. Anal.* **2019**, *82*, 103233. [\[CrossRef\]](#)
- Mikulec, A.; Kowalski, S.; Sabat, R.; Skoczylas, L.; Tabaszewska, M.; Wywrocka-Gurgul, A. Hemp flour as a valuable component for enriching physicochemical and antioxidant properties of wheat bread. *LWT* **2019**, *102*, 164–172. [\[CrossRef\]](#)
- Gambus, H.; Gambus, F.; Pastuszka, D.; Wrona, P.; Ziobro, R.; Sabat, R.; Mickowska, B.; Nowotna, A.; Sikora, M. Quality of glutenfree supplemented cakes and biscuits. *International. J. Food Sci. Nutr.* **2009**, *60*, 31–50. [\[CrossRef\]](#)
- Niro, S.; D’Agostino, A.; Fratianni, A.; Cinquanta, L.; Panfili, G. Gluten-Free Alternative Grains: Nutritional Evaluation and Bioactive Compounds. *Foods* **2009**, *8*, 208. [\[CrossRef\]](#)
- Di Liberto, D.; Carlisi, D.; D’Anne, A.; Emanuele, S.; Giuliano, M.; De Blasio, A.; Calvaruso, G.; Lauricella, M. Gluten Free Diet for the Management of Non Celiac Diseases: The Two Sides of the Coin. *Healthcare* **2020**, *8*, 400. [\[CrossRef\]](#)
- Doxastakis, G.; Zafiriadis, I.; Irakli, M.; Marlani, H.; Tananaki, C. Lupin, soya and triticale addition to wheat flour doughs and their effect on rheological properties. *Food Chem.* **2002**, *77*, 219–227. [\[CrossRef\]](#)
- Hefnawy, T.M.H.; El-Shourbagy, G.A.; Ramadan, M.F. Impact of adding chickpea (*Cicer arietinum*, L.) flour to wheat flour on the rheological properties of toast bread. *Int. Food Res. J.* **2012**, *19*, 521–525.
- Dwyer, J.T.; Wiemer, K.L.; Dary, O.; Keen, C.L.; King, J.C.; Miller, K.B.; Philbert, M.A.; Tarasuk, V.; Taylor, C.L.; Gaine, P.C.; et al. Fortification and Health: Challenges and Opportunities. *Adv. Nutr.* **2015**, *6*, 124–131. [\[CrossRef\]](#)
- Xu, Q.C. Studies of the differences of amino acid contents in rice varieties and the relationship between the amino acid content and genetic code numbers. *J. Hunan Agric. Coll.* **1990**, *16*, 221–225.
- Wu, J.G.; Shi, C.; Zhang, X. Estimating the amino acid composition in milled rice by near-infrared reflectance spectroscopy. *Field Crops Res.* **1990**, *75*, 1–7. [\[CrossRef\]](#)
- Storck, C.R.; Picolli da Silva, L.; Alves Fagundes, C.A. Categorizing rice cultivars based on differences in chemical composition. *J. Food Compos. Anal.* **2005**, *18*, 333–341. [\[CrossRef\]](#)
- Das, A.B.; Bhattacharya, S. Characterization of the batter and gluten-free cake from extruded red rice flour. *LWT* **2019**, *102*, 197–204. [\[CrossRef\]](#)
- Seetapan, S.; Limpanyoon, N.; Yooberg, R.; Leelawat, B.; Charunuch, C. Influence of addition of extruded rice flour on preparation and quality of fresh gluten-free yellow alkaline noodles. *J. Cereal Sci.* **2019**, *90*, 102828. [\[CrossRef\]](#)
- Charoenthaikij, P.; Jangchud, K.; Jangchud, A.; Prinyawiwatkul, W.; Tungtrakul, P. Germination conditions affect selected quality of composite wheat-germinated brown rice flour and bread formulations. *J. Food Sci.* **2010**, *75*, S312–S318. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Marti, A.; Caramanico, R.; Bottega, G.; Pagani, M.A. Cooking behavior of rice pasta: Effect of thermal treatments and extrusion conditions. *LWT* **2013**, *54*, 229–235. [\[CrossRef\]](#)
- Messina, V. Nutritional and health benefits of dried beans. *Am. J. Clin. Nutr.* **2014**, *100*, 437S–442S. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Hoffman, J.R.; Falvo, M.J. Protein—Which is Best? *J. Sport. Sci. Med.* **2004**, *3*, 118–130.
- Boye, J.; Zare, F.; Pletch, A. Pulse proteins: Processing, characterization, functional properties and applications in food and feed. *Food Res. Int.* **2010**, *43*, 414–431. [\[CrossRef\]](#)
- Herranz, B.; Canet, W.; Jiménez, M.J.; Fuentes, R.; Alvarez, M.D. Characterisation of chickpea flour-based gluten-free batters and muffins with added biopolymers: Rheological, physical and sensory properties. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2016**, *51*, 1087–1098. [\[CrossRef\]](#)
- Han, J.; Janz, J.A.M.; Gerlat, M. Development of gluten-free cracker snacks using pulse flours and fractions. *Food Res. Int.* **2010**, *43*, 627–633. [\[CrossRef\]](#)
- Laleg, K.; Barron, C.; Santé-Lhoutellier, V.; Walrand, S.; Micard, V. Protein enriched pasta: Structure and digestibility of its protein network. *Food Funct.* **2016**, *7*, 1196–1207. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)

23. Campos-Vega, G.; Loarca-Piña, B.; Oomah, D. Minor components of pulses and their potential impact on human health. *Food Res. Int.* **2010**, *43*, 461–482. [\[CrossRef\]](#)
24. Amarakoon, A.; Thavarajah, D.; McPhee, K.; Thavarajah, P. Iron-, zinc-, and magnesium-rich field peas (*Pisum sativum* L.) with naturally low phytic acid: A potential food-based solution to global micronutrient malnutrition. *J. Food Compos. Anal.* **2012**, *27*, 8–13. [\[CrossRef\]](#)
25. Sanchez, H.D.; Osella, C.A.; de la Torre, M.A. Use of Response Surface Methodology to Optimize Gluten-Free Bread Fortified with Soy Flour and Dry Milk. *Food Sci. Technol. Int.* **2004**, *10*, 5–9. [\[CrossRef\]](#)
26. Shogren, R.L.; Hareland, G.A.; Wu, Y.V. Sensory evaluation and composition of Spaghetti fortified with soy flour. *J. Food Sci.* **2006**, *71*, 428–432. [\[CrossRef\]](#)
27. Shin, D.J.; Kim, W.; Kim, Y. Physicochemical and sensory properties of soy bread made with germinated, steamed and roasted soy flour. *Food Chem.* **2013**, *141*, 517–523. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
28. Turco, I.; Ferretti, G.; Bacchetti, T. Review of the health benefits of Faba bean (*Vicia faba* L.) polyphenols. *J. Food Nutr. Res.* **2016**, *55*, 283–293. [\[CrossRef\]](#)
29. Durazzo, A.; Turfani, V.; Narducci, V.; Azzini, E.; Maiani, G.; Carcea, M. Nutritional characterisation and bioactive components of commercial carobs flours. *Food Chem.* **2014**, *153*, 109–113. [\[CrossRef\]](#)
30. González-Montemayor, A.M.; Flores-Gallegos, A.C.; Contreras-Esquivel, J.C.; Solanilla-Duque, J.F.; Rodríguez-Herrera, R. *Prosopis* spp. functional activities and its applications in bakery products. *Trends Food Sci. Technol.* **2019**, *94*, 12–19. [\[CrossRef\]](#)
31. Petrović, M.; Debeljak, Ž.; Kezić, N.; Džidara, P. Relationship between cannabinoids content and composition of fatty acids in hempseed oils. *Food Chem.* **2015**, *170*, 218–225. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
32. Hofmanová, T.; Švec, I.; Hrušková, M. Nutritional properties of non-traditional seeds. *J. Life Med.* **2014**, *2*, 10–14.
33. Korus, J.; Witzak, M.; Ziobro, R.; Juszczak, L. Hemp (*Cannabis sativa* subsp. *sativa*) flour and protein preparation as natural nutrients and structure forming agents in starch based gluten-free bread. *LWT* **2017**, *84*, 43–150. [\[CrossRef\]](#)
34. Pojić, M.; Dapčević Hadnađev, T.; Hadnađev, M.; Rakita, S.; Brlek, T. Bread supplementation with hemp seed cake: A by-product of hemp oil processing. *J. Food Qual.* **2015**, *38*, 431–440. [\[CrossRef\]](#)
35. de la Barca, A.M.C.; Rojas-Martínez, M.E.; Islas-Rubio, A.R.; Cabrera-Chávez, F. Gluten-free breads and cookies of raw and popped amaranth flours with attractive technological and nutritional qualities. *Plant Foods Hum. Nutr.* **2010**, *65*, 241–246. [\[CrossRef\]](#)
36. Codinã, G.G.; Franciuc, S.G.; Mironeasa, S. Rheological Characteristics and Microstructure of Milk Yogurt as Influenced by Quinoa Flour Addition. *J. Food Qual.* **2016**, *39*, 559–566. [\[CrossRef\]](#)
37. Miranda-Villa, P.P.; Mufari, J.R.; Bergesse, A.E.; Calandri, E.L. Effects of whole and malted quinoa flour addition on gluten-free muffins quality. *J. Food Sci.* **2018**, *84*, 147–153. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
38. Khan, I.; Yousif, A.; Johnson, S.K.; Gamlath, S. Effect of sorghum flour addition on resistant starch content, phenolic profile and antioxidant capacity of durum wheat pasta. *Food Res. Int.* **2013**, *54*, 578–586. [\[CrossRef\]](#)
39. Yousif, A.; Nhepera, D.; Johnson, S. Influence of sorghum flour addition on flat bread in vitro starch digestibility, antioxidant capacity and consumer acceptability. *Food Chem.* **2012**, *134*, 880–887. [\[CrossRef\]](#)
40. Aschemann-Witzel, J.; Füttrup-Gantriis, R.; Fraga, P.; Perz-cueto, F.J.A. Plant-based food and protein trend from a business perspective: Markets, consumers and the challenges and opportunities in the future. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2020**, *61*, 3119–3128. [\[CrossRef\]](#)
41. AOAC International. *Official Methods of Analysis*, 20th ed.; Association of Official Analytical Chemists: Gaithersburg, MD, USA, 2016.
42. AACC. American Association of Cereal Chemists Method 44-15.02., Moisture: Air Oven Methods. In *Approved Methods of Analysis*, 11th ed.; AACC International: St. Paul, MN, USA, 2001.
43. AACC. American Association of Cereal Chemists Method 08-01.01. Ash—Basic method. In *Approved Methods of Analysis*, 11th ed.; AACC International: St. Paul, MN, USA, 1999.
44. AOAC International. *Official Methods of Analysis*, 16th ed.; Association of Official Analytical Chemists: Washington, DC, USA, 1995.
45. Lurueña-Martínez, M.A.; Palacios, C.; Vivar-Quintana, A.M.; Revilla, I. Effect of the addition of calcium soap to ewes' diet on fatty acid composition of ewe milk and subcutaneous fat of suckling lambs reared on ewe milk. *Meat Sci.* **2010**, *84*, 677–683. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
46. Betances-Salcedo, E.; Revilla, I.; Vivar-Quintana, A.M.; González-Martín, M.I. Flavonoid and antioxidant capacity of propolis prediction using near infrared spectroscopy. *Sensors* **2017**, *17*, 1647. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
47. Valencia, D.; Alday, E.; Robles-Zepeda, R.; Garibay-Escobar, A.; Galvez-Ruiz, J.C.; Salas-Reyes, M.; Jiménez-Estrada, M.; Velazquez-Contreras, E.; Hernandez, J.; Velazquez, C. Seasonal effect on chemical composition and biological activities of Sonoran propolis. *Food Chem.* **2012**, *131*, 645–651. [\[CrossRef\]](#)
48. Popova, M.; Bankova, V.; Butovska, D.; Petkov, V.; Nikolova-Damyanova, B.; Sabatini, A.G.; Marcazzan, G.L.; Bogdanov, S. Validated methods for the quantification of biologically active constituents of poplar-type propolis. *Phytochem. Anal. Int. J. Plant Chem. Biochem. Tech.* **2004**, *15*, 235–240. [\[CrossRef\]](#)
49. Chen, J.; Lindmark-Månsson, H.; Gorton, L.; Åkesson, B. Antioxidant capacity of bovine milk as assayed by spectrophotometric and amperometric methods. *Int. Dairy J.* **2003**, *13*, 927–935. [\[CrossRef\]](#)

