

Trabajo de Fin de Grado
(TFG)

QUINOA, AMARANTO Y TRIGO SARRACENO:

¿Cómo afecta el procesado y la digestión en el
valor nutricional de los pseudocereales?

Zaloa Arauzo Higuero



Universidad de Valladolid

Grado: Nutrición Humana y Dietética

Tutores: Raúl Bodas Rodríguez e Irma Caro Canales

Curso académico: 2023/2024

Autora: Zaloa Arauzo Higuero

Tutores: Raúl Bodas Rodríguez e Irma Caro Canales

Trabajo de Fin de Grado

Curso académico 2023-2024

Grado en Nutrición Humana y Dietética

Facultad de Medicina

Universidad de Valladolid

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer la atención y orientación prestada por mis dos tutores Raúl Bodas Rodríguez e Irma Caro Canales, ya que sin su ayuda este trabajo no hubiera sido posible.

A la universidad de Valladolid por acogerme, guiarme y establecer las bases de mi formación como futura profesional en Nutrición Humana y Dietética.

A mi *cuadrilla* de amigos de Bilbao, pareja y a las nuevas amistades construidas durante la universidad, con especial mención a Lucía, Esther, Olaia y Ánxela, ya que sin todos ellos esta etapa no hubiera sido la misma.

Sin olvidarme de mi familia, por todo su apoyo incondicional, dedicación de su tiempo y recursos en educarme, y fundamentalmente por enseñarme a ser una mejor persona y afrontar el día a día con una sonrisa.

Pero sobre todo a *aita* y *ama* por brindarme la oportunidad de formarme en la universidad, apoyarme en todos y cada uno de los momentos vividos y confiar siempre en que soy capaz de superar lo que me proponga. Nunca estaré a la altura de poder agradecerlos.

Todo lo que soy es gracias a vosotros.

Maite zaituztet.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	II
PALABRAS CLAVE.....	II
ABSTRACT.....	II
KEY WORDS.....	III
SIGLAS Y ABREVIATURAS.....	IV
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PSEUDOCEREALES.....	1
1.1.1. DEFINICIÓN Y TIPOS.....	1
1.1.2. IMPORTANCIA DE LA PRODUCCIÓN Y CONSUMO; PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS.....	1
1.2. VALOR NUTRICIONAL.....	3
1.2.1. MACRONUTRIENTES.....	3
1.2.2. MICRONUTRIENTES.....	6
1.3. ESTUDIOS DE DIGESTIBILIDAD.....	7
1.3.1. MODELO ESTÁTICO.....	8
1.3.2. MODELO DINÁMICO.....	8
2. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO.....	9
3. OBJETIVOS.....	9
4. MATERIAL Y MÉTODOS.....	10
4.1. DEFINICIÓN DE LA PREGUNTA DE INTERÉS.....	10
4.2. LOCALIZACIÓN Y SELECCIÓN DE LOS ESTUDIOS.....	10
4.3. PALABRAS CLAVE.....	10
4.4. CRITERIOS DE INCLUSIÓN DE LOS ESTUDIOS.....	11
4.5. CRITERIOS DE EXCLUSIÓN DE LOS ESTUDIOS.....	11
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	13
6. CONCLUSIONES.....	29
7. LIMITACIONES.....	29
8. BIBLIOGRAFÍA.....	30
9. ANEXOS.....	36

RESUMEN

Los pseudocereales son plantas no gramíneas que producen semillas con ciertas similitudes con los cereales. Tres de estos alimentos (quinoa, amaranto y trigo sarraceno) están adquiriendo una creciente importancia en nuestra dieta debido a su elevado valor nutricional (son fuente de proteínas, hidratos de carbono y grasa saludable, además de fibra). El presente trabajo surge de la necesidad de conocer la digestibilidad de estos tres alimentos y cómo el procesado influye sobre ella. El objetivo de este TFG fue elaborar una revisión bibliográfica sistemática acerca de los conocimientos o evidencias científicas existentes hasta el momento, sobre los efectos del procesado y la digestión en el valor nutricional de la quinoa, el amaranto y el trigo sarraceno. Se realizó la búsqueda en las bases de datos Scopus y PubMed utilizando los descriptores *digestibility*, *human*, *quinoa*, *amaranth*, *buckwheat* y sus equivalentes en español (digestibilidad, humano, quinoa, amaranto y trigo sarraceno) con un límite temporal desde 1990 hasta 2024. Los 83 resultados obtenidos fueron seleccionados para su revisión, de los cuales 35 pertenecían a la quinoa, 23 al amaranto y 25 al trigo sarraceno. Tras la aplicación de filtros y criterios de inclusión (límite temporal del estudio, tipo, idioma, modelo, especie y valores de digestibilidad) y de exclusión (revisiones o estudios observacionales, estudios sin texto completo y especie), los estudios resultantes fueron 16, 8 y 5 para quinoa, amaranto y trigo sarraceno, respectivamente, y que formaron parte del presente TFG. La mayor parte de los estudios se llevaron a cabo en un laboratorio tanto con la aplicación del modelo de digestión estático como con la utilización de ratones; y una minoría de ellos, en sujetos sanos y celíacos. Los valores medios de digestibilidad de las semillas de quinoa, amaranto y trigo sarraceno fueron de 81.2, 71.6 y 50 %, respectivamente. Las formas de empleo de los pseudocereales fueron: semillas, harina, panes, galletas y papillas. Los tratamientos de procesado utilizados mayoritariamente fueron la molienda, cocción y tueste y en menor medida el horneado, germinado, tamizado, secado y extrusión. Únicamente el calor seco resultó en una disminución de la digestibilidad. En el resto de los casos (26 de los 28 artículos) se observó un aumento de la digestibilidad tanto del almidón como proteica frente en respuesta a la aplicación de tratamientos. Tras la aplicación del procesado, la digestibilidad del almidón alcanzó valores del 98.0, 75.4 y 76.6 % y la de la proteína de 95.3, 84.4 y 70.0 % para quinoa, amaranto y trigo sarraceno, respectivamente.

PALABRAS CLAVE

Digestibilidad; quinoa; amaranto; trigo sarraceno; procesado; modelo de digestión; humano; almidón; proteína; índice glucémico.

ABSTRACT

Pseudocereals are non-grass plants that produce seeds with certain similarities to cereals. Three of these foods (quinoa, amaranth and buckwheat) are becoming increasingly important in our diet due to their high nutritional value (they are a source of protein, carbohydrates and healthy fat, as well as fibre). The present work arises from the need to know the digestibility of these three foods and how processing influences it. The objective of this TFG was to elaborate a systematic literature review about the existing scientific knowledge or evidence on the effects of processing and digestion on the nutritional value of quinoa, amaranth and buckwheat. A search was carried out in the Scopus and PubMed databases using the

descriptors digestibility, human, quinoa, amaranth, buckwheat and their equivalents in Spanish (*digestibilidad, humano, quinoa, amaranto* and *trigo sarraceno*) with a time limit from 1990 to 2024. The 83 results obtained were selected for review, of which 35 belonged to quinoa, 23 to amaranth and 25 to buckwheat. After the application of filters and inclusion criteria (time limit of the study, type, language, model, species and digestibility values) and exclusion criteria (reviews or observational studies, studies without full text and species), the resulting studies were 16, 8 and 5 for quinoa, amaranth and buckwheat, respectively, which took part in the present TFG. Most of the studies were carried out in a laboratory with both the application of the static digestion model and the use of mice; and a minority of them, in healthy and celiac subjects. The mean digestibility values of quinoa, amaranth and buckwheat seeds were 81.2, 71.6 and 50 %, respectively. The forms of use of the pseudocereals were: seeds, flour, breads, crackers and porridges. The processing treatments used were mainly milling, cooking and roasting, and to a lesser extent baking, sprouting, sieving, drying and extrusion. Only dry heat resulted in a decrease in digestibility. In the remaining cases (26 of the 28 items), an increase in both starch and protein digestibility was observed in response to the application of treatments. After processing, starch digestibility reached values of 98.0, 75.4 and 76.6 % and protein digestibility of 95.3, 84.4 and 70.0 % for quinoa, amaranth and buckwheat, respectively.

KEY WORDS

Digestibility; quinoa, amaranth; buckwheat; processing; digestion model; human; starch; protein; glycemic index.

SIGLAS Y ABREVIATURAS

- **3D:** 3 Dimensiones.
- **AA:** Aminoácidos.
- **AGCC:** Ácidos Grasos de Cadena Corta.
- **AN:** Antinutriente.
- **AUC:** Área Bajo la Curva (*Area Under the Curve*).
- **CG:** Carga Glucémica.
- **D:** Digestibilidad.
- **DA:** Digestibilidad Aparente.
- **DG:** Digestión Gástrica.
- **DGI:** Digestión Gastrointestinal.
- **DP:** Digestibilidad Proteica.
- **DS:** Digestibilidad del Almidón (*Starch*).
- **DV:** Digestibilidad Verdadera.
- **E-BWP:** Proteína de Trigo Sarraceno preparada por acción Enzimática (*Enzymatic-Buckwheat Protein*).
- **I-BWP:** Proteína de Trigo Sarraceno preparada por precipitación Isoeléctrica (*Isoelectric-Buckwheat Protein*).
- **IG:** Índice Glucémico.
- **IGF-1:** Factor de Crecimiento Insulínico tipo 1 (*Insulin-like Growth Factor 1*).
- **IMC:** Índice de Masa Corporal.
- **PDCAAS:** Puntuación de Aminoácidos Corregida por la Digestibilidad de las Proteínas (*Protein Digestibility-Corrected Amino Acid Score*).
- **PS:** Polisacáridos.
- **RDS:** Almidón rápidamente Digerible (*Rapidly Digestive Starch*).
- **RS:** Almidón Resistente (*Resistant Starch*).
- **S-BWP:** Proteína de Trigo Sarraceno preparada por extracción de Sal (*Salt-Buckwheat Protein*).
- **SDS:** Almidón de Digestión Lenta (*Slowly Digestive Starch*).
- **TTO. (S):** Tratamiento(s).