50. Lan, Y.; Zha, F.; Peckrul, A.; Hanson, B.; Johnson, B.; Rao, J.; Chen, B. Genotype x environmental effects on yielding ability and seed chemical composition of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) varieties grown in North Dakota, USA. *J. Am. Oil Chem. Soc.* **2019**, *96*, 1417–1425. [\[CrossRef\]](#)
51. Vatansever, S.; Rao, J.; Hall, C. Effects of ethanol modified supercritical carbon dioxide extraction and particle size on the physical, chemical, and functional properties of yellow pea flour. *Cereal Chem.* **2020**, *97*, 1133–1147. [\[CrossRef\]](#)
52. Wani, S.A.; Kumar, P. Comparative study of chickpea and green pea flour based on chemical composition, functional and pasting properties. *J. Food Res. Technol.* **2014**, *2*, 124–129.
53. Bolarinwa, I.F.; Lim, P.T.; Muhammad, K. Quality of gluten-free cookies from germinated brown rice flour. *Food Res.* **2019**, *3*, 199–207. [\[CrossRef\]](#)
54. Uwem, U.M.; Babafemi, A.A.; Sunday, D.M. Proximate composition, phytoconstituents and mineral contents of soybean (*Glycine max*) flour grown and processed in Northern Nigeria. *Adv. Appl. Sci.* **2017**, *2*, 48. [\[CrossRef\]](#)
55. Alphonse, S.; Kaale, L.D.; Rweyemamu, L.M.P. Proximate composition of fermented cassava meal “mchuchume” fortified with soya bean flour and Moringa oleifera leaves powder. *J. Food Sci. Technol.* **2019**, *56*, 3660–3667. [\[CrossRef\]](#)
56. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition, and Allergies (NDA). Scientific opinion on dietary reference values for fats, including saturated fatty acids, polyunsaturated fatty acids, monounsaturated fatty acids, trans fatty acids, and cholesterol. *EFSA J.* **2010**, *8*, 1461. [\[CrossRef\]](#)
57. Lattimer, J.M.; Haub, M.D. Effects of dietary fiber and its components on metabolic health. *Nutrients* **2010**, *2*, 1266–1289. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
58. Guichard, E. Interactions between flavor compounds and food ingredients and their influence on flavor perception. *Food Rev. Int.* **2002**, *18*, 49–70. [\[CrossRef\]](#)
59. Kharabian-Masouleh, A.; Waters, D.; Reinke, R.F.; Reinke, R.; Rachelle Ward, R.J.; Henry, R. SNP in starch biosynthesis genes associated with nutritional and functional properties of rice. *Sci. Rep.* **2012**, *2*, 557. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
60. Copeland, L.; Blazek, J.; Salman, H.; Tang, M.C. Form and functionality of starch. *Food Hydrocoll.* **2009**, *23*, 1527–1534. [\[CrossRef\]](#)
61. Soetan, K.O.; Olaiya, C.O.; Oyewole, O.E. The importance of mineral elements for humans, domestic animals and plants-A review. *Afr. J. Food Sci.* **2010**, *4*, 200–222. [\[CrossRef\]](#)
62. Mittal, R.; Nagi, H.P.S.; Sharma, P.; Sharma, S. Effect of processing on chemical composition and antinutritional factors in chickpea flour. *J. Food Sci. Eng.* **2012**, *2*, 180.
63. Pérez-Rodríguez, M.; Dirchwolf, P.M.; Rodríguez-Negrín, Z.; Pellerano, R.G. Assessing mineral profiles for rice flour fraud detection by principal component analysis-based data fusion. *Food Chem.* **2021**, *339*, 128125. [\[CrossRef\]](#)
64. Anjum, F.M.; Hussain, S.; Tariq, M.T. Effect of soy flour supplementation on mineral and phytate contents of unleavened flat bread (chapatis). *Nutr. Food Sci.* **2005**, *35*, 163–168. [\[CrossRef\]](#)
65. Rusu, I.-E.; Marc, R.A.; Mureşan, C.C.; Mureşan, A.E.; Filip, M.R.; Onica, B.-M.; Csaba, K.B.; Alexa, E.; Szanto, L.; Muste, S. Advanced Characterization of Hemp Flour (*Cannabis sativa* L.) from Dacia Secuieni and Zenit Varieties, Compared to Wheat Flour. *Plants* **2021**, *10*, 1237. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
66. Sujatha, S.J.; Ahmad, R.; Bhat, P.R. Physicochemical properties and cooking qualities of two varieties of raw and parboiled rice cultivated in the coastal region of Dakshina Kannada, India. *Food Chem.* **2004**, *86*, 211–216. [\[CrossRef\]](#)
67. Gharibzahedi, S.M.T.; Jafari, S.M. The importance of minerals in human nutrition: Bioavailability, food fortification, processing effects and nanoencapsulation. *Trends Food Sci. Technol.* **2017**, *62*, 119–132. [\[CrossRef\]](#)
68. Gomez-Galera, S.; Rojas, E.; Sudhakar, D.; Zhu, C.M.; Pelacho, A.; Capell, T.; Christou, P. Critical evaluation of strategies for mineral fortification of staple food crops. *Transgenic Res.* **2010**, *19*, 165–180. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
69. Frossard, E.; Bucher, M.; Mächler, F.; Mozafar, A.; Hurrell, R. Potential for increasing the content and bioavailability of Fe, Zn and Ca in plants for human nutrition. *J. Sci. Food Agric.* **2000**, *80*, 861–879. [\[CrossRef\]](#)
70. Liu, X.; Song, Q.; Tang, Y.; Li, W.; Xu, J.; Wu, J.; Wang, F.; Brookes, P.C. Human health risk assessment of heavy metals in soil-vegetable system: A multi-medium analysis. *Sci. Total Environ.* **2013**, *463–464*, 530–540. [\[CrossRef\]](#)
71. Rahman, M.M.; Asaduzzaman, M.; Naidu, R. Consumption of arsenic and other elements from vegetables and drinking water from an arsenic-contaminated area of Bangladesh. *J. Hazard. Mater.* **2013**, *262*, 1056–1063. [\[CrossRef\]](#)
72. Rocchetti, G.; Lucini, L.; Rodriguez, J.M.L.; Barba, F.J.; Giuberti, G. Gluten-free flours from cereals, pseudocereals and legumes: Phenolic fingerprints and in vitro antioxidant properties. *Food Chem.* **2019**, *271*, 157–164. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
73. Xu, B.J.; Yuan, S.H.; Chang, S.K.C. Comparative Analyses of Phenolic Composition, Antioxidant Capacity, and Color of Cool Season Legumes and Other Selected Food Legumes. *J. Food Sci.* **2007**, *72*, S167–S177. [\[CrossRef\]](#)
74. Magalhães, S.C.Q.; Taveira, M.; Cabrita, A.R.J.; Fonseca, A.J.M.; Valentão, P.; Andrade, P.B. European marketable grain legume seeds: Further insight into phenolic compounds profiles. *Food Chem.* **2017**, *215*, 177–184. [\[CrossRef\]](#)
75. Nithyanantham, S.; Selvakumar, S.; Siddhuraju, P. Total phenolic content and antioxidant activity of two different solvent extracts from raw and processed legumes, *Cicer arietinum* L. and *Pisum sativum* L. *J. Food Compos. Anal.* **2012**, *27*, 52–60. [\[CrossRef\]](#)
76. Multari, S.; Neacsu, M.; Scobbie, L.; Cantlay, L.; Duncan, G.; Vaughan, N.; Derek Stewart, D.R.; Russell, W. Nutritional and Phytochemical Content of High-Protein Crops. *J. Agricultural. Food Chem.* **2016**, *64*, 7800–7811. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
77. Sreerama, Y.N.; Sashikala, V.B.; Pratapa, V.M. Variability in the Distribution of Phenolic Compounds in Milled Fractions of Chickpea and Horse Gram: Evaluation of Their Antioxidant Properties. *J. Agric. Food Chem.* **2010**, *58*, 8322–8330. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)

78. Sreerama, Y.N.; Sashikala, V.B.; Pratapa, V.M. Phenolic compounds in cowpea and horse gram flours in comparison to chickpea flour: Evaluation of their antioxidant and enzyme inhibitory properties associated with hyperglycemia and hypertension. *Food Chem.* **2012**, *133*, 156–162. [\[CrossRef\]](#)
79. Fernandez-Orozco, R.; Frias, J.; Zielinski, H.; Muñoz, R.; Piskula, M.K.; Kozłowska, H.; Vidal-Valverde, C. Evaluation of bioprocesses to improve the antioxidant properties of chickpeas. *LWT* **2009**, *42*, 885–892. [\[CrossRef\]](#)
80. Kalogeropoulos, N.; Chiou, A.; Ioannou, M.T.; Karathanos, V.; Hassapidou, M.; Andrikopoulos, N. Nutritional evaluation and bioactive microconstituents (phytosterols, tocopherols, polyphenols, triterpenic acids) in cooked dry legumes usually consumed in the Mediterranean countries. *Food Chem.* **2010**, *121*, 682–690. [\[CrossRef\]](#)
81. Aguilera, O.; Estrella, I.; Benitez, V.; Esteban, R.M.; Martín-Cabrejas, M. Bioactive phenolic compounds and functional properties of dehydrated bean flours. *Food Res. Int.* **2011**, *44*, 774–780. [\[CrossRef\]](#)
82. Dueñas, M.; Estrella, I.; Hernández, T. Occurrence of phenolic compounds in the seed coat and the cotyledon of peas (*Pisum sativum* L. *Eur. Food Res. Technol.* **2004**, *219*, 116–123. [\[CrossRef\]](#)
83. Slavin, M.; Kenworthy, W.; Yu, L.L. Antioxidant Properties, Phytochemical Composition, and Antiproliferative Activity of Maryland-Grown Soybeans with Colored Seed Coats. *J. Agric. Food Chem.* **2009**, *57*, 11174–11185. [\[CrossRef\]](#)
84. Kumar, V.; Rani, A.; Dixit, A.K.; Pratap, D.; Bhatnagar, D. A comparative assessment of total phenolic content, ferric reducing-antioxidative power, free radical-scavenging activity, vitamin C and isoflavones content in soybean with varying seed coat colour. *Food Res. Int.* **2010**, *43*, 323–328. [\[CrossRef\]](#)
85. Villalobos, M.D.C.; Serradilla, M.J.; Martín, A.; Ordiales, E.; Ruiz-Moyano, S.; Córdoba, M.D.G. Antioxidant and antimicrobial activity of natural phenolic extract from defatted soybean flour by-product for stone fruit postharvest application. *J. Sci. Food Agric.* **2016**, *96*, 2116–2124. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
86. Tangkhawanit, E.; Siriamornpun, S. Bioactive compounds, biological activity, and starch digestibility of dried soy residues from the soybean oil industry and the effects of hot-air drying. *J. Sci. Food Agric.* **2021**, *102*, 1719–1728. [\[CrossRef\]](#)
87. Rocchetti, G.; Chiodelli, G.; Giuberti, G.; Masoero, F.; Trevisan, M.; Lucini, L. Evaluation of phenolic profile and antioxidant capacity in gluten-free flours. *Food Chem.* **2017**, *228*, 367–373. [\[CrossRef\]](#)
88. Deng, G.-F.; Xu, X.-R.; Zhang, Y.; Li, D.; Gan, R.-Y.; Li, H.-B. Phenolic compounds and bioactivities of pigmented rice. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2013**, *53*, 296–306. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
89. Aalim, H.; Luo, Z. Insight into rice (*Oryza sativa* L.) cooking: Phenolic composition, inhibition of α -amylase and α -glucosidase, and starch physicochemical and functional properties. *Food Biosci.* **2021**, *40*, 100917. [\[CrossRef\]](#)
90. Irakli, M.; Tsaliki, E.; Kalivas, A.; Kleisiaris, F.; Sarrou, E.; Cook, M.C. Effect of Genotype and Growing Year on the Nutritional, Phytochemical, and Antioxidant Properties of Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L.) Seeds. *Antioxidants* **2019**, *8*, 491. [\[CrossRef\]](#)
91. Šibul, F.S.; Orčić, D.Z.; Svirčev, E.; Mimica-Dukić, N.M. Optimization of extraction conditions for secondary biomolecules from various plant species. *Hem. Ind.* **2016**, *70*, 473–483. [\[CrossRef\]](#)
92. Reddy, N.R.; Pierson, M.D. Dry Bean Tannins: A Review of Nutritional Implications. *J. Am. Oil Chem. Soc.* **1985**, *62*, 541–549. [\[CrossRef\]](#)
93. Gilani, G.S.; Xiao, C.W.A.; Cockell, K. Impact of Antinutritional Factors in Food Proteins on the Digestibility of Protein and the Bioavailability of Amino Acids and on Protein Quality. *Br. J. Nutr.* **2012**, *108*, S315–S332. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
94. Kehrer, J. Free Radicals as Mediators of Tissue Injury and Disease. *Crit. Rev. Toxicol.* **1993**, *23*, 21–48. [\[CrossRef\]](#)
95. Balasundram, N.; Sundram, K.; Samman, S. Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses. *Food Chem.* **2006**, *99*, 191–203. [\[CrossRef\]](#)
96. Vonapartis, E.; Aubin, M.P.; Seguin, P.; Mustafa, A.F.; Charron, J.B. Seed composition of ten industrial hemp cultivars approved for production in Canada. *J. Food Compos. Anal.* **2015**, *39*, 8–12. [\[CrossRef\]](#)
97. Babu, P.V.A.; Liu, D.R.; Gilbert, E. Recent advances in understanding the anti-diabetic actions of dietary flavonoids. *J. Nutr. Biochem.* **2013**, *24*, 1777–1789. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
98. Wang, T.; He, F.; Chen, G. Improving bioaccessibility and bioavailability of phenolic compounds in cereal grains through processing technologies: A concise review. *J. Funct. Foods* **2014**, *7*, 101–111. [\[CrossRef\]](#)
99. Jahreis, G.; Brese, M.; Leiterer, M.; Schaefer, U.; Boehm, V. Legume flours: Nutritionally important sources of protein and dietary fiber. *Ernähr. Umsch.* **2016**, *63*, 36–42. [\[CrossRef\]](#)
100. Nikolić, N.C.; Todorović, Z.B.; Stojanović, J.S.; Veličković, D.T.; Lazić, M.L. *The Fatty Acids and Acylglycerols in Chickpea and Lentil Flour*; Agro FOOD Industry Hi Tech: Milano, Italy, 2013; p. 20.
101. Shariati-Ievari, S.; Ryland, D.; Edel, A.; Nicholson, T.; Suh, M.; Aliani, M. Sensory and physicochemical studies of thermally micronized chickpea (*Cicer arietinum*) and green lentil (*Lens culinaris*) flours as binders in low-fat beef burgers. *J. Food Sci.* **2016**, *81*, S1230–S1242. [\[CrossRef\]](#)
102. Summo, C.; De Angelis, D.; Rochette, I.; Mouquet-Rivier, C.; Pasqualone, A. Influence of the preparation process on the chemical composition and nutritional value of canned purée of kabuli and Apulian black chickpeas. *Heliyon* **2019**, *5*, e01361. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
103. Kaur, R.; Prasad, K. Technological, processing and nutritional aspects of chickpea (*Cicer arietinum*)—A review. *Trends Food Sci. Technol.* **2021**, *109*, 448–463. [\[CrossRef\]](#)
104. Kosson, R.; Czuchajowska, Z.; Pomeranz, Y. Smooth and wrinkled peas. 2. Distribution of protein, lipid, and fatty acids in seed and milling fractions. *J. Agric. Food Chem.* **1994**, *42*, 96–99.

105. Fahmi, R.; Ryland, D.; Sopiwnyk, E.; Malcolmson, L.; Shariati-Ievari, S.; McElrea, A.; Barthet, V.; Blewett, H.; Aliani, M. Effect of Revtech thermal processing on volatile organic compounds and chemical characteristics of split yellow pea (*Pisum sativum* L.) flour. *J. Food Sci.* **2021**, *86*, 4330–4353. [\[CrossRef\]](#)
106. Dandachy, S.; Mawlawi, H.; Obeid, O. Effect of processed chickpea flour incorporation on sensory properties of mankoushe zaatar. *Foods* **2019**, *8*, 151. [\[CrossRef\]](#)
107. Dahmer, A.M.; Rigo, A.A.; Steffens, J.; Steffens, C.; Carrão-Panizzi, M.C. Thermal treatment for soybean flour processing with high-quality color and reduced Kunitz trypsin inhibitor. *J. Food Process Eng.* **2018**, *41*, e12925. [\[CrossRef\]](#)
108. Osuna, M.B.; Judis, M.A.; Romero, A.M.; Avallone, C.M.; Bertola, N.C. Improvement of fatty acid profile and studio of rheological and technological characteristics in breads supplemented with flaxseed, soybean, and wheat bran flours. *Sci. World J.* **2014**, *2014*, 401981. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
109. Prabakaran, M.; Lee, K.-J.; An, Y.; Kwon, C.; Kim, S.; Yang, Y.; Ahmad, A.; Kim, S.-H.; Chung, I.-M. Changes in soybean (*Glycine max* L.) flour fatty-acid content based on storage temperature and duration. *Molecules* **2018**, *23*, 2713. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
110. Dahmer, A.M.; Rigo, A.A.; Valduga, E.; Steffens, J.; Steffens, C.; Carrão-Panizzi, M.C. Quality characteristics of rotative-type biscuits free of gluten prepared with soya flour and cassava starch. *Curr. Nutr. Food Sci.* **2020**, *16*, 176–184. [\[CrossRef\]](#)
111. Li, S.; Jin, Z.; Hu, D.; Yang, W.; Yan, Y.; Nie, X.; Lin, J.; Zhang, Q.; Gai, D.; Ji, Y.; et al. Effect of solid-state fermentation with *Lactobacillus casei* on the nutritional value, isoflavones, phenolic acids and antioxidant activity of whole soybean flour. *LWT* **2020**, *125*, 109264. [\[CrossRef\]](#)
112. Gül, M.K.; Egesel, C.Ö.; Turhan, H. The effects of planting time on fatty acids and tocopherols in chickpea. *Eur. Food Res. Technol.* **2008**, *226*, 517–522. [\[CrossRef\]](#)
113. Werz, O.; Seegers, J.; Schaible, A.M.; Weinigel, C.; Barz, D.; Koeberle, A.; Allegrone, G.; Pollastro, F.; Zampieri, L.; Grassi, G.; et al. Cannflavins from hemp sprouts, a novel cannabinoid-free hemp food product, target microsomal prostaglandin E2 synthase-1 and 5-lipoxygenase. *PharmaNutrition* **2014**, *2*, 53–60. [\[CrossRef\]](#)
114. Siano, F.; Moccia, S.; Picariello, G.; Russo, G.L.; Sorrentino, G.; Di Stasio, M.; La Cara, F.; Volpe, M.G. Comparative Study of Chemical, Biochemical Characteristic and ATR-FTIR Analysis of Seeds, Oil and Flour of the Edible Fedora Cultivar Hemp (*Cannabis sativa* L.). *Molecules* **2019**, *24*, 83. [\[CrossRef\]](#)
115. Lančaričová, A.; Kuzmiaková, B.; Porvaz, P.; Havrlentová, M.; Nemeček, P.; Kraic, J. Nutritional quality of hemp seeds (*Cannabis sativa* L.) in different environments. *J. Cent. Eur. Agric.* **2021**, *22*, 748–761. [\[CrossRef\]](#)
116. Khatoon, S.; Gopalakrishna, A.G. Fat-soluble nutraceuticals and fatty acid composition of selected Indian rice varieties. *J. Am. Oil Chem. Soc.* **2004**, *81*, 939–943. [\[CrossRef\]](#)
117. Monks, J.L.F.; Vanier, N.L.; Casaril, J.; Berto, R.M.; de Oliveira, M.; Gomes, C.B.; de Carvalho, M.P.; Dias, A.R.G.; Elias, M.C. Effects of milling on proximate composition, folic acid, fatty acids and technological properties of rice. *J. Food Compos. Anal.* **2013**, *30*, 73–79. [\[CrossRef\]](#)
118. Aleman, R.S.; Morris, A.; Prinyawiwatukul, W.; Moncada, M.; King, J.M. Physicochemical properties of Frontière rice flour and its application in a gluten-free cupcake. *Cereal Chem.* **2022**, *99*, 303–315. [\[CrossRef\]](#)
119. Zubair, M.; Anwar, F.; Ashraf, M.; Uddin, M.K. Characterization of high-value bioactives in some selected varieties of Pakistani rice (*Oryza sativa* L.). *Int. J. Mol. Sci.* **2012**, *13*, 4608–4622. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
120. Sadigova, M.K.; Buhovets, V.A.; Belova, M.V.; Rysmuhambetova, G.E. Technology solutions in case of using chickpea flour in industrial bakery. *Sci. Study Res. Chem. Chem. Eng. Biotechnol. Food Ind.* **2018**, *19*, 169–180.
121. Kris-Etherton, P.M.; Hecker, K.D.; Binkoski, A.E. Polyunsaturated fatty acids and cardiovascular health. *Nutr. Rev.* **2004**, *62*, 414–426. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
122. Gogus, U.; Smith, C. n-3 Omega fatty acids: A review of current knowledge. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2010**, *45*, 417–436. [\[CrossRef\]](#)
123. Feng, D.; Xia, A.; Liao, Q.; Nizami, A.-S.; Sun, C.; Huang, Y.; Zhu, X.; Zhu, X. Carbon cloth facilitates semi-continuous anaerobic digestion of organic wastewater rich in volatile fatty acids from dark fermentation. *Environ. Pollut.* **2021**, *272*, 116030. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
124. Yu, L.; Li, G.; Li, M.; Xu, F.; Beta, T.; Bao, J. Genotypic variation in phenolic acids, vitamin E and fatty acids in wholegrain rice. *Food Chem.* **2016**, *197*, 776–782. [\[CrossRef\]](#)

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Artículo 2.

Título: Commercial hemp (*Cannabis sativa* subsp. *sativa*) proteins and flours, nutritional and techno-functional properties

Autores: Yamina Absi, Isabel Revilla, Ana M. Vivar-Quintana

Revista: Applied Sciences 2023, 13, 10130

<https://doi.org/10.3390/app131810130>

Índices de calidad:

Cuartil: Q2

Área: ENGINEERING, MULTIDISCIPLINARY

Posición de la revista: 42/90

Factor de impacto: 2,7 (2022)

Resumen

Cannabis sativa subsp. *sativa*, es un cultivo no convencional con amplia adaptabilidad a condiciones térmicas diversas que presenta una gran relevancia medioambiental debido a que es capaz de capturar el dióxido de carbono y regenerar los suelos. La legalización de su cultivo es desigual entre los países de la UE aunque en términos generales, los cultivadores de cáñamo están obligados a utilizar las semillas que han sido certificadas por los criadores de semillas que garantizan un bajo contenido (0,3%) de cannabinoides psicoactivos (THC). Las semillas de cáñamo son una fuente importante de proteínas, grasas saludables, carbohidratos, fibras y minerales. Las proteínas presentes, principalmente albúmina y edestina, se distinguen por ser fácilmente digeribles, no alergénicas y ricas en aminoácidos esenciales. Respecto a su parte grasa, el aceite extraído de las semillas de cáñamo está compuesto en un 80-90% por ácidos grasos poliinsaturados, destacando ácido linoleico y alfa-linolénico. Así mismo las semillas presentan propiedades antioxidantes y antihipertensivas.

Los productos derivados de las semillas, como la harina y los concentrados proteicos, son una alternativa interesante y sostenible para la industria alimentaria. Estos productos destacan porque pueden ser utilizados en la alimentación vegana y vegetariana, al tiempo que ofrecen opciones sin gluten para aquellos afectados por enfermedades como la celiaquía. La comercialización de estos productos ha encontrado un nicho creciente de mercado, alineándose con las tendencias actuales de preferencias alimentarias y necesidades dietéticas específicas. Su interés reside no sólo en su composición nutricional sino también en que presentan propiedades funcionales interesantes. Por esta razón se han llevado a cabo estudios de su aplicabilidad para la elaboración de pan, galletas, productos cárnicos y yogures.

El objetivo del presente trabajo es el estudio de la composición nutricional y las propiedades fisicoquímicas y funcionalidades de productos comerciales de cáñamo, tanto harina como concentrado proteico. Se busca con ello ofrecer información que contribuya al conocimiento científico y nutricional de estos productos, sirviendo como referencia para consumidores, productores y científicos interesados en aprovechar los beneficios de esta planta tan versátil.

El estudio aborda la caracterización exhaustiva de dos harinas y dos concentrados proteicos de semillas de cáñamo (*Cannabis sativa*), adquiridos a través de comercio

electrónico, siendo una de ellas (tanto harina como concentrado) de cultivo ecológico. Todas las muestras provienen de empresas de la Unión Europea o el Reino Unido. Se llevaron a cabo análisis según los métodos de la AOAC (Association of Official Analytical Chemists) para determinar la composición y se evaluaron parámetros como proteínas, grasas, cenizas, almidón, humedad, fibra total y carbohidratos. También, se calculó la ingesta calórica considerando las energías proporcionadas por proteínas, grasas y carbohidratos. Se identificaron y cuantificaron los ácidos grasos presentes expresándose como porcentaje de ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME). El contenido en aminoácidos se analizó mediante cromatografía líquida (HPLC), con columna de intercambio iónico. La concentración de minerales se determinó mediante ICP-MS, analizando los contenidos de Na, Mg, P, K, Ca, Cr, Ni, Se, Cu, Zn, Mn, Fe, Cd y Pb.

Además, se determinaron los componentes bioactivos y la actividad antioxidante de las muestras analizando el contenido fenólico total, el contenido flavonoide total y el contenido de flavanonas y dihidroflavonoles así como la capacidad antioxidante total equivalente (TEAC). Por último, se evaluaron propiedades funcionales como la capacidad de retención de agua, capacidad de retención de aceite, índice de solubilidad en agua, capacidad de hinchamiento, formación de gel y capacidad espumante.

Los resultados de la composición proximal mostraron que los carbohidratos y la fibra son los compuestos más importantes en las harinas analizadas, mientras que, en los concentrados, las proteínas son los compuestos más relevantes, con un menor contenido de carbohidratos y fibra que las harinas. El contenido de ceniza es mayor en los concentrados que en las harinas, con valores promedio de 6,68% para las harinas y 8,48% para los concentrados. En términos de energía (Kcal/100g), no hay diferencias significativas entre harinas y concentrados. Tampoco se encontraron diferencias estadísticamente significativas en el contenido de humedad entre las muestras, con un valor promedio del 6,26%. En cuanto al perfil de ácidos grasos, el ácido linoleico es el más abundante en harinas y concentrados, seguido por el ácido linolénico y el oleico. Sin embargo, los concentrados muestran concentraciones significativamente mayores de ciertos ácidos grasos en comparación con las harinas. El índice n-6/n-3, considerado importante para la nutrición, es bueno en ambos productos. En cuanto al contenido de aminoácidos, se encontraron todos los aminoácidos esenciales tanto en las harinas como en el concentrado de proteína de cáñamo, destacando las altas cantidades de ácido

glutámico y arginina. También se encontraron cantidades significativas de aminoácidos azufrados (metionina y cisteína). El triptófano fue el aminoácido presente en menor concentración en todas las muestras analizadas. Los concentrados de proteína ecológicos mostraron cantidades menores de todos los aminoácidos esenciales y aminoácidos de cadena ramificada (BCAA), lo cual concuerda con su menor contenido proteico. El mineral más abundante tanto en las harinas como en los concentrados de proteína de cáñamo es el potasio (K), seguido por fósforo (P) y magnesio (Mg), mientras que los microelementos en mayores concentraciones son manganeso (Mn) y hierro (Fe). Aunque ambos comparten un perfil mineral similar, los concentrados de proteína presentan concentraciones más altas de todos los minerales excepto sodio y cromo. Por su parte el contenido de hierro, níquel y magnesio muestran diferencias entre marcas comerciales, pero no entre harina y concentrado. En cuanto a la composición fenólica, se observan diferencias significativas entre harinas y concentrados en el contenido total de flavonoides (TFC), siendo más alto en los concentrados. Sin embargo, el contenido total de fenoles (TPC) y de flavanonas y dihidroflavonoles (F/DF) no difieren entre ambos productos. La actividad antioxidante total (TEAC) es mayor en las harinas que en los concentrados. En cuanto a las propiedades funcionales los concentrados de proteína mostraron una mayor capacidad de retención de agua, mayor capacidad de formación de espumas, así como una mayor estabilidad de las espumas formadas. Además, los geles formados por los concentrados fueron más firmes que los formados por las harinas. Por su parte las harinas presentaron una mayor capacidad de hinchamiento. La capacidad de retención de aceite no mostró diferencias significativas entre ambos productos.

A partir de los resultados obtenidos en el estudio se puede concluir que las harinas podrían ser útiles en la fortificación de productos de panadería, mientras que los concentrados podrían ser ideales para aplicaciones en productos cárnicos y salsas debido a sus propiedades funcionales. Los productos ecológicos analizados mostraron diferencias en la composición nutricional, pero no en los perfiles de ácidos grasos, aminoácidos y propiedades tecno-funcionales.

Article

Commercial Hemp (*Cannabis sativa* Subsp. *sativa*) Proteins and Flours: Nutritional and Techno-Functional Properties

Yamina Absi , Isabel Revilla *  and Ana M. Vivar-Quintana 

Food Technology, Polytechnic High School of Zamora, Universidad de Salamanca, Avenida Requejo 33, 49022 Zamora, Spain; absiyamina@usal.es (Y.A.); avivar@usal.es (A.M.V.-Q.)

* Correspondence: irevilla@usal.es

Abstract: Hemp (*Cannabis sativa* subsp. *sativa*) has been increasing in popularity in recent years owing to its nutritional composition, with an interesting combination of protein, fat, and fiber, as well as minerals. Its transformation into flours and concentrates has allowed its incorporation in different foods thanks to its techno-functional properties. In this study, four commercial brands of hemp flour and hemp protein concentrate were analyzed for their proximal, amino acid and mineral composition, and fatty acid profile. The bioactive characteristics, such as phenolic composition and antioxidant activity, and techno-functional properties, such as solubility and water-holding and oil-holding capacities, were analyzed. The results showed that the composition of the flours was characterized by a high fiber content and a high antioxidant activity due mainly to the high level of total phenolic compounds. In the case of concentrates, these showed a lower carbohydrate but higher protein content and better functional properties such as water-holding, foaming, and gel-forming capacities. Both flours and concentrates showed low fat contents with polyunsaturated fatty acids being the major fatty acids, a good amino acid profile, and high K and P concentrations. Organic products showed differences in nutritional composition but not in functional properties when compared with non-organic products.

Keywords: proximate composition; amino acid profile; phenolic content; antioxidant activity; fatty acid profile; mineral composition



Citation: Absi, Y.; Revilla, I.; Vivar-Quintana, A.M. Commercial Hemp (*Cannabis sativa* Subsp. *sativa*) Proteins and Flours: Nutritional and Techno-Functional Properties. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 10130. <https://doi.org/10.3390/app131810130>

Academic Editor: Antonio Valero

Received: 16 August 2023

Revised: 5 September 2023

Accepted: 7 September 2023

Published: 8 September 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Cannabis sativa subsp. *sativa*, of the Cannabaceae family, is a non-conventional multipurpose crop with a wider range of adaptation to warmer and colder conditions than other plants typical of moderate climates [1]. Moreover, hemp is attracting great interest as a sustainable crop owing to its role in soil regeneration, with its roots growing deep in the soil and its short growth period of 3–4 months [2]. In addition, it has low water and input requirements [3] and traps carbon dioxide five times more effectively than forest trees on the same acreage, which helps to reduce to global warming [4]. In consequence, hemp may have an important role to play in environmental protection [5]. Moreover, its increasing legalization, together with the wide variety of products which can be obtained from a hemp plant, has attracted the interest of different industries to make it a widely cultivated and industrially important plant [2].

The increasing focus on plant-based foods for consumers has led to a growing interest in the uses of hemp seeds as food and feed [5]. For this reason, the number of non-pharmacological hemp varieties with low δ -9-tetrahydrocannabinol (THC) content is steadily increasing [6]. The term “hemp” refers to cultivars of *Cannabis sativa* grown for industrial purposes containing tetrahydrocannabinol (THC) in trace amounts. According to Commission Regulation (EU) 2022/1393 [7], the maximum level of delta-9-tetrahydrocannabinol in ground hemp seeds, (partially) defatted hemp seeds, and other hemp seed-derived/processed products is 3.0 mg/kg.

Hemp seeds provide significant amounts of protein (200–250 g/kg), oil (250–350 g/kg), carbohydrates (200–300 g/kg), and insoluble fiber (100–150 g/kg), together with important levels of minerals (56–80 g/kg) [8]. In fact, they contain a wide range of minerals such as iron, calcium, zinc, magnesium, and manganese [9]. In addition, several studies, both in vitro and in vivo, have demonstrated the antioxidant potential and the antihypertensive properties of hemp seed [10]. It is particularly interesting that the concentration of anti-nutritional compounds in hemp seeds is very low [11], which makes it an interesting alternative to concentrates and flours made from legumes.

The proteins present in hemp seeds are primarily albumin and edestin. These are easily digestible proteins which contain substantial levels of all essential amino acids [12] and are classified as non-allergenic [13]. The amino acid profile is similar to that found in eggs and soybeans [14], and this can help to address the issues of a sustainable alternative food. Hempseed oil consists of 80–90% polyunsaturated fatty acids (PUFA) including high levels of linoleic (LA) and α -linolenic acid (ALA) [12].

Hemp seed products, which are generally obtained after partial or total oil extraction, are positioned as a good alternative to soy for the food industry because hemp flour has high levels of fat and protein but also of fiber, essential fatty acids and amino acids, and minerals [15]. In addition, hemp flour is rich in bioactive compounds, such as polyphenols, vitamin E, and minerals such as calcium, potassium, sodium, magnesium, iron, phosphorus, sulfur, and zinc [16]. As far as hemp protein concentrate is concerned, it has very interesting functional properties such as solubility, foaming, and water-holding and fat-holding capacities. According to Galves et al. [17], hemp protein concentrates showed a slightly lower oil-holding capacity (OHC) and water-holding capacity (WHC) than other protein concentrates such as safflower, sunflower, and canola. It should be taken into account that protein structure and functionality can be influenced by the method of production. Processing can, therefore, lead to modifications in protein structure, in protein folding, and in the gelation capacity [18].