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PSEUDOCEREALES

Los vegetales constituyen la mayor parte de la dieta de los humanos proporcionando, por un lado, macronutrientes y micronutrientes y, por otro lado, una serie de compuestos bioactivos que han demostrado producir un efecto saludable en los humanos (Mena & Angelino, 2020). En los últimos años, el interés por fomentar el consumo de alimentos y productos de origen vegetal se ha incrementado en la alimentación humana. Este hecho, puede venir dado por la promoción del estado de salud y bienestar, ya que contienen fitoesteroles, polifenoles, saponinas, fagopiritoles y minerales esenciales (Siwatch & Yadav, 2017), así como motivos económicos, medioambientales y/o de sostenibilidad debido a que, para su cultivo se requieren menores cuidados o prácticas agrícolas menos agresivas. Uno de los grupos de alimentos de origen vegetal con mayor auge son los pseudocereales, granos que han sido esenciales en la alimentación humana desde hace siglos y, que son considerados alimentos que benefician la salud debido a su alto valor nutritivo, porque, además, de contener los compuestos anteriormente mencionados, sus proteínas contienen todos los aminoácidos esenciales. Por todo ello, se estima que serán uno de los alimentos más prometedores del futuro (Aguilar et al., 2015).

1.1.1. DEFINICIÓN Y TIPOS

Los **pseudocereales** son plantas dicotiledóneas de hojas anchas no pertenecientes a la familia de las gramíneas (*Poaceae*). Producen semillas, también, denominados granos, parecidos a los cereales y, su uso y composición nutricional guardan grandes similitudes, por ejemplo, las semillas pueden ser molidas para producir harina y otros alimentos (García-Villanova Ruiz & Guerra Hernández, 2017). La palabra *pseudocereal*, está compuesta por el prefijo *-(p)seudo* y la palabra *cereal*. Este prefijo, es de origen griego (*ψεῦδο*) y significa “falso” según la Real Academia Española. Por lo tanto, este prefijo se utiliza para referirse a algo **que parece ser**, pero **no lo es**, es decir, denota que algo es falso o de imitación. Por ello, también, se denominan falsos cereales, a los pseudocereales y cereales verdaderos a los cereales como el trigo, la cebada y el arroz. Según, (García-Villanova Ruiz & Guerra Hernández, 2017) los pseudocereales son grupo de plantas heterogéneo que abarcan una amplia diversidad de especies, entre las que destacan: la quinoa, amaranto (o también denominado alforfón), trigo sarraceno, cañihua, chia, acacia, celosia y thypa. Sin embargo, el presente trabajo se centra única y exclusivamente en el análisis de los pseudocereales que son comúnmente más accesibles para la mayoría de las personas como; la quinoa, el amaranto y el trigo sarraceno.

1.1.2. IMPORTANCIA DE LA PRODUCCIÓN Y CONSUMO; PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS

Inicialmente, la producción de estos 3 pseudocereales era solo importante a nivel local en los países de desarrollo, pero su consumo se ha ido extendiendo hasta el resto de occidente, siendo tal su importancia que poco a poco se han ido añadiendo en los patrones alimentarios y son hoy en día, son alimentos que forman parte de nuestro consumo diario (Sánchez - Velázquez et al., 2022).

La **quinoa** (*Chenopodium quinoa*), es un producto básico en la alimentación de la región Andina en América del Sur, que ha recibido gran atención en los últimos años como un importante pseudocereal en la alimentación humana. La planta de este pseudocereal pertenece a la familia *Chenopodiaceae*, subfamilia *Chenopodioideae* y se encuentra en el orden *Caryophyllales* (Peng et al., 2022). Existen más de 6.000 variedades y sus semillas pueden ser de diferentes colores, según la variedad, de las cuales las más comerciales son la quinoa blanca, negra, amarilla y roja (Zeyneb et al., 2021). Actualmente, es el pseudocereal que más se consume en el mundo, por ejemplo, su volumen de exportación se incrementó aproximadamente 600 veces entre el 1995-2004 (Peiretti et al., 2013; Sánchez - Velázquez et al., 2022). Si bien es cierto, que el uso este cereal, como alimento es relativamente nuevo en los países occidentales, su consumo y producción en las zonas andinas data de más de 7.000 años. Hoy en día, se cultiva principalmente en la cordillera de los Andes, siendo Bolivia y Perú, los principales países productores. Sin embargo, actualmente se cultiva en once países de todo el mundo (FAO, 2024c). La producción mundial de este pseudocereal alcanzó 159.000 toneladas en el año 2022 (FAO, 2024b). Otro aspecto importante, desde el punto de vista del medio ambiente, es que el cultivo de esta planta no tiene grandes exigencias agrícolas, crece bien en tierras frías y secas donde las precipitaciones anuales son bastante escasas. Además, tiene un buen rendimiento y en comparación con otros cereales importados, por ello tiene gran importancia económica tanto en el mercado local como en el del resto del mundo (Ruales et al., 2002).

El **amaranto** es una planta dicotiledónea que pertenece a la familia *Amaranthaceae*, al género *Amaranthus*, que, agrupa a más de 70 especies con una amplia variedad genética (Matías Luis et al., 2018). Este grupo de plantas está compuesto tanto por especies domesticadas como silvestres, se cultiva en diversas regiones del mundo y se consumen tanto las hojas como las semillas, pero también, se puede usar como planta ornamental (Aguilar et al., 2015; FAO, 2024a). El amaranto fue uno de los alimentos básicos en las civilizaciones mesoamericanas y, era usado en las ceremonias religiosas como una representación de los dioses Huitzilopochtli y Tlaloc, por esta razón, los españoles prohibieron su uso y cultivo hasta, que prácticamente desapareció (Sánchez - Velázquez et al., 2022). Actualmente, las semillas se usan en México principalmente, para elaborar un dulce denominado "alegría", pero su consumo se está retomando para elaborar harinas, batidos con la semilla entera, postres, budines, bebidas refrescantes y otros alimentos dulces. Las hojas de la planta se usan como verduras, especialmente, como guarnición en diversos países de África, el Caribe, India y China (FAO, 2024a). El amaranto se cultiva en todo mundo, aunque los principales países productores China, India, Kenia, México, Nepal, Perú, Estados Unidos, Bolivia, Pakistán, Nepal, Argentina y Rusia. El cultivo es anual y se produce muy eficazmente, ya que presenta un crecimiento muy rápido, puede cultivarse hasta 3.300 m sobre el nivel del mar y es altamente resistente a condiciones climáticas adversas, como lo son las sequías, los climas muy cálidos y el ataque por diversas plagas. Además, puede crecer en suelos ácidos, salinos e incluso alcalinos. La planta se puede aprovechar totalmente, tanto las hojas como verduras, las semillas, como harina como consumidas como semilla entera, siendo un gran aporte nutricional para dieta humana (Aguilar et al., 2015; Olawoye & Gbadamosi, 2017).

El **trigo sarraceno** pertenece a la familia *Polygonaceae*, es una especie herbácea, pero no es considerada como una hierba y, tampoco es considerada como un verdadero cereal,

debido a esto, se incluye en los pseudocereales (Lee et al., 2013). Esta semilla, es originaria de Asia, posteriormente, se introdujo en Europa y, en la actualidad se produce y consume en todo el mundo. Las especies más utilizadas son *Fagopyrum esculentum* y *Fagopyrum tataricum*, conocidas como trigo sarraceno común y trigo sarraceno de Tartaria. Estas especies han sido cultivadas desde hace siglos y se consumen, tanto las semillas enteras como su harina, en forma de panqueques, panes, sobas o pastas (D'Amico et al., 2017). La producción mundial de este pseudocereal ascendió a 2, 235.194.94 toneladas en el año 2022. Los principales países productores son; Federación Rusa, China, Ucrania, Kazajistán y Estados Unidos de América (FAO, 2024b). La semilla de este pseudocereal se puede consumir, cruda, germinada, pero sin duda su principal uso en la alimentación humana es como harina y, esta, se utiliza para elaborar diversos alimentos.

1.2. VALOR NUTRICIONAL

Los pseudocereales son considerados como alimentos con un alto valor nutricional debido a que son una fuente importante de proteínas (entre 13 y 14 %), hidratos de carbono, principalmente almidón (entre 57 y 61 %), materia grasa (entre 3 y 7 %), fibra (entre 7 y 10 %), minerales y fitoquímicos (ver Tabla 1 y Figura 1). Las proteínas de estas semillas poseen un alto valor nutritivo, ya que contienen todos los aminoácidos esenciales y estos tienen, un adecuado balance en aminoácidos. El aminoácido más abundante, de estos pseudocereales es la leucina, pero, también, poseen un alto contenido en metionina y lisina en comparación con otros granos como el arroz. Además, los pseudocereales son considerados una fuente de ácidos grasos insaturados como el ácido linoleico, siendo este ácido graso el más abundante, seguido del ácido oleico. También, tienen un alto contenido en fibra, la cual está compuesta principalmente, por almidón resistente, ácido galacturónico, arabinosa, xilosas, glucosa y galactosa. Es una adecuada fuente de minerales, especialmente, hierro, magnesio y zinc, cuyo contenido es superior a los cereales y legumbres (Sánchez - Velázquez et al., 2022). Más aún, los pseudocereales tienen especial importancia por su contenido en compuestos antioxidantes como los polifenoles, las saponinas, los fagopiritoles y la rutina y por la formación de péptidos bioactivos a partir de sus proteínas. Estas propiedades nutricionales únicas y la presencia de algunos compuestos que presenta propiedades funcionales han ocasionado que se llamen superalimentos, término muy popular, que no tiene una definición legal y científica, aunque, éste está muy extendido en el marketing para promoción de alimentos que contienen altas concentraciones de vitaminas, minerales, fibras, ácidos grasos esenciales y antioxidantes y que amplía aceptación en el mercado (Vrenna et al., 2021).

1.2.1. MACRONUTRIENTES

Los macronutrientes son aquellos nutrientes que el organismo necesita en mayores cantidades y comprenden las principales fuentes de energía contenida en los alimentos. Este grupo está formado por los hidratos de carbono, grasas, proteínas, fibra dietética y agua (Cheng & England, 2024a).

El contenido de proteínas, así como, su valor nutricional en los pseudocereales es alto, comparado con los valores de proteínas de los cereales y, entre ellos, las semillas del amaranto contienen mayor cantidad de este macronutriente, entre 13,1-21,5 %, seguido de la quinoa entre 9,1-16,7 % y, entre 5,7-14,2 % para el trigo sarraceno (Martínez-Villaluenga et al., 2020; Pathan & Siddiqui, 2022). Las fracciones más abundantes en las proteínas de

los pseudocereales son las globulinas, excepto, las semillas de amaranto que contienen mayor cantidad de albúminas. El contenido globulinas y albúminas presentes en las proteínas quinoa oscila entre 27,9-60,2 % y 13,2-42,3 %, respectivamente, mientras que, en las proteínas del amaranto las albúminas representaron un 40 %, las globulinas un 20 % y, las gluteninas entre 25-30 %. La prolamina es la fracción proteica menos abundante en todos los pseudocereales y, sus valores, se encuentran en un rango de 0,5-19,3 % y 2-3 % para la quinoa y el amaranto, respectivamente, debido a esto, sus harinas son usadas para elaborar alimentos celíacos (Martínez-Villaluenga et al., 2020).

Tabla 1. Composición de los granos de quinoa, amaranto y trigo sarraceno (g/100g).

	Energía (kcal)	HCO	Almidón	Amilosa	Lípidos	Proteínas	Fibra	Agua
Quinoa	368	57.2	52.2	5.7	6.1	14.1	7.0	13.3
Amaranto	371	58.6	57.3	-	7.0	13.6	6.7	11.3
Trigo sarraceno	343	61.5	64.5	21.6	3.4	13.3	10.0	9.8

HCO: Hidratos de carbono.

Fuente: elaboración propia a partir de U.S. Department of Agriculture (2019).

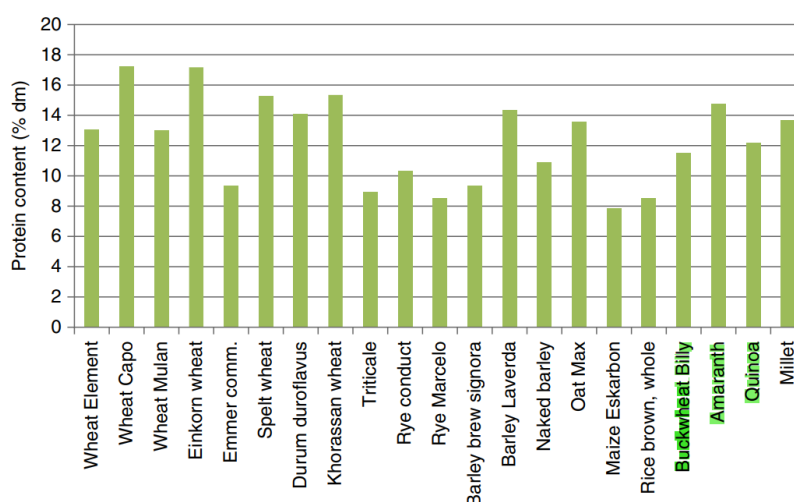


Figura 1. Contenido proteico de varios cereales y pseudocereales.

Entre los principales aspectos a considerar de las proteínas de origen vegetal encontramos su contenido en aminoácidos y su biodisponibilidad. Los pseudocereales tienen un adecuado balance de aminoácidos, como ya se mencionó anteriormente, a diferencia de los cereales, estos muestran altos contenidos en lisina, metionina y cisteína en comparación con los cereales que presentan una deficiencia en lisina y también, aunque menos importante, una deficiencia secundaria en treonina y triptófano (Motta et al., 2019). Además, cabe destacar la presencia de ácido glutámico, aspártico y arginina en la quinoa, este último aminoácido, es considerado semi-esencial para algunos grupos de personas. Las proteínas del amaranto contienen metionina, lisina y arginina y en el trigo sarraceno, la lisina y la arginina. Los aminoácidos limitantes en la quinoa son: la tirosina y la treonina; en el amaranto leucina, isoleucina y valina y en el trigo sarraceno, metionina y treonina. El valor biológico de las proteínas de estos pseudocereales es mayor a un 90% para el trigo sarraceno, entre un 71-

82% para la quinoa, y entre un 44-64 % para el amaranto. Como era de esperar el contenido proteico en el embrión para el amaranto y el trigo sarraceno es elevado (65 % y 56 %, respectivamente), mientras que el de la quinoa es pequeño (23.5 %).

La calidad de la proteína no solamente debería de ser evaluada por su contenido de aminoácidos, sino también, por la digestibilidad y la absorción de los compuestos derivados de las hidrólisis enzimáticas llevada a cabo en el tracto intestinal humano (Joye, 2019). Para conocer esta propiedad se utiliza la puntuación de aminoácidos corregida por la digestibilidad de las proteínas (con sus siglas en inglés PDCAAS) y la puntuación digestible de los aminoácidos esenciales (con sus siglas en inglés DIAAS), este último parámetro es evaluado en vivo y, determina los valores de la digestibilidad en el íleon que es usado para la caracterización de la calidad de las proteínas en diferentes alimentos en adultos. El PDCAAS de las diferentes especies de amaranto oscilan entre 23,7-36,2 %, lo que sugiere que este pseudocereal puede ser una fuente complementaria adecuada de proteínas (Aguilar et al., 2015). Los valores DIAAS fueron para el *Fagopyrum esculentum* y *Fagopyrum tataricum* de 68 % y 47 % frente a la avena 43 %, el trigo 20 %, el arroz 42 %, esto indica que, este pseudocereal, es mejor fuente proteica para el consumo humano que otros cereales (Martínez-Villaluenga et al., 2020).

Los hidratos de carbono son los componentes más abundantes en los granos de los pseudocereales, su contenido oscila entre 60 y un 80 % del extracto seco de la semilla. El almidón es el principal hidrato de carbono y, su contenido depende del tipo de pseudocereal y variedad, los valores oscilan en un rango sobre el extracto seco de 58,1-64,2 %, 65-75% y 54,5-54,4% para la quinoa, el amaranto y el trigo sarraceno, respectivamente. El almidón, es un polisacárido compuesto por moléculas de amilosa y amilopectina y su contenido, también, difiere según el tipo de pseudocereal y variedad, así, por ejemplo, teniendo en cuenta el total del almidón, el contenido de amilosa es relativamente más alto, en el trigo sarraceno 18,3-47 %, comparado con la quinoa (11-12 %) y el amaranto (7,8-34,3 %) (Repo-Carrasco-Valencia & Arana, 2017). El contenido de amilopectina difiere significativamente entre las variedades, la variedad negra contiene un 81,1 %, mientras que, la variedad roja 84,2 % (Peng et al., 2022).

De acuerdo con el índice y grado de digestión *in vitro* los almidones se clasifican en tres; i) almidón rápidamente digerible (RDS), porción de almidón digerido en los primeros 20 min de incubación ii) almidón lentamente digerible (SDS), porción de almidón digerido entre 20 y 120 min de incubación y iii) almidón resistente (RS), parte del almidón que no puede ser digerido. Este último, no puede absorberse en el intestino delgado y llega al colón, donde es fermentado lentamente por los microorganismos que producen ácidos grasos de cadena corta, que facilitan beneficios saludables al hospedador (Lehmann & Robin, 2007). La Agencia Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) indica que los alimentos ricos en almidón deberían contener al menos un 14 % de almidón resistente (EFSA, 2011) para mejorar la salud de las personas. Entre los pseudocereales las dos variedades el trigo sarraceno tienen altos contenido en almidón resistente entre un 27-33.5 %. El alto contenido de almidón resistente en este pseudocereal podría regular los niveles de glucosa y lípidos en sangre, la microbiota intestinal y reducir la obesidad (Zhou et al., 2019).

Los lípidos tienen funciones importantes en el organismo humano como el almacenamiento de energía y una función estructural, forman parte de las células. El contenido de lípidos en los pseudocereales es superior comparado con los cereales. En la quinoa, los valores oscilan entre 4,0-7,6 %, en el amaranto 5,6-10 % y en el trigo sarraceno entre 0,75 y 7,4 % (Joshi et

al., 2018; Martínez-Villaluenga et al., 2020). Los ácidos grasos, poliinsaturados son los predominantes en estos alimentos, el contenido de estos ácidos grasos, tomando en consideración el total de lípidos es de 71-84,5 %, 61-87,3 % y 80,1-80,9 % para la quinoa, el amaranto y el trigo sarraceno, respectivamente. El ácido linoleico (C18:2, ω -6) y el ácido α -linolénico (C18:3, ω -3), representan entre el 70 y 80 % del total de los ácidos grasos presente en la quinoa y en el amaranto, mientras que, el ácido oleico (18:1) es más abundante en el trigo sarraceno (Pachari Vera et al., 2019; Shuka et al., 2018; Tang et al., 2016). Los ácidos grasos saturados representan entre 15,5-29.0, 20,1-30,9 y 18,8-19,5 % de total de lípidos en la quinoa, el amaranto y el trigo sarraceno, respetivamente, siendo el ácido palmítico el más abundante en todos los pseudocereales. La ratio ω -6/ ω 3 ha sido reconocido por ser uno del criterio más importante de la calidad nutricional de la fracción lipídica. En este sentido, la quinoa es el pseudocereal que tiene la mejor calidad nutricional de la fracción lipídica con un de ω -6/ ω -3 ratio: 4.7-19.6 (Paucar-Menacho et al., 2018).

1.2.2. MICRONUTRIENTES

Los principales minerales en los pseudocereales son potasio, fósforo y magnesio (ver Tabla 2). El amaranto contiene altas cantidades de calcio, pero también importantes cantidades de selenio, combinado con la cisteína forman en el centro activo del sistema glutatión peroxidasa, uno de los sistemas antioxidantes del cuerpo humano (Cheng & England, 2024b).

Tabla 2. Contenido en minerales de los granos de quinoa, amaranto y trigo sarraceno (mg/100g de grano).

	Quinoa	Amaranto	Trigo sarraceno
Calcio	47	159	18
Hierro	4.57	7.6	2.2
Magnesio	197	248	231
Fósforo	457	557	347
Potasio	563	508	460
Sodio	5	4	1
Cinc	3.1	2.9	2.4
Cobre	0.6	0.5	1.1
Manganeso	2.0	3.3	1.3
Selenio (pg/100g)	8.5	18.7	8.3

Fuente: elaboración propia con datos tomados de U.S. Department of Agriculture (2019).