This greater availability of raw materials, together with their nutritional and functional properties, has resulted in both hemp flour and hemp protein concentrates being used for the manufacture of new products. Flour has been employed in bread [16], cookies [19,20], and gluten-free biscuits [21]. Hemp flour can be applied in both confectionery and bakery products, replacing wheat flour to create clean label products with a nutritional profile, a higher protein, and micronutrient content. Meanwhile, concentrates have also been used in meat products [22], yoghurts [23], and juices [24]. Vegan and vegetarian products with a declared content of up to 10% of hemp seeds are also available on the market [25]. Zahari et al. [22] showed that it is possible to replace soy protein with hemp protein in the meat analog formulation. In addition to their industrial application, these types of products have also reached the market for direct sale to consumers. Today, it is easy to buy hemp flour and hemp protein concentrates at markets and on the Internet. As they are completely gluten-free products, both hemp flour and hemp concentrates can be used in the nutrition of those affected by intolerances such as the most common celiac disease, replacing products made from cereals (wheat, barley, or rye) containing gluten.

In the scientific literature, articles can frequently be found in which hemp seed products have been characterized, and in which the influence of variety and the growing conditions on the composition of these products have been studied. However, the products which can be purchased by consumers do not reflect this situation. Therefore, the aim of this paper is to increase knowledge of hemp protein concentrates and flours in terms of nutritional composition and physicochemical and functional properties by comparing two brands of hemp flour and two brands of hemp protein. The article presents as a novelty the fact that the samples analyzed correspond to commercial samples which can be purchased by consumers.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

Two flours and two protein concentrates made from hemp (*Cannabis sativa*) seeds were purchased by e-commerce. One of each of the samples, both the flour and the concentrate, were identified as being of organic production. All four samples were packaged by EU or UK companies.

2.2. Proximate Composition Analysis

Several parameters were determined in samples of hemp flours and concentrates according to AOAC methods (AOAC, 2006). The total nitrogen was determined by the Kjeldahl method (AOAC 950.36) and the total protein content ($N \times 6.25$) was calculated. The total fat content was analyzed by the Soxhlet method (AOAC 935.38) using petroleum ether. The ash content was calculated (AOAC 923.03) after incinerating at 550 °C. The enzymatic method described in AOAC 996.11 was used for the determination of starch content, while the gravimetric method (AOAC 925.10) was used for analyzing the moisture content, and the total fiber content was determined using an ANKOM analyzer (ANKOM technology, New York, NY, USA) (AOAC 991.43). The total amount of carbohydrates was then calculated ($(100 - (\text{ash} + \text{protein} + \text{total fat}))$). Lastly, the caloric intake was calculated considering that the energy supplied by protein and carbohydrates is 4 kcal/g and 9 g/kg for fats. All determinations were carried out in triplicate, and the results were expressed in g/100 g of dry weight (dw).

2.3. Fatty Acid Analysis

Fat extraction was performed with petroleum ether from 20 g of the sample. Subsequently, the samples were methylated with KOH (methanolic) according to the method described by Lurueña-Martínez et al. [26] using the GC 6890 N chromatograph (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA) equipped with an FID detector. One microliter of the sample was injected using the splitless mode of the injector and analyzed using a 100 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.20 μ m capillary column (SP-2560, Supelco, Inc., Bellefonte, PA, USA). Fatty acids were identified taking into account their retention times using as a reference a mix of 37 commercially available standards (47885-U Supelco, Sigma-Aldrich, Darmstadt, Germany). Measurements were repeated in duplicate, and the amount was expressed as a percentage of the total fatty acid methyl esters (FAMES).

2.4. Amino Acid Analysis

The determination was carried out by liquid chromatography (HPLC) using a Biochrom 20 analyzer (Pharmacia, London, UK), with an ion-exchange column. Detection was performed post column after a reaction with ninhydrin. Quantification was carried out using external standards. Measurements were repeated in duplicate, and the amino acid content was expressed in g/100 g of fresh weight (fw).

2.5. Mineral Analysis

Analyses of the contents of the following minerals Na, Mg, P, K, Ca, Cr, Ni, Se, Cu, Zn, Mn, Fe, Cd, and Pb were performed by ICP-MS. Samples (0.2 g) were microwave digested in Teflon vessels using HNO₃ in a Milestone system. The concentration of the minerals was determined using an Agilent 7800 ICP mass spectrometer (Agilent, Santa Clara, CA, USA) and the following conditions: 1550 W of reference power, 15 L/min of plasma air flow, 0.9 L/min of auxiliary air flow, and 0.99 L/min of nebulized air flow. Certified standard solutions (1 g/L) (Panreac, Madrid, Spain) solutions were used for the quantification of the elements which were grouped into two multi-elemental standards. Two repetitions per sample were carried out, and the mineral content was expressed in mg/kg of fw.

2.6. Bioactive Components and Antioxidant Activity

2.6.1. Extraction

Extracts were prepared in duplicate according to the method described by Betances Salcedo et al. [27]. First, 20 mL of 70% ethanol was added to 1 g of the sample, and the mixture was kept in an ultrasonic bath for 8 min. The samples were centrifuged at $3000 \times g$ for 20 min (20 °C). The supernatant was transferred to a volumetric flask and made up to 25 mL with 70% ethanol.

2.6.2. Total Phenolic Content Analysis

The total phenolic content (TPC) was quantified according to the method described by Millar et al. [28]. Thus, 0.5 mL of the extracted sample, 0.5 mL of Folin–Ciocâlteu reagent, 10 mL of Na_2CO_3 (7.5%), and 10 mL of H_2O were added and mixed in a 25 mL volumetric flask. This was then made up to 25 mL with distilled water. The TPC was determined using a Shimadzu UV 1280 spectrophotometer (Shimadzu, Kyoto, Japan) at 750 nm, and the results were expressed in mg gallic acid equivalent (GAE)/100 g fw.

2.6.3. Total Flavonoid Content Analysis

For the determination of the total flavonoid content (TFC), the method used was that described by Valencia et al. [29], based on the formation of the aluminum chloride complex with slight modifications. In a 25 mL volumetric flask, 0.5 mL of AlCl_3 (5%) and 2 mL of sample extract were added and mixed, and then made up with ethanol (96%). The samples were kept in the dark for 30 min. The measurement of the absorbance was carried out at 425 nm with a Shimadzu UV 1280 (Shimadzu, Kyoto, Japan). Analyses were performed in duplicate, and the results were expressed in milligrams of rutin/100 g fw.

2.6.4. Total Flavanone and Dihydroflavonol Content Analysis

An analysis of flavanones and dihydroflavonols was carried out using the method previously reported by Popova et al. [30] with slight modifications. Briefly, a volume of 1 mL of sample extract and 2 mL of DNP (2,4 dinitrophenylhydrazine) solution was mixed, heated for 50 min at 50 °C and cooled to room temperature. Then, KOH (10% in methanol *w/v*) was then added up to 10 mL. Absorbance measurement was performed at 486 nm with a Shimadzu UV 1280 (Shimadzu, Kyoto, Japan). Analyses were performed in duplicate, and the results were expressed in milligrams of pinocembrin/100 g fw.

2.6.5. Total Antioxidant Capacity Analysis

The total equivalent antioxidant capacity (TEAC) was determined by the method described by Chen et al. [31]. This method is based on monitoring the decrease in absorbance at 734 nm observed upon scavenging the ABTS (2,2-azinobis (3-ethylenebenzothiazoline-6-sulphonic acid) radical cation. After preparation of the ABTS radical cation solution, an appropriate amount of this reagent was mixed with 20 μL of the extract sample and the absorbance was measured at 734 nm for 10 min (Shimadzu UV 1280, Shimadzu, Kyoto, Japan). The percentage inhibition of absorbance was calculated and plotted against Trolox (6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchorman-2-carboxylic acid) concentration used as a standard. The total equivalent antioxidant capacity (TEAC) was then calculated. Each sample was analyzed in duplicate, and the results were expressed as nmol Trolox/100 mg fw.

2.7. Determination of Techno-Functional Properties

2.7.1. Water-Holding Capacity, Oil-Holding Capacity, and Water Solubility Index

The water-holding (WHC) and oil-holding (OHC) capacities of the hemp flours and protein concentrates were determined using the method described by Osen et al. [32] and Bora et al. [33], respectively. To carry out the determination of WHC, 0.5 g of the sample and 10 mL of distilled water was mixed, vortexed for 30 s, and kept for 24 h at 20 °C. Subsequently this mixture was centrifuged (20 min, 3000 rpm, Sigma-Aldrich 4K15C, Darmstadt, Germany). The WHC was expressed as the number of grams of water

retained per 1 g of flour. For the determination of the OHC, 0.4 g of the sample and 5 mL of sunflower oil were mixed following the same procedure as described for determining the WHC. OHC was expressed as the number of grams of oil retained per 1 g of flour.

The water solubility index (WSI) was measured as the soluble solids present in the supernatant liquid from the WHC analysis with a Portable Refractometer SERIE 300, ZUZI (Microscopios, Barcelona, Spain) and expressed as Brix.

2.7.2. Swelling Capacity

The swelling capacity (SC) was determined by mixing 0.5 g of the sample and 5 mL of distilled water, and then stirring the mixture for 1 min with a vortex. After 24 h at room temperature, the final volume of the samples was measured. This was carried out triplicate, and the results were expressed as a volume increase after 24 h per g of sample.

2.7.3. Gel Formation

The gelation properties were assessed using the methodology proposed by Tomé et al. [34] with slight modifications. To prepare the gels, 6 g of the sample and 3 g of sodium chloride were mixed with 30 mL of distilled water. The suspensions were adjusted to pH 5. After 30 min heating of the samples in boiling water at 90 °C, the gels formed were left at 4 °C for 24 h. A penetration test with a 10 mm probe was performed in a Texture Analyzer TX-T2iplus (Stable Micro Systems, Surrey, UK) with a 5 kg load cell at 20 °C. A distance penetration of 8 mm and a cross-head speed of 1 mm/s were used. The mean maximum force from three replicates was recorded.

2.7.4. Foaming Capacity

In order to determine the foaming capacity (FC), 5 g of the samples were placed in a 600 mL beaker, and 100 mL of distilled water was added before mixing, with a blender (Ultraturrax T 25 basic, Staufen, Germany). The foam capacity (FC) was expressed as the percentage increase in foam volume measured after 2 min. The foam stability (FS) was determined by measuring the FC after standing for 5 min.

2.7.5. Color Properties

The value of flours and concentrates was measured using HunterLab MiniScan colorimeter of the XE Plus model (Hunterlab, Reston, VA, USA). The CIELab parameters determined were L* (lightness), a* (redness), and b* (yellowness) using an observer angle of 10° and the illuminant D65. The L* value represents the lightness of a sample from black to white. The a* (−green to + red) and b* (−blue to + yellow) values represent the chromatic aspects of a sample. Nine replicates were made from each sample.

2.8. Statistical Analysis

The mean values were compared using one-way ANOVA followed by Tukey's post hoc test with $\alpha = 0.05$ to determine the existence of significant differences between samples. The correlation coefficients between the different physicochemical and techno-functional parameters of the samples were calculated using Pearson's correlation coefficient. All statistical analyses were carried out using SPSS Statistics for Windows, version 27.0 (IBM Corp., Armonk, NY, USA).

3. Results and Discussion

3.1. Proximate Composition

The proximate composition results (Table 1) showed that carbohydrates and fiber were the most important compounds in the flours analyzed. For the concentrates, the most important compounds were proteins; they had a lower carbohydrate and fiber content than the flours. The percentage of fat ranged between 9.93% and 12.31%. Although hemp seed has a fat content of 30% fat [35]; however, the production of flours and protein concentrates from hemp occurs after defatting the seed, which is why a low percentage of fat was found

in the samples analyzed. The starch content was between 0.82% and 1.11%, with one of the flour samples showing contents below the detection limit. The ash content was higher in the concentrates than in the flours with mean values of 6.68% for the flours and 8.48% for the concentrates. In terms of energy (kcal/100 g), there are no significant differences between flours and concentrates. No statistically significant differences in moisture content were found between the different samples analyzed with a mean value of 6.26%.

Table 1. Mean values ($\pm$ standard deviation) of the proximate composition parameters of different hemp flours and protein concentrates (expressed in g/100 g dw).

	Hemp Flours		Hemp Protein Concentrates	
	Organic	Conventional	Organic	Conventional
Carbohydrates	51.75 $\pm$ 0.01 c	47.07 $\pm$ 0.07 b	34.05 $\pm$ 0.23 a	33.38 $\pm$ 0.46 a
Fiber	53.56 $\pm$ 0.47 c	40.90 $\pm$ 0.99 b	25.31 $\pm$ 0.12 a	25.50 $\pm$ 0.08 a
Proteins	31.34 $\pm$ 0.13 a	34.41 $\pm$ 0.41 b	46.33 $\pm$ 0.40 c	47.72 $\pm$ 0.15 d
Fat	9.93 $\pm$ 0.01 a	12.31 $\pm$ 0.03 c	10.87 $\pm$ 0.12 b	10.69 $\pm$ 0.13 b
Starch	<0.10 *	0.89 $\pm$ 0.11 a	0.82 $\pm$ 0.03 a	1.11 $\pm$ 0.03 b
Ash	6.92 $\pm$ 0.02 b	6.44 $\pm$ 0.03 a	8.76 $\pm$ 0.08 d	8.21 $\pm$ 0.22 c
Energy (kcal/100 g)	398.32 $\pm$ 0.2 a	415.40 $\pm$ 0.4 a	419.33 $\pm$ 0.43 a	420.63 $\pm$ 0.65 a

a–d Values in the same row followed by different letters are significantly different ($p < 0.05$). * Values under the detection limit of the analytical method applied.

The nutritional composition obtained in our samples was similar to that described in the literature for hemp flours [16] and for hemp protein concentrates [36]. The two commercial brands analyzed showed differences between them; in the case of the flours, the differences were significant for all the parameters analyzed. Organic flour had higher contents of carbohydrates, fiber, and ash, but lower contents of fat, protein, and starch. Furthermore, Rusu et al. [15] showed that the variety of hemp also influences the composition of the flour obtained, especially its macro- and microelement content and the content of individual carbohydrates (sucrose, fructose, and glucose). In the literature, flours with whole fat content and defatted flours can be found. Non-fat flours have lower concentrations of protein, starch, fiber, and ash [15]. This fact can lead to confusion among consumers when comparing different flours, as not all commercial brands indicate whether the flour is defatted or not.

In the case of the concentrates, although the carbohydrate, fiber, and fat contents showed no significant differences between the two brands; however, the contents of protein and starch were significantly lower in the organic concentrate. This was also observed in the organic flours. The nutritional composition of protein concentrates can be highly variable depending on the process used to extract them. Thus, the application of an isoelectric precipitation process causes a reduction in the ash content [37], a dry fractionation process affects the carbohydrate contents, and a combined treatment of alkaline extraction and isoelectric precipitation influences the protein content [36]. This highlights the great variability that consumers may find within hemp protein concentrate.

3.2. Fatty Acid Profile

According to the results (Table 2), the most abundant fatty acid in hemp flours and concentrates was linoleic acid (C18:2 n6), with levels ranging from 30.65% to 56.38%. This fatty acid was followed in hemp flours by linolenic acid (C18:3n3), reaching 15.03% to 16.69% in the same samples, while the third most important fatty acid was oleic acid (C18:1) with values between 10.68% and 13.50%. However, for the protein concentrate samples, the C18:1 fatty acid was the second most important, with levels ranging from 20.58% to 23.09%, followed by palmitic acid (C16:0) with values of between 17.23% and 21.50%.

Table 2. Mean values ($\pm$ standard deviation) of the fatty acids of different hemp flours and protein concentrates (expressed in g/100 g of FAME).