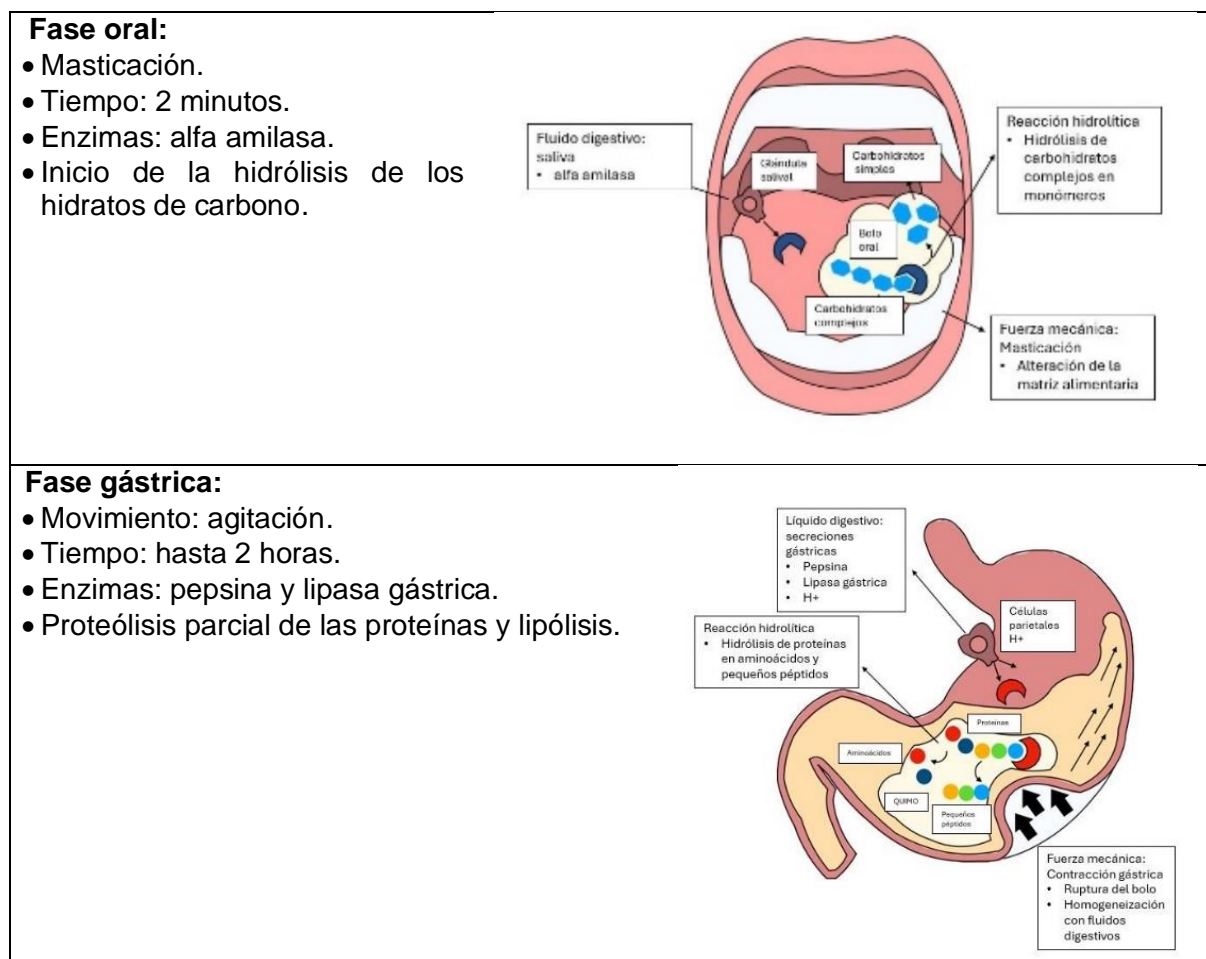
El contenido de vitaminas del grupo B en los pseudocereales es alto, por ejemplo, la quinoa, contiene altos niveles de B6 y B9, incluso, puede cubrir las necesidades de niños y adultos, y, podría contribuir al 80% de las necesidades diarias en niños de B2 (U.S. Department of Agriculture, 2019).). El trigo sarraceno es una buena fuente de vitamina B2 y B3 mientras que el amaranto muestra altas concentraciones de vitamina B6. Finalmente, la quinoa contiene mayor cantidad de vitamina E, seguida del amaranto y del trigo sarraceno, por ejemplo, el contenido en tocoferoles en la quinoa se encuentra entre 37,5 y 77,7 mg/kg (Martínez-Villaluenga et al., 2020).

1.3. ESTUDIOS DE DIGESTIBILIDAD

La digestión en el sistema humano es una compleja combinación de procesos fisicoquímicos que controlan la ingesta de alimentos, la desintegración de estos alimentos en moléculas más

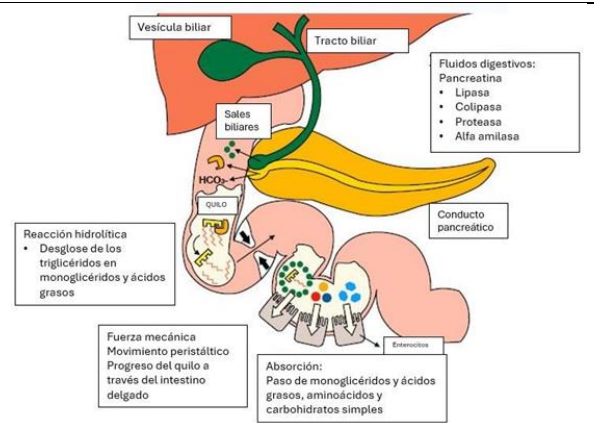
simples y digeribles y la absorción de las unidades básicas en el intestino (Brodkorb et al., 2019; Sensoy, 2021).

El estudio del proceso digestivo en humanos es complejo y requiere de aspectos éticos o económicos muy difíciles de cumplir rigurosamente (por ejemplo, puede requerirse la retirada de líquidos intestinales del estómago y el intestino). Por ello se han diseñado modelos de digestión in vitro o de laboratorio, que permiten estudiar los procesos bioquímicos sin necesidad de procedimientos difíciles y costosos. Actualmente, las investigaciones sobre digestibilidad de alimentos utilizan dos tipos de modelos: el modelo estático y el modelo dinámico. Ambos modelos tienen como objetivo simular las condiciones fisiológicas del tracto intestinal superior, es decir, la fase oral, la fase gástrica y del intestino delgado. Para ello, se utilizan enzimas digestivas que tienen una función concreta en cada fase (Brodkorb et al., 2019). A continuación, se resumen muy brevemente las tres fases del proceso digestivo y sus principales características:



Fase intestinal:

- Enzimas: jugo pancreático, sales biliares, amilasas, lipasas, proteasas.
- Tiempo: 2 horas.
- Movimientos peristálticos.
- Hidrólisis completa de los hidratos de carbono. Continuación hidrólisis proteica y lipídica.
- Absorción de nutrientes.



Elaboración propia.

1.3.1. MODELO ESTÁTICO

Los modelos estáticos utilizan una proporción de alimento, enzimas y electrolitos constantes y se realiza a un mismo pH (también constante) para cada una de las fases digestivas. Este modelo se ha utilizado muchos años para analizar piensos, alimentos y productos farmacéuticos.

La digestión *in vitro* estática, se considera el método más simple para llevar a cabo este tipo de estudios y presentan claras debilidades, pero a pesar de ello, cuentan con ventajas obvias frente a los modelos dinámicos (Brodkorb et al., 2019):

- Buena reproductibilidad tanto intra como Inter-laboratorio.
- Simplicidad.
- Robustez (validez).
- Coste relativamente bajo.
- Fácil evaluación de cada fase de digestión.

Por el contrario, este modelo presenta un gran inconveniente, no puede simular las fuerzas mecánicas y las condiciones dinámicas que sufren los alimentos en el proceso de digestión; un ejemplo de ello, podría ser el peristaltismo. Debido a esto, el modelo estático no reproduce al 100% las condiciones que se dan en el organismo durante la digestión de los alimentos y, por tanto, no se puede predecir con exactitud los nutrientes accesibles de la muestra analizada (Brodkorb et al., 2019; Sensoy, 2021). Todo esto, ha propiciado el desarrollo del modelo dinámico.

1.3.2. MODELO DINÁMICO

El modelo dinámico, se ha utilizado con éxito en muchas ocasiones para simular la digestión en alimentos y productos farmacéuticos de diferentes poblaciones y objetivos. Sin embargo, la utilización de este modelo aumenta la complejidad los experimentos, al igual que su coste en manejo y mantenimiento, todo ello, hace que no se encuentren disponibles para la mayoría de los investigadores.

2. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

Es necesario estudiar la digestión de los alimentos que forman parte de la dieta con el fin de comprender las respuestas fisiológicas que causan en el organismo, así como, su aporte nutricional. Sólo así es posible relacionar la importancia de su inclusión en los patrones alimentarios con el mantenimiento y promoción de la salud. Dada la relevancia y presencia creciente que los pseudocereales quinoa, amaranto y trigo sarraceno están adquiriendo en nuestra dieta, el presente trabajo surge para dar respuesta a la necesidad de conocer la digestibilidad de estos tres alimentos y cómo el procesado influye sobre ella.

3. OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo de fin de grado (TFG) fue elaborar una revisión bibliográfica sistemática acerca de los conocimientos o evidencias científicas existentes hasta el momento, sobre los efectos del procesado y la digestión en el valor nutricional de 3 pseudocereales: quinoa, amaranto y trigo sarraceno.

Los objetivos secundarios fueron:

- Evaluar la digestibilidad tanto del almidón como de las proteínas presentes en la quinoa, el amaranto y el trigo sarraceno.
- Evaluar la digestibilidad del almidón, proteínas y otros componentes cuando se aplican diferentes tratamientos tecnológicos a los pseudocereales.

4. MATERIAL Y MÉTODOS

En el presente trabajo se llevó a cabo una revisión bibliográfica que incluye estudios de ensayos científicos de digestión in vitro e in vivo para investigar los efectos de las etapas de digestión sobre el valor nutricional de la quinoa, el amaranto y el trigo sarraceno. Para ello, se estudiaron los artículos, se resumieron y discutieron los resultados obtenidos de los estudios de seleccionados para dar respuesta a la pregunta de interés planteada.

4.1. DEFINICIÓN DE LA PREGUNTA DE INTERÉS

En este estudio se empleó la estructura PICO (Tabla 3) para realizar la pregunta de interés. La pregunta de investigación planteada fue:

¿Existe evidencia científica suficiente acerca del conocimiento de los efectos del procesado y la digestión sobre el valor nutricional de los pseudocereales?

Tabla 3. Estructura PICO de la revisión sistemática.

Problema	Digestión de los macronutrientes y micronutrientes de los pseudocereales.
Intervención	Tipos de modelos de digestión y tratamiento tecnológicos que mejoren la digestibilidad.
Comparación	Pseudocereales usados en los modelos de digestión.
Resultados	Beneficios en la nutrición humana.

Fuente: Elaboración propia.

4.2. LOCALIZACIÓN Y SELECCIÓN DE LOS ESTUDIOS

Para localizar estudios con una buena base científica, se escogieron las siguientes bases de datos:

- Pubmed.
- Scopus.

La búsqueda se realizó inicialmente utilizando las palabras clave definidas en el próximo apartado, para focalizar los artículos que tuvieran mayor relevancia en el tema. Posteriormente, los resultados emergentes de esa búsqueda pasaron por una serie de filtros para descartar aquellos que no cumplieran con los siguientes requisitos:

- Año de publicación del estudio: 1990-2024.
- Artículo.
- Idioma del estudio: inglés y/o castellano.

Una vez seleccionados los resultados de esa búsqueda, los artículos se descargaron en el gestor bibliográfico de Mendeley, donde se ordenaron anualmente u orden alfabético de los autores (según preferencias).

Para la selección de los ensayos, se elaboró un documento de Excel con el fin de realizar una clasificación inicial. En primer lugar, se leyeron los títulos y resúmenes para descartar aquellos que no incluían la pregunta de interés y posteriormente se seleccionaron los artículos definitivos en base a los criterios de inclusión y exclusión definidos.

4.3. PALABRAS CLAVE

En esta revisión se utilizaron los descriptores “MESH” para realizar la búsqueda en las bases de datos utilizadas. Se emplearon un total de 5 descriptores ordenados de la siguiente manera:

Descriptores “MESH” comunes para los 3 pseudocereales:

- “Digestibility”.
- “Human”.

Descriptores “MESH” utilizados para cada pseudocereal:

- Quinoa: “Quinoa”.
- Amaranto: “Amaranth”.
- Trigo sarraceno: “Buckwheat”.

El conector utilizado para unir la búsqueda de los tres términos fue “AND”. Todas ellas fueron buscadas en inglés, ya que este es el idioma predominante de las bases de datos científicas.

4.4. CRITERIOS DE INCLUSIÓN DE LOS ESTUDIOS

En la presente revisión sistemática, se incluyeron solo los artículos que comprendían los siguientes criterios de inclusión:

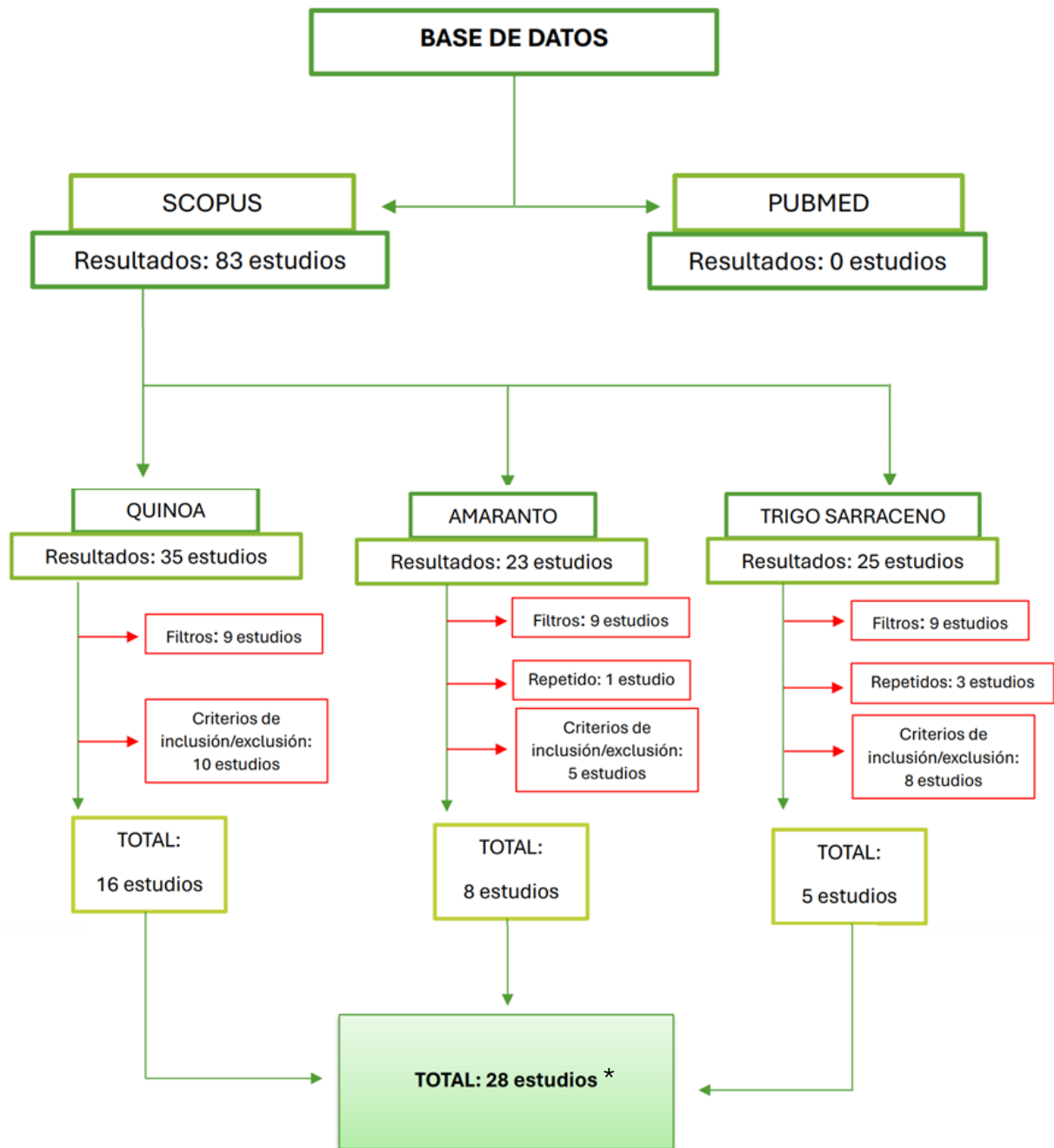
- Límite temporal: 1990-2024.
- Tipo de estudio: Artículo/ensayo.
- Idioma del estudio: inglés y/o castellano.
- Modelo del estudio: *in vivo* o *in vitro*.
- Especie: humanos y/o ratas.
- Términos y valores de digestibilidad.

4.5. CRITERIOS DE EXCLUSIÓN DE LOS ESTUDIOS

Los criterios de exclusión utilizados en esta revisión fueron los siguientes:

- Revisiones sistemáticas y/o estudios observacionales.
- “*No full text*”. Se descartaron los artículos que no pudieran leerse completamente, ya que no podían analizarse adecuadamente para su tratamiento.
- Especie: gallinas, cerdos o perros.

La búsqueda sobre la digestión de los pseudocereales en las dos bases de datos arrojó un total de 83 artículos de los cuales, 35 fueron de quinoa, 23 amaranto y 25 de trigo sarraceno (ver Figura 2). A partir de la aplicación de los filtros, criterios de inclusión y exclusión se seleccionaron y utilizaron 28 trabajos de investigación.



*La suma total es de 29 estudios, pero realmente los utilizados son 28, ya que uno de ellos trata de la quinoa y trigo sarraceno conjuntamente.

Figura 2. Diagrama de flujo de la localización y selección de los estudios.

Fuente: elaboración propia.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de la búsqueda bibliográfica y después de la aplicación de los criterios de inclusión y exclusión se seleccionaron 28 artículos. Todos ellos se encuentran reflejados en la Tabla 4. A su vez, se clasificaron y ordenaron los artículos según el tipo de estudio, el alimento o sustrato, el modelo de digestión y tratamientos empleados.

Tipos de ensayo

Para abordar el tipo de estudios seleccionados, se clasificaron en ensayos “in vitro” e “in vivo”. La mayor parte de los estudios seleccionados en esta revisión fueron llevados a cabo “in vitro” en el laboratorio, un total de 23 estudios, de los cuales 20 fueron elaborados con un modelo de digestión estático (Abdul Hadi et al., 2024; Chen et al., 2019; Dong et al., 2021; Fu et al., 2023; L. Gu et al., 2024; Gupta & Sehgal, 1991; Han et al., 2019; Huang et al., 2024; Lee et al., 2013; Montemurro et al., 2019; Müller & Morlock, 2024; Olawoye & Gbadamosi, 2017; Peiretti et al., 2013; Peng et al., 2022; Sánchez-García et al., 2024; Serena-Romero et al., 2023; Silva et al., 2015; Taniya et al., 2020; Zeyneb et al., 2021; Zhang et al., 2022), 3 de los artículos se realizaron con muestras de ratones (Aguilar et al., 2015; Calliope et al., 2015; García-Ramón et al., 2022). Solo se encontraron 3 estudios clínicos sobre digestión en sujetos.

Además, existen otros 2 estudios en los que se utilizan ambos tipos de modelos digestión, generalmente el modelo “in vitro” para evaluar la digestibilidad del alimento utilizado e “in vivo” para estimar los cambios ocurridos en los niveles de glucosa e insulina en los sujetos (Ruales et al., 2002; Yu et al., 2022).

Alimento o sustrato utilizado

Con respecto al alimento utilizado en cada estudio, un total de 16 estudios se centraron en la quinoa (Abdul Hadi et al., 2024; Berti et al., 2004; Calliope et al., 2015; Dong et al., 2021; García-Ramón et al., 2022; L. Gu et al., 2024; Han et al., 2019; Huang et al., 2024; Montemurro et al., 2019; Peiretti et al., 2013; Peng et al., 2022; Ruales et al., 2002; Sánchez-García et al., 2024; Silva et al., 2015; Zeyneb et al., 2021; Zhang et al., 2022) y 5 en el trigo sarraceno (Chen et al., 2019; Fu et al., 2023; Lee et al., 2013; Yu et al., 2022; Zhang et al., 2022) y las variedades mayormente utilizadas en cada pseudocereal fueron *Chenopodium quinoa* Willd, *Amaranthus cruentus* L. y *Fagopyrum esculentum* Moench, respectivamente. En cuanto al sustrato, se refiere al modo en el que se ha consumido cada alimento para realizar el estudio pertinente; en el caso de la quinoa, las semillas, harina y la elaboración de panes fueron los más utilizados; el amaranto se consumió mayormente en forma de harina; y el trigo sarraceno a través de galletas y papillas.

Modelo de digestión utilizado

Por otro lado, en los estudios realizados en el laboratorio (20), todos se hicieron usando un modelo de digestión estático empleando enzimas digestivas. Para los 3 estudios realizados en ratones, se emplearon entre 12-37 roedores y dos fueron las cepas utilizadas: cepa Wistar (Aguilar et al., 2015; Calliope et al., 2015) y Holtzman (García-Ramón et al., 2022).