	Hemp Flours		Hemp Protein Concentrates	
	Organic	Conventional	Organic	Conventional
C16:0	6.95 $\pm$ 0.04 a	8.57 $\pm$ 0.24 a	21.50 $\pm$ 3.38 b	17.23 $\pm$ 0.75 b
C16:1	0.11 $\pm$ 0.00 a	0.21 $\pm$ 0.01 a	0.26 $\pm$ 0.01 a	0.34 $\pm$ 0.18 a
C18:0	3.15 $\pm$ 0.01 a	2.15 $\pm$ 0.43 a	7.90 $\pm$ 0.97 b	6.25 $\pm$ 0.54 b
C18:1 n9t	0.02 $\pm$ 0.00 a	0.83 $\pm$ 0.41 ab	1.90 $\pm$ 0.24 b	2.36 $\pm$ 0.77 b
C18:1	13.50 $\pm$ 0.06 a	10.68 $\pm$ 1.16 a	23.09 $\pm$ 0.89 b	20.58 $\pm$ 2.67 b
C18:2 n6	56.38 $\pm$ 0.05 b	52.29 $\pm$ 2.28 b	30.65 $\pm$ 6.69 a	35.06 $\pm$ 3.34 a
C20:0	0.89 $\pm$ 0.01 a	0.71 $\pm$ 0.19 a	2.12 $\pm$ 0.24 a	2.78 $\pm$ 1.33 a
C18:3 n6	0.67 $\pm$ 0.00 a	6.68 $\pm$ 0.61 b	0.15 $\pm$ 0.05 a	0.91 $\pm$ 0.95 a
C18:3 n3	16.69 $\pm$ 0.06 b	15.03 $\pm$ 1.53 b	4.52 $\pm$ 1.10 a	5.63 $\pm$ 0.15 a
SFA	11.64 $\pm$ 0.08 a	12.06 $\pm$ 1.19 a	34.25 $\pm$ 5.34 b	28.57 $\pm$ 0.73 b
MUFA	14.32 $\pm$ 0.04 a	12.66 $\pm$ 1.71 a	27.54 $\pm$ 0.91 b	25.85 $\pm$ 0.16 b
PUFA	74.05 $\pm$ 0.12 b	75.27 $\pm$ 2.91 b	38.20 $\pm$ 6.25 a	45.59 $\pm$ 0.891 a
n3	16.88 $\pm$ 0.06 b	15.29 $\pm$ 1.44 b	5.18 $\pm$ 0.51 a	6.44 $\pm$ 0.10 a
n6	57.16 $\pm$ 0.06 b	59.98 $\pm$ 1.47 b	33.02 $\pm$ 5.74 a	39.15 $\pm$ 0.79 a
n6/n3	3.38 $\pm$ 0.01 a	3.93 $\pm$ 0.27 a	6.34 $\pm$ 0.47 b	6.08 $\pm$ 10.03 b

a,b Values in the same row followed by different letters are significantly different ($p < 0.05$).

Therefore, in terms of the C16:0, C18:0, and C18:1 fatty acids, the protein concentrates showed a significantly higher value compared with hemp flour samples. However, C18:2 n6 and C18:3 n3 had higher concentrations in the hemp flours. Owing to these differences, the concentrations of SFAs, MUFAs, and n6/n3 were higher in the protein concentrates, and this was also the case for the PUFAs in the hemp flours. The n-6/n-3 ratio is considered to be an important nutritional index. The average n-6/n-3 ratio found was 3.65 for flours and 6.21 for concentrates, which indicates a good nutritional index for the hemp by-products studied. Rusu et al. [15] similarly reported that PUFAs are the predominant fatty acids in hemp flours followed by MUFAs. For hemp protein concentrates, no studies were regarding their fatty acid composition.

Hemp seeds are rich in polyunsaturated fatty acids, which also vary among different genotypes. In addition, the fatty acid composition of hemp seed is influenced by several factors, including the origin of the seeds, as well as growth and climate conditions [38]. However, the results from this study showed no significant differences between the two samples analyzed; only the C18:3 n6 fatty acid showed a large difference between the two flours analyzed, with higher values for the conventional flour.

3.3. Amino Acid Profile

With regard to the amino acid content (Figure 1), all the essential amino acids were found in both the flours and the hemp protein concentrate. The high amounts of glutamic and arginine stand out. Significant amounts of sulfur-containing amino acids (methionine and cysteine) were also found. These results agree with those obtained by other authors reporting the presence of all essential amino acids in both hemp flour and hemp protein concentrates [39,40]. Glutamic acid, aspartic acid, and arginine have also been described as the predominant amino acids in hemp by other authors [41,42]. Tryptophan was the amino acid present in the lowest concentration in all the samples analyzed in this study, which agrees with the results obtained by Teh et al. [43] and Hadnadev et al. [44]. The amino acid profile found in both flours and concentrates confirms that these products are an excellent source of protein. Hemp protein is also classified as a source of high-quality protein comparable to that of soybean or egg white [45]. Furthermore, previous studies [46] showed that these proteins have excellent digestibility, with a very high protein digestibility corrected amino acid score (PDCAAS) value.

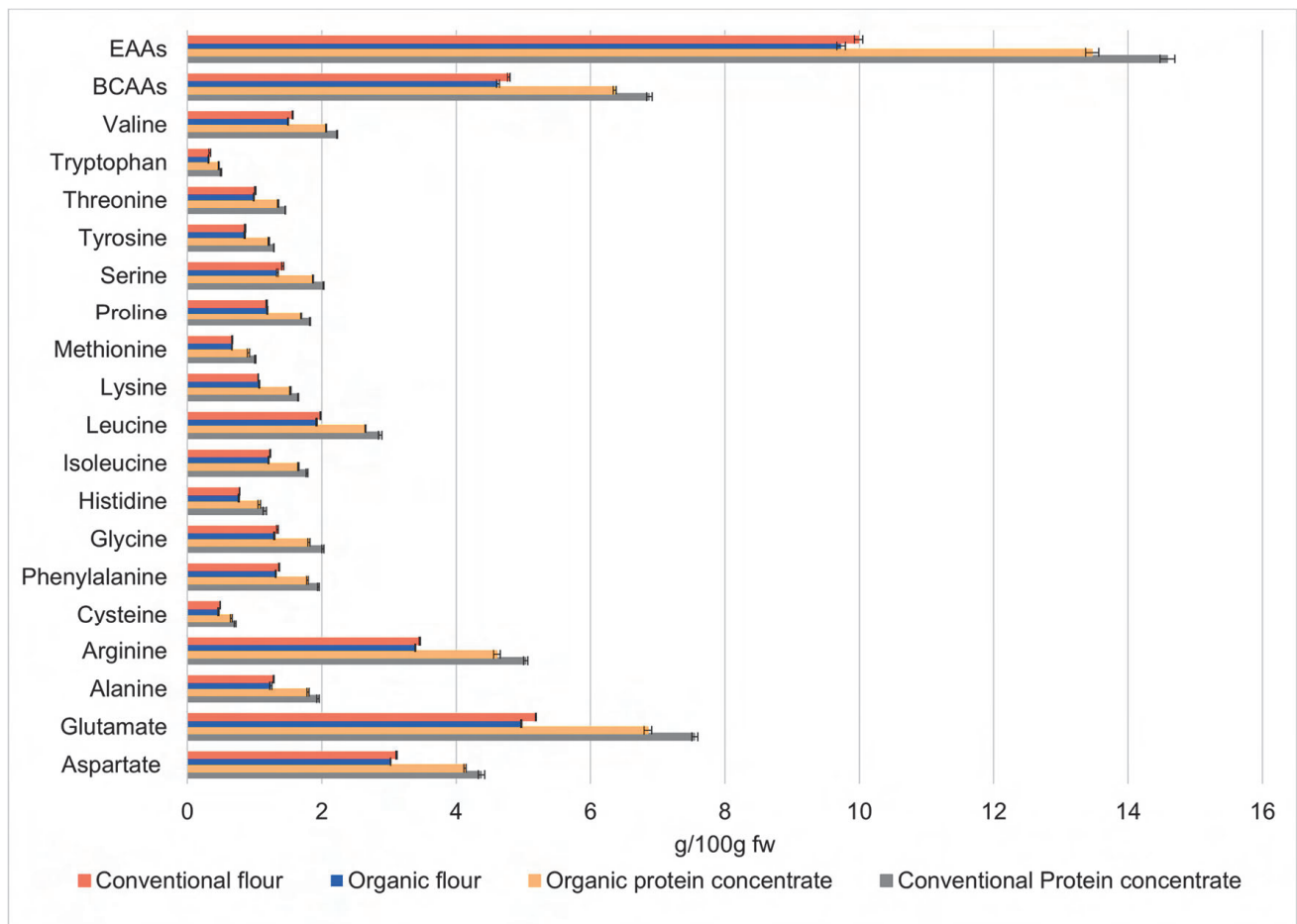


Figure 1. Amino acid profile of different hemp flours and protein concentrates. EAAs: histidine, isoleucine, leucine, lysine, methionine, phenylalanine, threonine, tryptophan, and valine. BCAAs: valine, isoleucine, and leucine.

As far as the commercial brands are concerned, no statistically significant differences were found in the contents of any of the amino acids for hemp flours. However, the organic protein concentrates showed lower amounts of all essential amino acids (EAAs) and branched-chain amino acids (BCAAs), which is consistent with their lower protein content (Table 1). The differences found between the two commercial brands could also be linked to the manufacturing process of the concentrates. The extracting process for obtaining the protein concentrate may affect the concentration of amino acids, especially EAAs and BCAAs, as reported by Shen et al. [42].

3.4. Mineral Content

The most abundant mineral in both the flours and the protein concentrates was K, followed by P and Mg, and the microelements present in the highest concentrations were Mn and Fe (Table 3). Despite having a similar mineral profile, the protein concentrates had a higher concentration of minerals than the flours. Only sodium and chromium were present in lower amounts in the concentrates. Iron, nickel, and magnesium showed differences between commercial brands but none associated with being a flour or concentrate. The process of the production of the protein concentrates has a major influence on the mineral content. Thus, concentrates obtained by a dry fractionation process show a lower sodium content compared with wet fractionation [36].

Table 3. Mean values ($\pm$ standard deviation) of the mineral compounds of different hemp flours and protein concentrates (expressed in mg/kg fw).

	Hemp Flours		Hemp Protein Concentrates	
	Organic	Conventional	Organic	Conventional
Na	641.4 $\pm$ 6.6 b	846.1 $\pm$ 5.6 c	42.35 $\pm$ 0.5 a	35.72 $\pm$ 0.5 a
Mg	5255.2 $\pm$ 69.0 b	4702.0 $\pm$ 149.6 a	8946.1 $\pm$ 28.2 d	7849.2 $\pm$ 33.4 c
P	10717.6 $\pm$ 24.5 b	9099.1 $\pm$ 141.1 a	15814.8 $\pm$ 104.3 d	13179.8 $\pm$ 109.3 c
K	10686.2 $\pm$ 174.4 a	10419.2 $\pm$ 144.3 a	16574.9 $\pm$ 42.9 b	14878.1 $\pm$ 73.8 b
Ca	1776.8 $\pm$ 17.9 b	1290.4 $\pm$ 0.7 a	2329.4 $\pm$ 13.8 d	2072.1 $\pm$ 1.45 c
Cr	0.3 $\pm$ 0.01 b	1.0 $\pm$ 0.02 c	0.1 $\pm$ 0.00 a	0.1 $\pm$ 0.01 a
Ni	3.4 $\pm$ 0.03 b	16.1 $\pm$ 0.08 d	6.4 $\pm$ 0.02 c	1.4 $\pm$ 0.02 a
Se	ND	ND	0.2 $\pm$ 0.00 a	0.2 $\pm$ 0.03 a
Cu	18.9 $\pm$ 0.9 b	14.9 $\pm$ 1.1 a	21.3 $\pm$ 0.0 b	15.4 $\pm$ 0.5 a
Zn	76.9 $\pm$ 0.4 c	48.1 $\pm$ 0.8 a	78.4 $\pm$ 0.4 c	62.9 $\pm$ 0.5 b
Fe	142.2 $\pm$ 0.6 b	102.6 $\pm$ 1.2 a	244.6 $\pm$ 1.1 d	197.2 $\pm$ 0.2 c
Mn	166.6 $\pm$ 0.9 a	204.0 $\pm$ 2.5 b	220.0 $\pm$ 6.4 c	173.4 $\pm$ 4.6 a

ND: not detected. a–d Values in the same row followed by different letters are significantly different ($p < 0.05$).

The results obtained agree with those described by Rusu et al. [15] for hemp flours, with K being the main mineral, and with high amounts of Ca, Mg, and P also being found in all the flours analyzed, regardless of the variety of hemp. Likewise, in protein concentrates, the mineral profile described by Nasrollahzadeh et al. [36] showed high amounts of the macroelements K, P, and Mg, with a connection being noted between the mineral content and the extraction process of concentrates. The high levels of minerals such as Fe and Zn described in hemp have led to it being used for the fortification of wheat flour. Some hemp varieties, such as Delores and Joey, have Fe concentrations exceeding 50% of the recommended daily intake (RDI); the Joey variety also contributes 30.03% RDI in the case of zinc [47].

The K/Na ratio was very high in all samples, especially in the concentrates, owing to their low Na content. This ratio is very interesting from a nutritional point of view owing to its cardioprotective effect [48].

On the other hand, the microelements Ni, Cr, and Se were present in smaller quantities in all the samples, with Se being found only in protein concentrates. Similar results were described for hemp flour [15] and for protein concentrates [39], with Cr and Ni being the microelements present in lower amounts.

Regarding the two commercial brands analyzed, the flours showed statistically significant differences in the contents of all the minerals analyzed except for K. The concentrates showed no differences in K content or in the Na, Cr and Se concentrations between the two concentrates. Among all the minerals analyzed, Ni showed the greatest variability between samples. Several studies have shown that the mineral composition of hemp seeds is influenced by various parameters such as environmental and climatic conditions and soil fertilization [49]. However, Lan et al. [47] found that the contents of P, Mg, and Se were not significantly different among the varieties, which suggests that they could be variety-independent. It is noteworthy that organic hemp by-products, both flours and protein concentrates, showed significantly higher amounts of Mg, P, Ca, Cu, Zn, and Fe. This result agrees with previous studies which reported that the micronutrient content was higher for organic vegetables and legumes compared to their conventional counterparts [50]. Therefore, previous studies have shown that organic vegetables have higher contents of Mg and Fe [51] and Ca, Cu, and Zn [52].

3.5. Phenolic Composition

Significant differences between flours and protein concentrates could be observed in the total flavonoid content (TFC), whereby concentrates showed higher values (77.11 mg rutin/100 g fw) than flours (62.44 mg rutin/100 g fw). The total phenolic content (TPC)

and flavanone and dihydroflavonol content (F/DF) showed no differences between flours and concentrates (Table 4).

Table 4. Mean values ($\pm$ standard deviation) of the phenolic composition and antioxidant capacity of different hemp flours and protein concentrates.

	Hemp Flours		Hemp Protein Concentrates	
	Organic	Conventional	Organic	Conventional
TPC (mg GAE/100 g)	79.53 $\pm$ 2.81 b	66.42 $\pm$ 0.72 a	55.32 $\pm$ 0.03 a	69.14 $\pm$ 5.12 ab
TFC (mg rutin/100 g)	58.24 $\pm$ 4.05 a	66.65 $\pm$ 0.09 a	72.12 $\pm$ 0.12 b	83.10 $\pm$ 12.24 b
F/DF (mg pinocembrin/100 g)	620.31 $\pm$ 6.19 a	580.62 $\pm$ 37.71 a	768.75 $\pm$ 6.15 b	656.14 $\pm$ 4.75 ab
TEAC (nmol Trolox/100 g)	3.45 $\pm$ 0.09 b	3.75 $\pm$ 0.87 b	2.35 $\pm$ 3.01 a	2.54 $\pm$ 9.05 a

a,b Values in the same row followed by different letters are significantly different ($p < 0.05$). TPC: total phenolic content, TFC: total flavonoid content, F/DF: flavanones and dihydroflavonols, TEAC: total equivalent antioxidant activity.