Tabla 4. Características de los estudios. Las flechas apuntando hacia arriba (↑) indican un aumento, mientras que las flechas hacia abajo (↓) señalan una reducción. Las flechas que apuntan en ambas direcciones (↔) indican neutralidad o la ausencia de un cambio significativo.

Autor (año)	Tipo de estudio	Alimento / sustrato	Objetivos	Modelo de digestión / Tratamiento	Principales resultados
Abdul et al. (2024)	Ensayo <i>in vitro</i>	<p>QUINOA Almidón de quinoa nativo.</p> <p>Sustrato: Almidón de quinoa modificado con AGCC.</p>	Investigar el impacto de la modificación del almidón de quinoa con AGCC sobre la digestibilidad <i>in vitro</i> .	<p>Modelo: estático.</p> <p>Tto.: modificación con AGCC.</p>	<p>AUMENTO digestibilidad almidón (DA): ↑ Contenido AGCC del 1.3-3.7 % > contenido AGCC del 4.8 %. ↑ Digestibilidad lenta (SDS) > almidón resistente (RS).</p>
Aguilar et al. (2015)	Ensayo <i>in vitro</i> controlado no aleatorizado	<p>AMARANTO Variedades nuevas: - <i>Amaranthus cruentus</i> var. <i>Candil</i> (CC). - <i>Amaranthus hypochondriacus</i> var. <i>Dorado</i> (HD).</p> <p>Variedades avanzadas: - <i>Amaranthus hypochondriacus</i> x <i>Amaranthus cruentus</i> H17a (H17). - <i>Amaranthus cruentus</i> G6/17a (CG6).</p> <p>Sustrato: harinas de las 4 variedades de amaranto.</p>	Evaluar la digestibilidad proteica de las semillas de 4 variedades diferentes de amaranto para comprobar su aporte nutricional a la dieta humana.	<p>Muestra: 36 ratas Wistar (Edad: 30 días, peso: 30-40g).</p> <p>Ttos.: molienda y tamizado.</p>	<p>AUMENTO digestibilidad proteica verdadera: ↑ CC (75.4 %) > CG6 (71.8 %) > HD (70.5 %) > H17 (68.8 %).</p> <p>PDCAAS (índice evaluación calidad proteica = digestibilidad proteica verdadera + utilización neta proteínas + valor biológico): ↑ Caseína (100 %) > CC (36.2 %) > HD (31.7 %) > H17 (26.1 %) > CG6 (23.7 %).</p>

Autor (año)	Tipo de estudio	Alimento / sustrato	Objetivos	Modelo de digestión / Tratamiento	Principales resultados
Berti et al. (2004)	Ensayo clínico controlado	<p>QUINOA (<i>Chenopodium quinoa</i>)</p> <p>Sustrato: Panes y pastas con y sin gluten.</p>	<p>Evaluar las propiedades nutricionales de los carbohidratos de productos sin gluten y medir la accesibilidad del almidón a la digestión.</p>	<p>Muestra: 7 mujeres sanas (Edad: 20-45 años, IMC: 18.5 kg/m²) y 6 mujeres celiacas en tto. (Edad: 20-45 años, IMC: 20.8 kg/m²).</p> <p>Ttos.: triturado y cocción.</p>	<p>AUMENTO DA: ↑ Procesamiento. ↑ AUC galletas y pan sin gluten (4468-4426) > pan con gluten (3914) > quinoa (1255) > pasta sin gluten (1133) > pasta con gluten (1018). ↑ IG: pan-pasta sin gluten (230-255) > quinoa (186). ↑ AUC de glucosa e insulina de productos sin gluten: mujeres celiacas > mujeres sanas. ↑ Respuestas glucémicas por eliminación gluten (gluten rodea el almidón, con eliminación ↑ ataque enzimático)</p>
Bressani et al. (1993)	Ensayo clínico aleatorizado cruzado	<p>AMARANTO (<i>Amaranthus cruentus</i> var. GUA-17)</p> <p>Sustrato: Puré dulce de amaranto.</p>	<p>Evaluar la calidad y digestibilidad proteica del amaranto en humanos adultos como única fuente proteica.</p>	<p>Muestra: 12 hombres (Edad media: 27.9 años, altura media: 160.7 cm, peso medio inicial: 59.1 kg). Duración del estudio: 30 días.</p> <p>Ttos.: extrusión y popping (estallar).</p>	<p>AUMENTO digestibilidad proteica aparente: ↑ Extrusión (72.8 %) > popping (70.4 %). Digestibilidad proteica verdadera: ↑ Extrusión (89.9 %) > popping (85.5 %).</p>

Autor (año)	Tipo de estudio	Alimento / sustrato	Objetivos	Modelo de digestión / Tratamiento	Principales resultados
Calliope et al. (2015)	Ensayo in vitro	<p>QUINOA</p> <p>Quinoa Real Rosada natural y escarificada</p> <p>Sustrato: semillas y hojuelas de quinoa.</p>	Desarrollar un proceso de elaboración de hojuelas cocidas de quinoa para promover su consumo, eliminar las saponinas y lograr que ese proceso no afecte a su valor nutricional.	<p>Muestra: 12 ratas cepa Wistar</p> <p>Ttos.: escarificación, lavado, cocción y laminado.</p>	<p>AUMENTO</p> <p>digestibilidad proteica (DP):</p> <p>↑ Hojuelas (89.9 %) > lavada (88.5 %) > escarificada (81.4 %).</p> <p>↓ Saponinas (anti nutrientes, AN): escarificada lavada < escarificada < natural lavada < natural.</p>
Chen et al. (2019)	Ensayo in vitro	<p>TRIGO SARRACENO (<i>Fagopyrum esculentum</i> Moench)</p> <p>Sustrato: Proteínas de trigo sarraceno enriquecidas con polifenoles.</p>	Investigar el potencial de desarrollo asistido por enzimas de proteína de trigo sarraceno enriquecida con polifenoles.	<p>Modelo: estático, gastro-pancreático.</p> <p>Ttos.: digestión y enriquecimiento con polifenoles.</p>	<p>AUMENTO</p> <p>D:</p> <p>↑ I-BWP (61.2 %) > S-BWP (49.5 %) > E-BWP (43.3 %).</p> <p>↑ Comportamiento antidigestivo E-BWP.</p>
Dong et al. (2021)	Ensayo <i>in vitro</i>	<p>QUINOA</p> <p>Sustrato: Alimento de destete de quinoa tostada o extruida.</p>	Desarrollar alimentos de fórmula prebiótica para el destete con harina de quinoa y mijo tostada o extrusionada, que sean aptas para lactantes, evaluando sus características nutricionales y de digestibilidad.	<p>Modelo: estático.</p> <p>Ttos.: tueste y extrusión.</p>	<p>AUMENTO</p> <p>DA y DP.</p> <p>↑ Extruido (74.7 %) > tostado (71.6 %) > comercial (65.7 %).</p> <p>↓ Ácido fítico y taninos (AN).</p>

Autor (año)	Tipo de estudio	Alimento / sustrato	Objetivos	Modelo de digestión / Tratamiento	Principales resultados
Fu et al. (2023)	Ensayo <i>in vitro</i>	TRIGO SARRACENO (<i>Fagopyrum esculentum</i> var. <i>largetrigon</i>) Sustrato: aislados de proteína de trigo sarraceno.	Determinar la digestibilidad y composición de aa de alimentos producidos a partir de cereales integrales o harinas y analizar el impacto de su procesado.	Modelo: estático Ttos.: molienda y cocción.	AUMENTO DP: ↑ Fase intestinal > gástrica. ↑ Harina cruda (70 %) > fideos (58.2) > granos cocidos (50 %). ↑ Molienda (rotura pared celular ↑ ataque enzimático).
García-Ramón et al. (2022)	Ensayo <i>in vitro</i>	QUINOA (harina de quinoa <i>Pasankalla</i>) Sustrato: pan libre de gluten con harina de quinoa y harina de papa.	Evaluar las características nutricionales, físicas y sensoriales de panes libres de gluten en comparación con los convencionales.	Muestra: 37 ratas macho Holtzman (Edad: 25 días). Ttos.: fermentación, horneado y partido.	AUMENTO digestibilidad aparente: ↑ Panes sin gluten > panes con gluten.
Gu et al. (2024)	Ensayo <i>in vitro</i>	QUINOA (<i>Chenopodium quinoa</i> Willd.) Sustrato: péptidos de quinoa.	Analizar el efecto de 5 proteasas comerciales sobre la digestibilidad proteica de la quinoa.	Modelo: estático. Ttos.: ultrafiltración, trituración, tamizado, evaporación, desgrasado y secado.	AUMENTO DP: ↑ Proteasa compuesta (22 %) > alcalasa (19.9 %) > papaína (10.1 %) > aromatizante (7.7 %) > proteasa neutra (4.5 %). ↑ Intestino delgado > estómago.
Guerra-Matías et al. (2005)	Ensayo clínico aleatorizado cruzado	AMARANTO (<i>Amaranthus cruentus</i> L., var <i>BRS-Alegría</i>) Sustrato: harina de amaranto.	Investigar la digestibilidad del almidón de un producto extruido de amaranto en 11 mujeres sanas.	IN VIVO 11 mujeres sanas (Edad media: 28.6 años, IMC medio: 21.2 kg/m ²). Ttos.: molienda y cocción.	AUMENTO DA: ↑ Respuesta glucémica alta (digestión rápida). ↓ Contenido de fibra. ↑ Daño y desorden celular ↑ Ataque enzimático.

Autor (año)	Tipo de estudio	Alimento / sustrato	Objetivos	Modelo de digestión / Tratamiento	Principales resultados
Gupta et al. (1991)	Ensayo <i>in vitro</i>	AMARANTO (<i>Amaranthus</i> sp.) Sustrato: harina de amaranto.	Evaluar el desarrollo, aceptabilidad y valor nutricional de productos de destete.	Modelo: estático. Ttos.: tueste y triturado.	<p>AUMENTO DP: ↑ 80.2-84.4 %. ↑ Desnaturalización (calor) + ataque enzimático.</p> <p>DISMINUCIÓN AN: ↓ del 50 % muestra procesada > cruda.</p>
Han et al. (2019)	Ensayo <i>in vitro</i>	QUINOA (<i>Chenopodium quinoa</i> Willd) Sustrato: semillas de quinoa.	Investigar los cambios en el contenido de proteínas y saponinas y evaluar los perfiles de almidón en las semillas de quinoa durante la germinación.	Modelo: estático. Tto.: germinación.	<p>AUMENTO DA: ↑ Digestibilidad rápida (de 38 % a 53 %). ↑ Daño en la estructura celular ↑ hidrólisis enzimática.</p> <p>AUMENTO de saponinas (defensinas) ↑ del 2 % al 16 %. ↑ Defensa celular (por parte de la célula).</p>
Huang et al. (2024)	Ensayo <i>in vitro</i>	QUINOA (<i>Chenopodium quinoa</i> Willd) Sustrato: granos de quinoa blanca.	Modular la estructura del almidón, la capacidad de deglución y la digestibilidad de alimentos aptos para diabéticos e impresos en 3D para personas mayores mediante calentamiento en seco.	Modelo: estático. Ttos.: calentamiento en seco e impresión en 3D.	<p>DISMINUCIÓN D: ↓ Quinoa secada 45 minutos (62.9 %) < 30 minutos (64.2 %) < 15 minutos (67.6 %) < sin tratar (69.7 %).</p> <p>↑ Reordenamiento molecular ↓ sitios activos enzimáticos.</p>

Autor (año)	Tipo de estudio	Alimento / sustrato	Objetivos	Modelo de digestión / Tratamiento	Principales resultados
Lee et al. (2013)	Ensayo <i>in vitro</i>	TRIGO SARRACENO (<i>Fagopyrum esculentum</i> Moench) Sustrato: trigo sarraceno en polvo.	Estudiar la resistencia enzimática de la proteína de trigo sarraceno (y digestibilidad) y su potencial alergénico.	Modelo: estático. Ttos.: molienda, centrifugación, filtración y liofilización.	<p>AUMENTO DP: ↑ Pepsina (110 %) > quimiotripsina (70 %).</p> <p>Potencial alérgico de ambas enzimas ↔ debido a epítomos que lo causan.</p>
Montemurro et al. (2019)	Ensayo <i>in vitro</i>	QUINOA (<i>Chenopodium quinoa</i>) Sustrato: harina y masa madre de quinoa.	Evaluar los efectos de la germinación y fermentación de las harinas sobre los valores nutricionales y de digestibilidad.	Modelo: estático. Ttos.: germinación y fermentación (con masas madre).	<p>AUMENTO DP: ↑ Masa madre germinada de harina germinada (89.1 %) > harina germinada (75.8 %) > masa madre cruda de harina cruda (66.8 %) > harina cruda (42 %). ↑ Enzimas latentes + liberación de péptidos + ↓ AN.</p> <p>AUMENTO DA: ↑ IG: masa madre germinada con 20 % harina germinada D (75.1 %), IG (76.4) > masa madre cruda con 20 % harina cruda D (64.6 %), IG (72.2).</p>

Autor (año)	Tipo de estudio	Alimento / sustrato	Objetivos	Modelo de digestión / Tratamiento	Principales resultados
Müller et al. (2024)	Ensayo <i>in vitro</i>	AMARANTO (<i>Amaranthus</i>) Sustrato: harina de amaranto.	Evaluar la liberación de sacáridos (glucosa, maltosa y maltotriosa) de varias harinas tratadas hidrotermalmente y su digestibilidad, utilizando enzimas tanto humanas como porcinas.	Modelo: estático. Ttos.: hidrotermal (cocción y horneado).	<p>AUMENTO</p> <p>D de los sacáridos: ↑ Pancreática > oral. ↑ Liberación sacáridos: harinas refinadas > amaranto (grano entero). ↓ Sitios acción enzimático para granos enteros.</p>
Olawoye et al. (2017)	Ensayo <i>in vitro</i>	AMARANTO (<i>Amaranthus viridis</i>) Sustrato: harina de amaranto.	Investigar los efectos que ocurren en la composición, propiedades y digestibilidad <i>in vitro</i> de las semillas de amaranto durante el procesado.	Modelo: estático. Ttos.: germinación, fermentación, desgrasado y procesamiento térmico (autoclave y escaldado).	<p>AUMENTO</p> <p>DP: ↑ Germinación (65.2 %) > fermentación (63.1 %) > autoclave (57.7 %) > escaldado (53.7 %) > desgrasado (42.5 %) > harina integral de amaranto (35.8 %) ↑ Cambios estructurales + calor (hidrólisis por pepsina)</p> <p>REDUCCIÓN</p> <p>AN ↓ Taninos, oxalatos y saponinas. ↑ Degradación (termolábiles).</p>

Autor (año)	Tipo de estudio	Alimento / sustrato	Objetivos	Modelo de digestión / Tratamiento	Principales resultados
Peiretti et al. (2013)	Ensayo <i>in vitro</i>	QUINOA (<i>Chenopodium quinoa</i> Willd) Sustrato: semillas de quinoa en crecimiento.	Estudiar la composición y digestibilidad de las semillas y planta de quinoa durante el crecimiento.	Modelo: estático Tto.: Crecimiento de la semilla de quinoa.	DISMINUCION D: ↓ Materia seca (0.99->0.71 %). ↓ Fibra detergente neutra (0.88->0.43 %). ↓ Digestión PS (cambios en pared celular creando barrera).
Peng et al. (2022)	Ensayo <i>in vitro</i>	QUINOA (<i>Chenopodium quinoa</i>) Sustrato: extractos de almidón de quinoa blanca, amarilla, roja y negra.	Comparar las propiedades del almidón y la digestibilidad de 4 quinoas de diferentes colores.	Modelo: estático. Ttos.: molienda y digestibilidad.	AUMENTO DA: ↑ AUC: Quinoa negra (10416.6) < blanca (10641.4) < roja (12441.4) < amarilla (12891.0). ↑ RDS: amarilla > negra (SDS, RS). ↑ IG: amarilla > negra.
Ruales et al. (2002)	Ensayo <i>in vitro</i> y clínico controlado no aleatorizado.	QUINOA (<i>Chenopodium quinoa</i> Willd) Sustrato: harina de quinoa.	Evaluar los efectos del procesado de las semillas de quinoa en la digestibilidad proteica.	Muestra: -Ratas Sprague-Dawley -40 niños (50-65 meses). Ttos.: lavado, secado, cocción y molienda.	AUMENTO DP ↑ Harina con tratamiento térmico (95.3 %) > cruda (91.6 %). ↑ Desnaturalización + susceptibilidad hidrólisis enzimática (calor). ↑ IGF-1 en sangre (con buena fuente proteica).

Autor (año)	Tipo de estudio	Alimento / sustrato	Objetivos	Modelo de digestión / Tratamiento	Principales resultados
Sánchez-García et al. (2024)	Ensayo <i>in vitro</i>	<p>QUINOA (<i>Chenopodium quinoa Willd</i>)</p> <p>Sustrato: harina de semillas de quinoa negra y blanca.</p>	Determinar el efecto de la fermentación en estado sólido y el posterior secado de la harina de quinoa sobre la digestibilidad y funcionalidad de las proteínas.	<p>Modelo: estático.</p> <p>Ttos.: fermentación en estado sólido y secado por aire caliente a 70°C.</p>	<p>AUMENTO DP: ↑ Fermentado + secado ↑ Hidrólisis</p> <p>DISMINUCIÓN digestibilidad proteica vegetal: ↓ Adultos mayores ↑ Tiempos de digestión</p>
Serena-Romero et al. (2023)	Ensayo <i>in vitro</i>	<p>AMARANTO (<i>Amaranthus cruentus L.</i>)</p> <p>Sustrato: harina de amaranto.</p>	Evaluar el impacto de la digestión gastrointestinal <i>in vitro</i> sobre la digestibilidad de las proteínas de amaranto.	<p>Modelo: estático.</p> <p>Ttos.: digestión gastrointestinal junto con enzimas.</p>	<p>AUMENTO DP: ↑ Digestión gastrointestinal (79.2 %) > gástrica (66.3 %). ↑ Hidrólisis con pepsina + pancreatina.</p>
Silva et al. (2015)	Ensayo <i>in vitro</i>	<p>QUINOA (<i>Chenopodium quinoa Willd</i>)</p> <p>Sustrato: semillas de quinoa.</p>	Determinar la presencia de factores anti nutricionales de las semillas de quinoa y la importancia del tratamiento de calor en la digestibilidad <i>in vitro</i> .	<p>Modelo: estático</p> <p>Tto.: térmico (calor).</p>	<p>AUMENTO DP: ↑ Pepsina ↑ Desnaturalización (calor).</p>
Taniya et al. (2020)	Ensayo <i>in vitro</i>	<p>AMARANTO (<i>Amaranthus caudatus L.</i>)</p> <p>Sustrato: hidrolizados de proteína de semillas de amaranto.</p>	Investigar la digestibilidad de las proteínas de las semillas de amaranto.	<p>Modelo: estático.</p> <p>Ttos.: desnaturalización por calor + digestión simulada.</p>	<p>AUMENTO DP: ↑ Desnaturalización por calor + digestión simulada > solo digestión simulada. ↑ Desnaturalización + liberación aa (calor).</p>

Autor (año)	Tipo de estudio	Alimento / sustrato	Objetivos	Modelo de digestión / Tratamiento	Principales resultados
Yu et al. (2022)	Ensayo <i>in vitro</i> y clínico controlado	TRIGO SARRACENO (<i>Fagopyrum esculentum</i> Moench) Sustrato: galletas de trigo sarraceno.	Reducir la digestibilidad del almidón de las galletas mediante la sustitución de harina de trigo por trigo sarraceno para conseguir un producto de bajo índice glucémico.	Modelo: estático. Modelo: IN VIVO 13 personas (18-60 años, IMC 18.5-27 kg/m ² y nivel normal de glucosa sérica). Tto.: horneado.	AUMENTO DA: ↑ Galletas control (-1.44 %) y sustituidas por trigo sarraceno (-1.09 %) > doble sustitución o sustituidas por dextrina resistente. ↓ IG en doble sustitución por dextrina resistente.
Zeyneb et al. (2021)	Ensayo <i>in vitro</i>	QUINOA (<i>Chenopodium quinoa</i> Willd.) Sustrato: semillas de quinoa blanca.	Someter a tratamiento térmico a la quinoa para ver los efectos en la digestibilidad y microbiota intestinal.	Modelo: estático Tto.: cocción.	AUMENTO D de polisacáridos: ↑ Quinoa cocida (69.0 %) > cruda (64.1 %). ↑ Accesibilidad de los sitios de acción de las enzimas (calor + humedad).
Zhang et al. (2022)	Ensayo <i>in vitro</i>	QUINOA (<i>Chenopodium quinoa</i> Willd.) Y TRIGO SARRACENO (<i>Fagopyrum esculentum</i> Moench.) Sustrato: papillas y harina.	Investigar la digestibilidad <i>in vitro</i> del almidón, las proteínas y la fibra dietética de la quinoa y el trigo sarraceno.	Modelo: estático. Ttos.: térmico (calor) y cocción.	AUMENTO DA: ↑ Intestinal > gástrica ↑ Papilla (98.0 %) > harina (74.5 %). ↑ CG: Papilla (81-98) > harina (53-77). ↑ Ataque enzimático con la ebullición. AUMENTO DP: ↑ Intestinal > gástrica. ↑ Papilla (44-63 %) > harina (27-49 %). ↑ Desnaturalización y liberación aa (tto. térmico).