Concentrations found in previous studies for phenolic compounds range from 79.0 to 662 mg GAE/100 g for hemp protein concentrates [53]. For flours, values from 74.4 to 468 mg GAE/100 g have been described [54]. This wide variability in concentrations can be attributed to the different composition of different hemp varieties [11]. Hemp seeds are rich in several phenolic acids, lignamides, phenolic amides, and flavonoids [55]. In hemp flour samples, the most abundant phenolic compounds found were hydroxycinnamic and protocatechuic acids [56], while flavanols (catechin and epicatechin), isoflavonoids (biochanin A), and flavonoids (quercetin and tyrosol) have also been described [57].

The total antioxidant activity (TEAC) was higher in the flours (3.6 nmols Trolox/100 g) than in the concentrates (2.44 nmols Trolox/100 g). Lanzoni et al. [58] found antioxidant activity in hemp seed products; they described an antioxidant activity similar to that of soy for protein concentrates. This activity seems to depend on the type of protease, the degree of hydrolysis, and the processing conditions of the concentrate [41]. The hydrolysis process that fragments proteins to release bioactive peptides appears to be one of the most influential factors [48].

Regarding the different commercial brands, only the TPC showed differences, with that of organic flour being higher (79.53 mg GAE/100 g). Previous studies have found that food products deriving from organic agriculture have a similar or slightly higher polyphenol content and antioxidant capacity [59]. In all the other bioactive compounds, no significant differences were observed in either flours or concentrates. Alu'datt et al. [60] suggested that phenolic compounds are closely associated with proteins, lipids, and polysaccharides via non-specific or covalent interactions. These interactions would explain why there are hardly any differences between the phenolic content of the flours and the concentrates analyzed. Potin et al. [61] showed that protein concentrates obtained by ultrafiltration had a slightly lower phenolic content than flour, despite the protein enrichment carried out, which confirms the binding of these compounds with other fractions of their composition.

3.6. Techno-Functional Properties

The water-holding capacity (WHC) showed values of between 2.25 g/g and 3.10 g/g, with values being lower in the flour samples than in the protein concentrates (Table 5). The oil-holding capacity (OHC) did not show significant differences between flours and concentrates or within commercial brands, with values ranging from 0.88 g/g to 1.26 g/g. No significant differences between brands were observed in the case of flours; however, the organic concentrate showed a lower WHC. The water-holding capacity is related to the taste and texture of foods, while the oil-holding capacity has been related to the emulsifying capacity of foods [62]. Nasrollahzadeh et al. [36] described WHC values as being slightly lower for protein concentrates between 1.3 g/g and 1.8 g/g. Protein denaturation is positively correlated with WHC [32], which could explain why flours have a lower WHC than concentrates owing to the production process. In relation to the OHC, Zayas [63] reported that native proteins show a lower capacity than their denatured counterparts

owing to their structural folding, which means that flours should show a lower OHC. In our samples, the WHC showed a positive correlation with the concentration of the minerals Mg ($r^2 = 0.994$) and K ($r^2 = 0.998$). However, the OHC showed a negative correlation with the MUFA ($r^2 = -0.995$) and ash ($r^2 = -0.992$) content, and a positive correlation with the PUFA content ($r^2 = 0.991$).

Table 5. Mean values ($\pm$ standard deviation) of techno-functional properties of commercial hemp flours and hemp protein concentrates.

	Hemp Flours		Hemp Protein Concentrates	
	Organic	Conventional	Organic	Conventional
WHC (g/g)	2.27 $\pm$ 0.12 a	2.25 $\pm$ 0.07 a	2.92 $\pm$ 0.01 b	3.10 $\pm$ 0.06 c
OHC (g/g)	1.19 $\pm$ 0.08 ab	1.26 $\pm$ 0.17 ab	0.95 ab $\pm$ 0.13 a	0.88 $\pm$ 0.12 a
SC (%)	2.49 $\pm$ 0.32 c	2.11 $\pm$ 0.01 b	0.92 $\pm$ 0.02 a	0.95 $\pm$ 0.06 a
WSI ($^{\circ}$ Brix)	4.3 $\pm$ 0.12 a	9.0 $\pm$ 0.10 b	9.0 $\pm$ 0.01 b	8.3 $\pm$ 0.06 b
FC (%)	70.35 $\pm$ 7.67 a	69.81 $\pm$ 4.92 a	110.14 $\pm$ 2.51 c	85.71 $\pm$ 4.76 b
FS (%)	29.25 $\pm$ 0.27 a	27.04 $\pm$ 4.81 a	44.93 $\pm$ 2.51 b	39.69 $\pm$ 2.75 c
GF (N)	71.64 $\pm$ 14.75 a	74.32 $\pm$ 13.73 a	293.13 $\pm$ 109.29 b	416.49 $\pm$ 136.14 b
L*	43.92 $\pm$ 2.47 c	34.39 $\pm$ 3.30 a	44.03 $\pm$ 0.52 c	40.21 $\pm$ 0.87 b
a*	1.83 $\pm$ 0.11 a	3.22 $\pm$ 0.15 c	2.38 $\pm$ 0.11 b	3.42 $\pm$ 0.11 d
b*	24.46 $\pm$ 1.21 b	20.30 $\pm$ 1.36 a	27.65 $\pm$ 0.34 c	27.01 $\pm$ 0.36 c

WHC: water-holding capacity, OHC: oil-holding capacity SC: swelling capacity, WSI: water solubility index, FC: foaming capacity, FS: foaming stability, GF: gel formation (hardness of the gel formed at pH = 5). L*: lightness, a*: redness, and b*: yellowness. ^{a–d} Values in the same row followed by different letters are significantly different ($p < 0.05$).

The solubility (WSI) of the hemp flours showed a large difference between the two commercial flour brands tested. However, the protein concentrates showed no differences between the two brands. Previous studies reported WSI values of 9.37 g/100 g for hemp flours [64] and 35.60% for hemp concentrates [65]. The difference from the data found in this research is due to the analysis methodology used in the different studies. The WSI is strongly related to the partial hydrolysis of proteins owing to the increase in low-molecular-weight peptides, which means that values of around 30% of protein hydrolysis give the highest values of WSI [66]. In our samples, the solubility index showed a positive correlation with the starch content ($r^2 = 0.982$). These results agree with those previously reported by Di Cairano et al. [67], who pointed out that the WSI can be used as an indicator of starch degradation. On the other hand, WSI could also depend on the different proportion of albumin fraction in the samples, as albumins have a higher solubility than globulins owing to the lower level of some amino acids (aromatic and hydrophobic) and the less rigid conformational structure [36].

The swelling capacity of flours and concentrates is related to their ability to generate greater volume when incorporated into a food, and their value depends on temperature [68]. In this study, the SC was determined at room temperature, and the highest values were obtained from hemp flour especially from the organic sample. In relation to the foaming capacity (FC), the protein concentrates showed a higher FC than flours. As for the foaming stability, flours were capable of maintaining around 40% of the foam formed after 5 min, while, in the case of the concentrates analyzed, this value rose to 44.93% for the organic concentrate and 46.30% for the conventional one. There were no differences between commercial brands for the flours, but there were differences for the concentrates, in which the organic concentrate showed a greater capacity to form foam, but less foam stability. Shen et al. [42] found a higher foaming capacity in concentrates with a higher protein concentration, which would explain the differences between concentrates and flours in this study. This foaming capacity has also been related to factors such as the solubility and surface hydrophobicity of the proteins [42]. In our samples, the highest protein concentration was found in the non-organic concentrate, which did not show higher foam formation. This may be due to the fact that the production process also has a major influence on this property, as enzymatic hydrolysis leads to a reduction in the foaming capacity of

hemp concentrates [69]. In our samples, FC showed a positive correlation with the C16:0 fatty acid concentration ($r^2 = 0.994$), and FS showed a positive correlation with the C20:0 fatty acid concentration ($r^2 = 0.999$).

As far as the hardness of the gels formed is concerned (Table 5), the protein concentrates were harder, and there were no statistically significant differences between the different commercial brands. The gelling capacity depends on both internal factors (protein composition or concentration) and external factors (pH, temperature, etc.) [18]. The protein extraction process has a strong influence on the gelling capacity [42]. Thus, the formation of high levels of aggregates during concentrate production reduces the gel-forming capacity, increasing the amounts of protein molecules which are necessary for the formation of a gel network [70]. In our samples, the strength of the gel formed at pH 5 showed a positive correlation with protein concentration ($r^2 = 0.963$) and with the concentration of the amino acid aspartate ($r^2 = 0.995$).

In relation to the color of the samples (using CIE L*a*b* color measurements) no differences were observed between flours and concentrates in the L* and a* parameters. The b* parameter showed lower values in the flours than in the concentrates. In relation to the color, organic flours were characterized by a more pronounced greenish-yellow color (lower a*, higher b*) when compared with the conventional ones. The deeper greenish hue of hemp protein concentrates may be due to the presence of chlorophyll, which is co-extracted during the production process [42]. For this reason, some concentrates are decolorized after extraction to remove the green color [71]. Furthermore, oxidation of phenolic compounds gives rise to quinones, which react with the amine groups of proteins, resulting in dark-colored adducts [72]. This means that the extraction process has a major influence on the color of protein concentrates [36]. No significant correlations were found between the color parameters and any of the other parameters analyzed.

4. Conclusions

Both the flours and the protein concentrates analyzed in this study meet current European labeling regulations. Hemp flours and hemp concentrates had a similar energy intake for the consumer; however, their composition showed differences. Carbohydrates were, thus, the main component of the flours, which essentially consisted of fiber; flours also showed a high antioxidant activity with a high concentration of total phenolic compounds. In the case of concentrates, the carbohydrate content was reduced by half, and the amount of protein increased. Hemp flours and concentrates were marketed partially defatted, with a 50% reduction in the fat content of the unprocessed hemp seeds, such that both flours and concentrates had low fat values. This fat was mainly composed of polyunsaturated fatty acids (linoleic and linolenic acids). Both flours and concentrates had an excellent amino acid profile, with the presence of all essential amino acids in large amounts. Both in the flours and in the concentrates, mineralization stood out in terms of its high K and P content. On the basis of the results obtained, hemp flour could be of great interest for application in the fortification of bakery products and breads. They offer an interesting nutritional composition, in addition to bioactive compounds, while showing an excellent swelling capacity. Protein concentrates showed higher WHC, FC, FS, and GF than the flours. For this reason, protein concentrates appear to be very interesting products for application in meat products and sauces. Organic products showed an influence on the nutritional composition, with lower concentrations of proteins and starch but a higher micronutrient content and total phenolic composition. However, no differences were found in the profile of the fatty acids, amino acids, and techno-functional properties. On the basis of these results, organic flours seem to be a good alternative to be included in the diet of consumers. In those cases where a higher protein intake is necessary, especially in elderly people or athletes, organic hemp concentrate could be a very suitable product.

Author Contributions: Conceptualization and methodology, A.M.V.-Q. and I.R.; formal analysis, Y.A.; data curation, Y.A.; writing—original draft preparation, Y.A. and A.M.V.-Q.; writing—review and editing, A.M.V.-Q. and I.R. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Data will be made available on request.

Acknowledgments: Y. Absi is grateful to the Algerian government for the grant supporting a long-term residential doctoral program abroad.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Crini, G.; Lichtfouse, E.; Chanut, G.; Morin-Crini, N. Traditional and new applications of hemp. *Sustain. Agric. Res.* **2020**, *42*, 37–87. [\[CrossRef\]](#)
- Adesina, I.; Bhowmik, A.; Sharma, H.; Shahbazi, A. A review on the current state of knowledge of growing conditions, agronomic soil health practices and utilities of hemp in the United States. *Agriculture* **2020**, *10*, 129. [\[CrossRef\]](#)
- Ranalli, P.; Venturi, G. Hemp as a raw material for industrial applications. *Euphytica* **2004**, *140*, 1–6. [\[CrossRef\]](#)
- Aytac, S. An environmentally friendly plant in terms of oxygen supply: Hemp. In Proceedings of the ICOEST 4th International Conference on Environmental Science and Technology, Kiev, Ukraine, 19–23 September 2018.
- Bouloc, P. Hemp: A plant with a worldwide distribution. In *Hemp: Industrial Production and Uses*; Bouloc, P., Ed.; CABI Publishing: Wallingford, UK, 2013; pp. 1–3. [\[CrossRef\]](#)
- Burton, R.A.; Andres, M.; Cole, M.; Cowley, J.M.; Augustin, M.A. Industrial hemp seed: From the field to value-added food ingredients. *J. Cannabis Res.* **2022**, *4*, 45. [\[CrossRef\]](#)
- Commission Regulation (EU). 2022/1393, No. 2022/1393 of 11 August 2022 amending Regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels of delta-9-tetrahydrocannabinol (Δ^9 -THC) in hemp seeds and products derived therefrom. *Off. J. Eur. Union* **2022**, *211*, 83–85.
- Hofmanová, T.; Švec, I.; Hrušková, M. Nutritional properties of non-traditional seeds. *J. Life Med.* **2014**, *2*, 10–14.
- Callaway, J.C. Hempseed as a nutritional resource: An overview. *Euphytica* **2004**, *140*, 65–72. [\[CrossRef\]](#)
- Girgih, A.T.; He, R.; Malomo, S.; Offengenden, M.; Wu, J.; Aluko, R.E. Structural and functional characterization of hemp seed (*Cannabis sativa* L.) protein-derived antioxidant and antihypertensive peptides. *J. Funct. Foods* **2014**, *6*, 384–394. [\[CrossRef\]](#)
- Russo, R.; Reggiani, R. Evaluation of protein concentration, amino acid profile and antinutritional compounds in hempseed meal from dioecious and monoecious varieties. *Am. J. Plant Sci.* **2015**, *6*, 14–22. [\[CrossRef\]](#)
- Teh, S.S.; Birch, J. Physicochemical and quality characteristics of cold-pressed hemp, flax and canola seed oils. *J. Food Compos. Anal.* **2013**, *30*, 26–31. [\[CrossRef\]](#)
- Mamone, G.; Picariello, G.; Ramondo, A.; Nicolai, M.A.; Ferranti, P. Production, digestibility and allergenicity of hemp (*Cannabis sativa* L.) protein isolates. *Food Res. Int.* **2019**, *115*, 562–571. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Vonapartis, E.; Aubin, M.P.; Seguin, P.; Mustafa, A.F.; Charron, J.B. Seed composition of ten industrial hemp cultivars approved for production in Canada. *J. Food Compos. Anal.* **2015**, *39*, 8–12. [\[CrossRef\]](#)
- Rusu, I.E.; Marc, R.A.; Mureșan, C.C.; Mureșan, A.E.; Filip, M.R.; Onica, B.M.; Csaba, K.B.; Alexa, E.; Szanto, L.; Muste, S. Advanced characterization of hemp flour (*Cannabis sativa* L.) from Dacia Secuieni and Zenit varieties, compared to wheat flour. *Plants* **2021**, *10*, 1237. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Mikulec, A.; Kowalski, S.; Sabat, R.; Skoczylas, L.; Tabaszewska, M.; Wywrocka-Gurgul, A. Hemp flour as a valuable component for enriching physicochemical and antioxidant properties of wheat bread. *LWT* **2019**, *102*, 164–172. [\[CrossRef\]](#)
- Galves, C.; Stone, A.K.; Szarko, J.; Liu, S.; Shafer, K.; Hargreaves, J.; Siarkowski, M.; Nickerson, M.T. Effect of pH and defatting on the functional attributes of safflower, sunflower, canola, and hemp protein concentrates. *Cereal Chem.* **2019**, *96*, 1036–1047. [\[CrossRef\]](#)
- Dapčević-Hadnađev, T.; Dizdar, M.; Pojić, M.; Krstonošić, V.; Zychowski, L.M.; Hadnađev, M. Emulsifying properties of hemp proteins: Effect of isolation technique. *Food Hydrocoll.* **2019**, *89*, 912–920. [\[CrossRef\]](#)
- Lukin, A.; Bitiutskikh, K. Investigation on the use of hemp flour in cookie production. *Bulgarian J. Agric. Sci.* **2017**, *23*, 664–667.
- Ertaş, N.; Aslan, M. Antioxidant and physicochemical properties of cookies containing raw and roasted hemp flour. *Acta Sci. Pol. Technol. Aliment.* **2020**, *19*, 177–184. [\[CrossRef\]](#)
- Korus, A.; Gumul, D.; Krystyjan, M.; Juszczak, L.; Korus, J. Evaluation of the quality, nutritional value and antioxidant activity of gluten-free biscuits made from corn-acorn flour or corn-hemp flour composites. *Eur. Food Res. Technol.* **2017**, *243*, 1429–1438. [\[CrossRef\]](#)

22. Zahari, I.; Ferawati, F.; Helstad, A.; Ahlström, C.; Östbring, K.; Rayner, M.; Purhagen, J.K. Development of High-Moisture Meat Analogues with Hemp and Soy Protein Using Extrusion Cooking. *Foods* **2020**, *9*, 772–785. [\[CrossRef\]](#)
23. Dabija, A.; Codină, G.G.; Gätlan, A.M.; Sânduleac, E.T.; Rusu, L. Effects of some vegetable proteins addition on yogurt quality. *Sci. Study Res. -Chem. Chem. Eng. Biotechnol. Food Ind.* **2018**, *19*, 181–192.
24. Grace, M.H.; Yousef, G.G.; Esposito, D.; Raskin, I.; Lila, M.A. Bioactive capacity, sensory properties, and nutritional analysis of a shelfstable protein-rich functional ingredient with concentrated fruit and vegetable phytoactives. *Plant Foods Hum. Nutr.* **2014**, *69*, 372–378. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
25. Kotecka-Majchrzak, K.; Kasałka-Czarna, N.; Szychaj, A.; Mikołajczak, B.; Montowska, M. The effect of hemp cake (*Cannabis sativa* L.) on the characteristics of meatballs stored in refrigerated conditions. *Molecules* **2021**, *26*, 5284. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
26. Lurueña-Martínez, M.A.; Palacios, C.; Vivar-Quintana, A.M.; Revilla, I. Effect of the addition of calcium soap to ewes' diet on fatty acid composition of ewe milk and subcutaneous fat of suckling lambs reared on ewe milk. *Meat Sci.* **2010**, *84*, 677–683. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
27. Betances-Salcedo, E.; Revilla, I.; Vivar-Quintana, A.M.; González-Martín, M.I. Flavonoid and antioxidant capacity of propolis prediction using near infrared spectroscopy. *Sensors* **2017**, *17*, 1647. [\[CrossRef\]](#)
28. Millar, K.A.; Gallagher, E.; Burke, R.; McCarthy, S.; Barry-Ryan, C. Proximate composition and anti-nutritional factors of fava-bean (*Vicia faba*), green-pea and yellow-pea (*Pisum sativum*) flour. *J. Food Compos. Anal.* **2019**, *82*, 103233. [\[CrossRef\]](#)
29. Valencia, D.; Alday, E.; Robles-Zepeda, R.; Garibay-Escobar, A.; Galvez-Ruiz, J.C.; Salas-Reyes, M.; Velazquez, C. Seasonal effect on chemical composition and biological activities of Sonoran propolis. *Food Chem.* **2012**, *131*, 645–651. [\[CrossRef\]](#)
30. Popova, M.; Bankova, V.; Butovska, D.; Petkov, V.; Nikolova-Damyanova, B.; Sabatini, A.G.; Bogdanov, S. Validated methods for the quantification of biologically active constituents of poplar-type propolis. *Phytochem. Anal. Int. J. Plant Chem. Biochem. Tech.* **2004**, *15*, 235–240. [\[CrossRef\]](#)
31. Chen, C.; Pan, Z. Cannabidiol and terpenes from hemp-ingredients for future foods and processing technologies. *J. Future Foods* **2021**, *1*, 113–127. [\[CrossRef\]](#)
32. Osen, R.; Toelstede, S.; Wild, F.; Eisner, P.; Schweiggert-Weisz, U. High moisture extrusion cooking of pea protein isolates: Raw material characteristics, extruder responses, and texture properties. *J. Food Eng.* **2014**, *127*, 67–74. [\[CrossRef\]](#)
33. Bora, P.S. Functional properties of native and succinylated lentil (*Lens culinaris*) globulins. *Food Chem.* **2002**, *77*, 171–176. [\[CrossRef\]](#)
34. Tomé, A.S.; Pires, C.; Batista, I.; Sousa, I.; Raymundo, I. Protein gels and emulsions from mixtures of Cape hake and pea proteins. *J. Sci. Food Agric.* **2015**, *95*, 289–298. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
35. Zajac, M.; Guzik, P.; Kulawik, P.; Tkaczewska, J.; Florkiewicz, A.; Migdał, W. The quality of pork loaves with the addition of hemp seeds, de-hulled hemp seeds, hemp protein and hemp flour. *LWT* **2019**, *105*, 190–199. [\[CrossRef\]](#)
36. Nasrollahzadeh, F.; Roman, L.; Swaraj, V.S.; Ragavan, K.V.; Vidal, N.P.; Dutcher, J.R.; Martinez, M.M. Hemp (*Cannabis sativa* L.) protein concentrates from wet and dry industrial fractionation: Molecular properties, nutritional composition, and anisotropic structuring. *Food Hydrocoll.* **2022**, *131*, 107755. [\[CrossRef\]](#)
37. Kornet, R.; Penris, S.; Venema, P.; van der Goot, A.J.; Meinders, M.B.; van der Linden, E. How pea fractions with different protein composition and purity can substitute WPI in heat-set gels. *Food Hydrocoll.* **2021**, *120*, 106891. [\[CrossRef\]](#)
38. Mölleken, H.; Theimer, R.R. Survey of minor fatty acids in *Cannabis sativa* L. fruits of various origins. *J. Int. Hemp Assoc.* **1997**, *4*, 13–17.
39. Oseyko, M.; Sova, N.; Chornei, K. Substantiation of hemp seeds storage and processing technologies for functional, dietary and specialty products. *Rev. Ukr. Food J.* **2021**, *10*, 427–458. [\[CrossRef\]](#)
40. Mattila, P.H.; Pihlava, J.M.; Hellström, J.; Nurmi, M.; Eurola, M.; Mäkinen, S.; Jalava, T.; Pihlanto, A. Contents of phytochemicals and antinutritional factors in commercial protein-rich plant products. *Food Qual. Saf.* **2018**, *2*, 213–219. [\[CrossRef\]](#)
41. Tang, C.H.; Ten, Z.; Wang, X.S.; Yang, X.Q. Physicochemical and functional properties of hemp (*Cannabis sativa* L.) protein isolate. *J. Agric. Food Chem.* **2006**, *54*, 8945–8950. [\[CrossRef\]](#)
42. Shen, P.; Gao, Z.; Fang, B.; Rao, J.; Chen, B. Ferreting out the secrets of industrial hemp protein as emerging functional food ingredients. *Trends Food Sci. Technol.* **2021**, *112*, 1–15. [\[CrossRef\]](#)
43. Teh, S.S.; Bekhit, A.E.D.; Carne, A.; Birch, J. Effect of the defatting process, acid and alkali extraction on the physicochemical and functional properties of hemp, flax and canola seed cake protein isolates. *J. Food Meas. Charact.* **2014**, *8*, 92–104. [\[CrossRef\]](#)
44. Hadnađev, M.; Dapčević-Hadnađev, T.; Lazaridou, A.; Moschakis, T.; Michaelidou, A.M.; Popović, S.; Biliaderis, C.G. Hempseed meal protein isolates prepared by different isolation techniques. Part I. physicochemical properties. *Food Hydrocoll.* **2018**, *79*, 526–533. [\[CrossRef\]](#)
45. Fountoulakis, M.; Lahm, H.W. Hydrolysis and amino acid composition of proteins. *J. Chromatogr. A* **2008**, *826*, 109–134. [\[CrossRef\]](#)
46. House, J.D.; Neufeld, J.; Leson, G. Evaluating the quality of protein from hemp seed (*Cannabis sativa* L.) products through the use of the protein digestibility-corrected amino acid score method. *J. Agric. Food Chem.* **2010**, *58*, 11801–11807. [\[CrossRef\]](#)
47. Lan, Y.; Zha, F.; Peckrul, A.; Hanson, B.; Johnson, B.; Rao, J.; Chen, B. Genotype x environmental effects on yielding ability and seed chemical composition of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) varieties grown in North Dakota, USA. *J. Am. Oil Chem. Soc.* **2019**, *96*, 1417–1425. [\[CrossRef\]](#)
48. Farinon, B.; Molinari, R.; Costantini, L.; Merendino, N. The seed of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.): Nutritional quality and potential functionality for human health and nutrition. *Nutrients* **2020**, *12*, 1935. [\[CrossRef\]](#)

49. Mihoc, M.; Pop, G.; Alexa, E.; Radulov, I. Nutritive quality of Romanian hemp varieties (*Cannabis sativa* L.) with special focus on oil and metal contents of seeds. *Chem. Cent. J.* **2012**, *6*, 122.
50. Hunter, D.; Foster, M.; McArthur, J.C.; Ojha, R.; Petoczamp, P.; Samman, S. Evaluation of the Micronutrient Composition of Plant Foods Produced by Organic and Conventional Agricultural Methods. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2011**, *51*, 571–582. [\[CrossRef\]](#)
51. Worthington, V. Nutritional Quality of Organic Versus Conventional Fruits, Vegetables, and Grains. *J. Altern. Complement. Med.* **2001**, *7*, 161–173. [\[CrossRef\]](#)
52. Ryan, M.H.; Derrick, J.W.; Dann, P.R. Grain mineral concentrations and yield of wheat grown under organic and conventional management. *J. Sci. Food Agric* **2004**, *84*, 207–216. [\[CrossRef\]](#)
53. Tremlová, B.; Mikulášková, H.K.; Hajduchová, K.; Jancikova, S.; Kaczorová, D.; Čavar Zeljković, S.; Dordevic, D. Influence of technological maturity on the secondary metabolites of hemp concentrate (*Cannabis sativa* L.). *Foods* **2021**, *10*, 1418. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
54. Vutukuru, J.S.S. Protein Structure-Function Relationship of Commercial Hempseed (*Cannabis sativa* L.) Protein Concentrates. Ph.D. Thesis, University of Guelph, Guelph, ON, Canada, 2021.
55. Izzo, L.; Pacifico, S.; Piccolella, S.; Castaldo, L.; Narváez, A.; Grosso, M.; Ritieni, A. Chemical analysis of minor bioactive components and cannabidiol acid in commercial hemp seed oil. *Molecules* **2020**, *25*, 3710. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
56. Bonacci, S.; Di Stefano, V.; Sciacca, F.; Buzzanca, C.; Virzi, N.; Argento, S.; Melilli, M.G. Hemp Flour Particle Size Affects the Quality and Nutritional Profile of the Enriched Functional Pasta. *Foods* **2023**, *12*, 774. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
57. Multari, S.; Neacsu, M.; Scobbie, L.; Cantlay, L.; Duncan, G.; Vaughan, N.; Stewart, D.; Russell, W.R. Nutritional and phytochemical content of high-protein crops. *J. Agric. Food Chem.* **2016**, *64*, 7800–7811. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
58. Lanzoni, D.; Skřivanová, E.; Rebucci, R.; Crotti, A.; Baldi, A.; Marchetti, L.; Giromini, C. Total Phenolic Content and Antioxidant Activity of In Vitro Digested Hemp-Based Products. *Foods* **2023**, *12*, 601. [\[CrossRef\]](#)
59. Barański, M.; Średnicka-Tober, D.; Volakakis, N.; Seal, C.; Sanderson, R.; Stewart, G.B.; Benbrook, C.; Biavati, B.; Markellou, E.; Giotis, C.; et al. Higher antioxidant and lower cadmium concentrations and lower incidence of pesticide residues in organically grown crops: A systematic literature review and meta-analyses. *Br. J. Nutr.* **2014**, *112*, 794–811. [\[CrossRef\]](#)
60. Alu'datt, M.H.; Rababah, T.; Ereifej, K.; Alli, I. Distribution, antioxidant and characterisation of phenolic compounds in soybeans, flaxseed and olives. *Food Chem.* **2013**, *139*, 93–99. [\[CrossRef\]](#)
61. Potin, F.; Goure, E.; Lubbers, S.; Husson, F.; Saurel, R. Functional properties of hemp protein concentrate obtained by alkaline extraction and successive ultrafiltration and spray-drying. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2022**, *57*, 436–446. [\[CrossRef\]](#)
62. Malomo, S.A.; Aluko, R.E. A comparative study of the structural and functional properties of isolated hemp seed (*Cannabis sativa* L.) albumin and globulin fractions. *Food Hydrocoll.* **2015**, *43*, 743–752. [\[CrossRef\]](#)
63. Zayas, J.F. Water holding capacity of proteins. In *Functionality of Proteins in Food*; Zayas, J.F., Ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany; New York, NY, USA, 1997; Volume 1, pp. 76–133. [\[CrossRef\]](#)
64. Teterycz, D.; Sobota, A.; Przygodzka, D.; Łysakowska, P. Hemp seed (*Cannabis sativa* L.) enriched pasta: Physicochemical properties and quality evaluation. *PLoS ONE* **2021**, *16*, e0248790. [\[CrossRef\]](#)
65. Talens, C.; Lago, M.; Simó-Boyle, L.; Odriozola-Serrano, I.; Ibarguen, M. Desirability-based optimization of bakery products containing pea, hemp and insect flours using mixture design methodology. *LWT* **2022**, *168*, 113878. [\[CrossRef\]](#)
66. Mune Mune, M.A. Influence of degree of hydrolysis on the functional properties of cowpea protein hydrolysates. *J. Food Process. Preserv.* **2015**, *39*, 2386–2392. [\[CrossRef\]](#)
67. Di Cairano, M.; Condelli, N.; Caruso, M.C.; Marti, A.; Cela, N.; Galgano, F. Functional properties and predicted glycemic index of gluten free cereal, pseudocereal and legume flours. *LWT* **2020**, *133*, 109860. [\[CrossRef\]](#)
68. Ogori, A.F.; Girgih, A.T.; Eke, M.O.; Abu, J.O.; Famuwagun, A.A. Phytochemical, anti nutrient, invitro-protein digestibility and functional properties of (*Balanites aegyptiaca* (L.) Delile) Aduwa protein meals, protein concentrate and isolate. *Food Ther. Health Care* **2022**, *4*, 10. [\[CrossRef\]](#)
69. Yin, S.W.; Tang, C.H.; Cao, J.S.; Hu, E.K.; Wen, Q.B.; Yang, X.Q. Effects of limited enzymatic hydrolysis with trypsin on the functional properties of hemp (*Cannabis sativa* L.) protein isolate. *Food Chem.* **2008**, *106*, 1004–1013. [\[CrossRef\]](#)
70. Malomo, S.A.; He, R.; Aluko, R.E. Structural and functional properties of hemp seed protein products. *J. Food Sci.* **2014**, *79*, C1512–C1521. [\[CrossRef\]](#)
71. Girgih, A.T.; Udenigwe, C.C.; Aluko, R.E. In vitro antioxidant properties of hemp seed (*Cannabis sativa* L.) protein hydrolysate fractions. *J. Am. Oil Chem. Soc.* **2011**, *88*, 381–389. [\[CrossRef\]](#)
72. Lund, M.N. Reactions of plant polyphenols in foods: Impact of molecular structure. *Trends Food Sci. Technol.* **2021**, *112*, 241–251. [\[CrossRef\]](#)

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Artículo 3.

Título: Comparative Analysis of Commercial Plant-Based Gluten-Free Proteins: Exploring the Nutritional Composition and Functional Properties of Rice, Pea, and Soybean

Autores: Yamina Absi, Isabel Revilla, and Ana M. Vivar-Quintana

Revista: ARTÍCULO NO PUBLICADO

Resumen

Las proteínas vegetales, han ganado reconocimiento como alternativas viables a las proteínas tradicionales de origen animal. Su consideración de proteínas sostenibles, su excepcional composición nutricional, así como sus buenas propiedades funcionales y posibles beneficios para la salud, incluyendo actividades antioxidantes y antimicrobianas son las principales razones de su creciente demanda. Los Concentrados de Proteínas Vegetales (CPVs) se obtienen de fuentes vegetales y se procesan para aumentar su contenido proteico, sirviendo como alternativas a las proteínas de origen animal en la industria alimentaria. Además, contienen compuestos bioactivos asociados con posibles beneficios para la salud, mejorando su perfil nutricional. También presentan propiedades funcionales como emulsificación y capacidad de absorción de agua/aceite muy atractivas para su utilización como ingredientes en diferentes formulaciones. Entre las fuentes vegetales utilizadas para la elaboración de estos concentrados se encuentran las legumbres, los cereales, las semillas oleaginosas y los pseudocereales. Sin embargo, la composición de los CPV, así como sus propiedades funcionales, variarán en función de la fuente vegetal de procedencia y de los métodos de procesamiento utilizados en su obtención.

Los concentrados de proteínas de soja, en particular el aislado de proteína de soja (SPI), se emplean ampliamente en la industria alimentaria, conocidos por su alto contenido proteico y rica composición mineral. Exhiben una buena versatilidad tecnológica ya que son capaces de crear geles y de estabilizar emulsiones, mostrando buena capacidad espumante. Las proteínas de soja se han utilizado en diversas aplicaciones, tales como productos de panadería, snacks, barras y bebidas, así como en la producción de miso, queso, tofu y productos vegetarianos con sabor a carne.

Las proteínas de legumbres, como las proteínas de guisante, están ganando popularidad debido a su riqueza en aminoácidos esenciales, precios competitivos y sostenibilidad. Las proteínas de guisante tienen propiedades funcionales tales como emulsificación, formación de espuma, retención de agua y absorción de grasas, lo que las hace adecuadas para diversos productos alimenticios, como barras de proteínas, confitería sin gluten, productos de panadería, pasta y como sustitutos de proteínas de huevo en mayonesa.

Los cereales, como el arroz, son fuentes importantes de proteínas vegetales con alto

valor nutricional y propiedades hipoalergénicas. Los concentrados de proteínas de arroz, incluyendo el aislado de proteína de arroz blanco (WRP) y la proteína de salvado de arroz (RBP), se utilizan en productos de panadería y galletas, nutrición infantil y para personas mayores, y en bebidas alternativas para niños con alergia a la leche de vaca y como suplementos para atletas. La variedad de arroz utilizada y el proceso de concentración influyen en la composición final y el comportamiento funcional de estos productos.

Este estudio tiene como objetivo comparar la composición nutricional y las propiedades funcionales de los concentrados de proteínas de guisante, arroz y soja de diferentes marcas comerciales. Para llevarlo a cabo se analizaron seis variedades comerciales de concentrados de proteínas de soja (*Glycina maxima*), guisante (*Pisum sativum*) y arroz (*Oryza sativa*), adquiridos en mercados locales en Zamora (España) y tiendas en internet. Se llevaron a cabo análisis de composición proximal, minerales, ácidos grasos, componentes bioactivos y actividad antioxidante, así como parámetros fisicoquímicos y tecnofuncionales. La composición proximal se determinó siguiendo procedimientos de la AOAC. La concentración de minerales se analizó mediante ICP-MS, los ácidos grasos mediante cromatografía de gases, y los componentes bioactivos (flavononas, dihidroflavonoles, flavonoides, y fenoles totales) y la actividad antioxidante mediante métodos colorimétricos y ABTS. Se evaluaron parámetros fisicoquímicos como la actividad de agua y el color. También se determinaron las siguientes propiedades tecnofuncionales: capacidad de retención de agua, capacidad de retención de aceite, índice de solubilidad en agua, capacidad de hinchamiento, capacidad espumante y formación de geles.

Los resultados obtenidos pusieron de manifiesto que el contenido en proteínas de los concentrados analizados osciló entre 78,3% en los concentrados de guisante y 85,4% en los concentrados de soja. La grasa es el segundo componente más abundante, siendo más alta en concentrados de guisante (8,7%) y arroz (6,0%), y más baja en concentrados de soja (2,4%). La concentración de grasa varía, siendo siempre baja que la de las materias primas utilizadas en la obtención del concentrado debido al proceso de desgrasado. La humedad varía de 4,3% a 7,2%, siendo más alta en concentrados de guisante. Los carbohidratos están presentes en bajas concentraciones, encontrándose los mayores contenidos en una de las muestras de concentrado de arroz analizadas (7,0%). Los valores de almidón varían entre 0,9% en concentrados de arroz y 1,9% en

concentrados de guisante. La fibra y el azúcar total son <1% en todas las muestras. El contenido energético fue similar para todos los concentrados.

La humedad, ceniza, fibra, almidón y carbohidratos muestran amplias variaciones dependiendo del material vegetal del que proceda el concentrado. Se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las marcas comerciales de cada muestra, especialmente entre las marcas de proteína de soja y arroz en relación con la humedad y el contenido de carbohidratos. La variabilidad en los parámetros estudiados se atribuye a factores tanto de la materia prima como del proceso de obtención del concentrado.

El sodio fue el macroelemento más abundante en todas las muestras, con concentraciones que variaron entre 2702,76 ppm para proteína de arroz y 13392,89 ppm para proteína de soja. En cuanto a microelementos, el hierro fue el más abundante en todas las muestras, seguido por zinc y manganeso. Se observaron diferencias significativas entre marcas comerciales, posiblemente debido a la variabilidad de la materia prima y el proceso de extracción de proteínas. Se detectaron elementos tóxicos como plomo y cadmio en todas las muestras. Las concentraciones de plomo oscilan entre 116,57 ppb y 680,30 ppb, mientras que las de cadmio oscilan entre 20,74 ppb y 59,51 ppb. La variabilidad en la concentración mineral entre marcas puede deberse a diferencias en el contenido mineral del suelo y en la disponibilidad para los tejidos de las plantas. Además, el proceso de extracción de proteínas también puede afectar el contenido mineral final.

Se observaron diferencias significativas en todos los ácidos grasos entre las marcas de arroz, guisante y soja. El ácido graso C16:0 fue el más abundante en todas las muestras, excepto en una de las marcas de soja. El ácido Oleico (C18:1) fue el segundo más abundante, con variaciones notables entre las marcas y las materias primas. El tercer ácido graso más abundante fue C18:2 n6c en arroz, mientras que en guisante y soja fue C18:2 n6t. Las concentraciones de ácidos grasos saturados (SFA) fueron altas en concentrados de soja y guisante (52-63%), mientras que el arroz mostró contenido de SFA más bajo (47%). Las concentraciones de ácidos grasos monoinsaturados (MUFA) variaron significativamente, siendo más bajas en una de las marcas de soja. Los concentrados de soja mostraron mayores contenidos de ácidos grasos poliinsaturados (PUFA), especialmente n-6, seguidos por guisante y arroz, con variaciones notables entre marcas.

El estudio del contenido fenólico total y la actividad antioxidante total (TEAC) puso de

manifiesto diferencias significativas en el contenido fenólico y flavonoide, así como en la actividad antioxidante, entre las marcas y tipos de proteínas analizadas. Los concentrados de soja exhibieron los valores más altos de contenido fenólico total (TPC) y contenido flavonoide total (TFC), así como con una mayor actividad antioxidante.

Respecto a las propiedades funcionales los resultados resaltan las variaciones entre las muestras analizadas y por lo tanto sobre su posible incorporación en la elaboración de alimentos. La capacidad de retención de agua y aceite fue más alta en los concentrados de soja y guisante siendo la solubilidad en agua más baja en las muestras de arroz. La capacidad de hinchamiento fue mayor en las proteínas de soja. Sin embargo, las proteínas de arroz mostraron mayor capacidad y estabilidad de espuma. Por su parte las proteínas de soja formaron geles más duros. En cuanto a la actividad emulsionante, las proteínas de arroz mostraron la mayor actividad y estabilidad, mientras que las de guisante mostraron una mayor influencia con el pH.

A partir de los resultados obtenidos, estas tres fuentes de proteínas vegetales podrían utilizarse en diversas aplicaciones de la industria alimentaria. Cada una tiene ventajas e inconvenientes únicos, y su elección dependerá de las necesidades específicas de formulación y de las preferencias del consumidor. Como la demanda de alternativas alimentarias vegetales y sin gluten sigue creciendo, la investigación en este campo seguirá siendo crucial para desarrollar productos innovadores y nutritivos. Los principales retos para la aplicabilidad de estas proteínas estarán relacionados con la mejora del sabor y el aroma, ya que algunas proteínas vegetales tienen sabores y olores característicos que es necesario enmascarar, y con la búsqueda de pretratamientos que permitan mejorar su digestibilidad.

V. CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Conclusión del artículo 1.

Las harinas vegetales son un conjunto de harinas obtenidas de muy diferentes materias primas. Aunque este término se utiliza de forma genérica no todos los productos englobados en esta denominación tienen la misma composición y, por lo tanto, no tienen el mismo aporte nutricional. Así, aunque todas las harinas analizadas en este trabajo (arroz, garbanzo, guisante, soja y cáñamo) presentaron como componente principal los hidratos de carbono y aportaron una cantidad similar de energía (Kcal/100 g), su composición nutricional varió significativamente dependiendo de la especie vegetal. Las harinas de guisantes y garbanzos mostraron un elevado contenido de proteína y fibra, mientras que las harinas de soja y cáñamo aportaban cantidades significativas de grasa.

En cuanto a la composición mineral, el potasio y el fósforo, como macroelementos, y el hierro, como microelemento, fueron los más destacados en todas las harinas. Sorprendentemente, se detectó la presencia de elevadas cantidades de plomo en algunas de estas harinas por lo que las autoridades sanitarias deben ser conscientes de este hecho para poner en marcha mecanismos de control de las harinas vegetales.

La composición fenólica, la actividad antioxidante y el perfil de ácidos grasos de estas harinas también mostraron una gran variación atendiendo a la especie vegetal. Además de las diferencias debidas a la propia materia prima, el estudio ha evidenciado que diferentes marcas comerciales de un mismo producto presentaron composiciones muy variables, por lo que parece necesario educar a los consumidores para que comprueben las etiquetas nutricionales de este tipo de alimentos con el fin de para garantizar dietas saludables. A pesar de las diferencias entre marcas comerciales, un análisis por componentes principales de las muestras permitió identificar las diferentes harinas según la especie vegetal.

Conclusión del artículo 2.

Tanto las harinas como los concentrados proteicos de cáñamo analizados en este estudio cumplen la normativa europea vigente sobre etiquetado presentando un aporte energético similar para el consumidor; sin embargo, su composición nutricional mostró

diferencias significativas. Así, los hidratos de carbono fueron el principal componente de las harinas, constituidos esencialmente por fibra; así mismo se detectó una elevada actividad antioxidante con una alta concentración de compuestos fenólicos totales. En el caso de los concentrados, el contenido de hidratos de carbono se redujo a la mitad y mostrando una mayor concentración de proteínas. Las harinas y los concentrados de cáñamo se comercializan parcialmente desgrasados, de forma que tanto las harinas como los concentrados presentaron valores bajos de grasa. Esta grasa estuvo compuesta principalmente por ácidos grasos poliinsaturados (ácidos linoleico y linolénico). Tanto las harinas como los concentrados presentaban un excelente perfil de aminoácidos, con presencia de todos los aminoácidos esenciales en elevadas cantidades, así como un alto contenido en K y P. Los concentrados de proteínas mostraron mejores propiedades funcionales que las harinas con un mayor WHC, FC, FS y GF. La producción ecológica mostró una influencia significativa en la composición nutricional, de manera que los productos ecológicos presentaron menores concentraciones de proteínas y almidón, pero un mayor contenido en micronutrientes y composición fenólica total. Sin embargo, no se encontraron diferencias en el perfil de los ácidos grasos, aminoácidos y propiedades tecnofuncionales.

En base a los resultados obtenidos, las harinas de cáñamo podrían ser de gran interés para su aplicación en el enriquecimiento de productos de panadería y panes. Ofrecen una interesante composición nutricional, además de compuestos bioactivos, al tiempo que muestran una excelente capacidad de hinchamiento. Debido a sus mejores propiedades funcionales, los concentrados de proteínas parecen ser productos muy interesantes para su aplicación en productos cárnicos y salsas. En aquellos casos en los que sea necesario un mayor aporte proteico, especialmente en personas mayores o deportistas, el concentrado de cáñamo ecológico podría ser un producto muy adecuado.

Conclusión del artículo 3.

Los distintos concentrados proteicos presentaron diferencias significativas en su composición proximal, tanto debido a la especie vegetal como a la marca comercial. Así, los concentrados de arroz presentaron los mayores contenidos en almidón, mientras que los concentrados de soja tenían los mayores contenidos en proteínas y cenizas. Por su parte, los concentrados de guisantes presentaron los mayores contenidos de grasa y humedad. Desde el punto de vista nutricional, sin embargo, todos los concentrados

proteicos mostraron un contenido energético similar. La composición mineral de los concentrados se caracterizó por un alto contenido en sodio y fósforo en todos los casos, seguido del calcio en los concentrados de arroz y soja y del potasio en los concentrados de guisante. Se encontraron pequeñas cantidades de Cd y Pb en todas las muestras. Se observó una mayor actividad antioxidante en los concentrados de soja, marcada por su alta concentración de compuestos fenólicos totales y flavonoides. El perfil de ácidos grasos mostró una gran variabilidad entre muestras, en especial en el contenido de ácidos grasos n3 así como en la relación n6/n3 tanto entre concentrados de diferentes materias primas como entre marcas comerciales. En cuanto a las propiedades funcionales obtenidas, los resultados dependen tanto de la especie como de la marca comercial. Los concentrados de soja exhibieron mejores capacidades de retención de agua/aceite, solubilidad, hinchamiento y gelificación, mientras que los concentrados de arroz mostraron mejores capacidades espumantes, emulsionantes y estabilizantes. A partir de los resultados obtenidos, estas tres fuentes de proteínas vegetales podrían utilizarse en diversas aplicaciones de la industria alimentaria. Cada una tiene ventajas e inconvenientes únicos, y su elección dependerá de las necesidades específicas de formulación y de las preferencias del consumidor.

Conclusión final

En conclusión, los resultados de estos estudios indican que la variedad y/o la marca de las harinas y los concentrados proteicos pueden influir significativamente en sus propiedades nutricionales y tecno funcionales. Por lo tanto, es esencial informar a los consumidores sobre la importancia de leer las etiquetas de este tipo de alimentos. Los perfiles nutricionales sugieren que las harinas y concentrados de origen vegetal podrían ser alternativas prometedoras, gracias a su perfil de aminoácidos, ácidos grasos, propiedades antioxidantes y su composición mineral. Las propiedades tecno funcionales de las harinas y concentrados, por su parte, permitirán explorar fórmulas alimentarias innovadoras debido a sus propiedades como la emulsificación, la solubilidad, la gelificación y las capacidades de retención de aceite y agua. Adaptándose cada tipo de productos a un proceso industrial diferente. Finalmente, las proteínas y harinas de origen vegetal pueden contribuir a un futuro sostenible y más ecológico al combatir el cambio climático, mejorar la salud y ofrecer ventajas económicas.