Fuente: elaboración propia. Abreviaturas: Aa: aminoácidos; AGCC: ácidos grasos de cadena corta; AUC: área bajo la curva; CG: carga glucémica; D: digestibilidad; DA: digestibilidad del almidón; DP: digestibilidad proteica; E-BWP: proteína de trigo sarraceno preparada por acción enzimática; I-BWP: proteína de trigo sarraceno preparada por precipitación isoeléctrica; IG: índice glucémico; IGF-1: factor de crecimiento insulínico tipo 1; IMC: índice de masa corporal; Ps: polisacáridos; RDS: almidón de digestión rápida; RS: almidón resistente; S-BWP: proteína de trigo sarraceno preparada por extracción de sal; SDS: almidón de digestibilidad lenta; Sp: especie; Tto(s): tratamiento(s); Var: variedad; 3D: tres dimensiones.

Estudios clínicos

En relación con los ensayos clínicos, el número de sujetos adultos que uso en Iso estudio fuer entre 6-40 personas y, entre todos los trabajos consultados el número total de participantes fue de 89. Dos de los 5 estudios se realizaron en mujeres (Berti et al., 2004; Guerra-Matias & Arêas, 2005), uno en hombres (Bressani et al., 1993), uno en ambos de los sexos (Yu et al., 2022) y el restante en niños de unos 5 años (Ruales et al., 2002). Los sujetos tenían una edad media comprendida entre los 18-60 años, exceptuando el estudio realizado en los 40 niños de entre 50-65 meses (Ruales et al., 2002), el IMC medio de los adultos fue de 18.5-27 Kg/m². La mayoría de los sujetos utilizados eran individuos sanos; en el estudio presentado por Yu et al. (2022) se emplearon 9 hombres y 4 mujeres sanas no embarazadas y en el trabajo publicado por Berti et al. (2004) 7 mujeres sanas y 6 mujeres celiacas.

Digestibilidad de los pseudocereales

La digestibilidad media de las semillas crudas de quinoa (sin ser sometidas a ningún tratamiento) es de un 81.2 %. Se observó, sin embargo, una gran disparidad entre los dos valores de digestibilidad en los diferentes estudios. Así, los más bajos fueron del 64.1 % (Zeyneb et al., 2021) y 69.7 % (Huang et al., 2024) y los más altos, del 92 % (Peiretti et al., 2013) y 99 % (Ruales et al., 2002). Estas diferencias entre los valores de digestibilidad se pueden deber, fundamentalmente, a las distintas variedades de semillas utilizadas, correspondiendo los menores valores a variedades de semillas de quinoa blancas, que contienen menores fracciones de amilosa que las variedades de semillas negras (Bello-Pérez et al., 2020; Chi et al., 2021; Magallanes-Cruz et al., 2017).

Las diferentes variedades de amaranto también mostraron diferencias significativas en la digestión total, siendo así la harina de *Amaranthus cruentus* var. *Candil* la que tuvo los valores más elevados de digestibilidad (75.4 %) seguida de CG6 (71.8 %), HD (70.5 %) y H17 (68.8 %) (Aguilar et al., 2015).

En cuanto al trigo sarraceno, los estudios no aportaron información sobre la digestibilidad de las semillas crudas; únicamente en el estudio de Fu et al. (2023) se dan un valor de digestibilidad de los granos cocidos del 50%.

Cabe destacar que la digestibilidad fue más baja en los estudios realizados en niños y animales, que en los realizados in vitro con un modelo estático.

Tratamientos aplicados a los pseudocereales

Los tratamientos o aplicaciones realizadas en las muestras de pseudocereales fueron diversas pero, las más comunes fueron: en primer lugar y en la mayoría de los estudios, la molienda, cocción y tueste (Berti et al., 2004; Fu et al., 2023; Guerra-Matias & Arêas, 2005; Müller & Morlock, 2024; Peng et al., 2022; Ruales et al., 2002; Zeyneb et al., 2021; Zhang et al., 2022) y, en menor medida, pero en reiteradas ocasiones el horneado (Yu et al., 2022), germinación (Huang et al., 2024; Montemurro et al., 2019; Olawoye & Gbadamosi, 2017; Peiretti et al., 2013), tamizado (Aguilar et al., 2015), secado (L. Gu et al., 2024; Ruales et al., 2002) y extrusión (Bressani et al., 1993; Dong et al., 2021).

Efecto de los tratamientos sobre la digestibilidad de la materia seca

En general, como puede verse en la Tabla 4, en la mayoría de los estudios se observó un incremento significativo de la digestibilidad de los tres pseudocereales mediante la aplicación de diferentes tratamientos tecnológicos (Magallanes-Cruz et al., 2017; Sá et al., 2020).

Dos estudios se evaluaba la digestibilidad, pero sin especificar el macronutriente al que afectaba. Por ejemplo, en el estudio realizado por García-Ramón et al. (2022) se observó un mayor porcentaje de digestibilidad en los panes sin gluten frente a los panes que contenían gluten y que habían sido tratados con fermentación, horneado y molienda.

No obstante, en uno de los estudios se observó una disminución de la digestibilidad de la quinoa, logrando así el objetivo definido (Huang et al., 2024). En este estudio se utilizó un modelo de digestión estático, para disminuir la digestibilidad de los granos de quinoa blanca mediante el calentamiento en seco y, poder llevar una dieta con control glucémico en sujetos mayores diabéticos. La digestibilidad de los granos disminuía a medida que aumentaba el tiempo de su calentamiento en seco, así la digestibilidad fue de 69.7 % en la quinoa sin tratar, de 67.6-64.2 % en la quinoa secada 15-30 minutos y de 62.9 % en la secada 45 minutos. El estudio explica esta disminución argumentando que ambos procesos realizan un reordenamiento molecular en la quinoa, reduciendo así los sitios activos enzimáticos para la hidrólisis por las respectivas enzimas (Huang et al., 2024).

Efecto de los tratamientos sobre la digestibilidad del almidón

La mayoría de los tratamientos aplicados en los estudios resulta en un aumento de la digestibilidad del almidón. El tratamiento más repetido fue la cocción (Zeyneb et al., 2021; Zhang et al., 2022), que, a su vez, se combinó con otros procesos como el horneado (Müller & Morlock, 2024), la trituración (Berti et al., 2004) y la molienda (Guerra-Matias & Arêas, 2005) que ocasionaron un aumento de la digestibilidad en todos ellos. En el trabajo de Müller & Morlock (2024), se utiliza la harina de amaranto refinada frente a los granos cocidos, mientras que en el de Zhang et al. (2022) se utilizan papillas de quinoa y trigo sarraceno en contraposición con las harinas. En el primer estudio, la harina refinada tiene mayores valores de digestibilidad, mientras que en el segundo son las papillas (97.9 %) en comparación con el de las harinas (74.5 %). En ambos casos, los sustratos que mostraron mayores digestibilidades han sufrido más procesos; en el caso de la harina refinada, ha sido molida (dejando más accesibles sus sitios activos frente a las enzimas) y refinada (eliminación de la cáscara, el interior queda más expuesto al ataque enzimático) y las papillas son harinas que, adicionalmente, han sido cocidas en agua. El cocinado produce la rotura de las paredes celulares y también aumenta el desorden de los gránulos, produciendo así, el aumento del ataque enzimático que conllevará a una mayor hidrólisis del almidón (Magallanes-Cruz et al., 2017; Sá et al., 2020). En el estudio llevado a cabo por Zeyneb et al. (2021) se observó como la digestibilidad del almidón aumento de 64 % a 69 % mediante la aplicación del tratamiento de cocción. La cocción es un proceso que aúna los efectos del calor y de la humedad, los cuales favorecen una mayor accesibilidad de los enlaces de almidón a las enzimas que van a producir su hidrólisis (Magallanes-Cruz et al., 2017; Sá et al., 2020; Singh et al., 2010; Yang et al., 2023).

La germinación de las semillas de quinoa (Han et al., 2019), también dio lugar a un aumento de la digestibilidad del almidón. Así, las semillas sin germinar presentan valores de 38.5 % en almidón de digestión rápida (RDS), 43.6 % en almidón de digestión lenta (SDS) y 17.9 % en almidón resistente (RS), siendo los valores de SDS y RS mayores. Posterior a la germinación, el valor de RDS aumentó a un 53.5 %, mientras que los de SDS y RS disminuyeron a 40.2 % y 6.1 % respectivamente, lo cual se relaciona con una mayor

digestibilidad. Paralelamente, (Montemurro et al., 2019) señalaron que la germinación (unida en este caso a un proceso de fermentación, aumentó la digestibilidad del almidón de 64.6 % a 75.1 %. Estos aumentos en la digestibilidad del almidón pueden deberse a una disminución en el contenido de amilosa que presentan las semillas de quinoa conforme avanza la germinación de tal manera que a menor contenido de amilosa mayor será la digestibilidad del almidón del alimento (Chi et al., 2021; Han et al., 2019; Magallanes-Cruz et al., 2017). No obstante, en el estudio de por Peiretti et al. (2013) se produce una disminución de la digestibilidad asociada a la germinación de las semillas. Estos autores indican que la semilla experimenta cambios estructurales según avanza la maduración de la planta produciendo la formación de una barrera creada por xilema (transporte de agua), celulosa e hidratos de carbono complejos que se lignifican (la lignina sustituye el agua y se endurece) evitando así, su digestión frente al ataque enzimático. Es decir, el calentamiento en seco produjo un reordenamiento molecular formando una estructura densa cristalina en el almidón de la quinoa, reduciendo además la tasa de degradación del almidón a glucosa.

Abdul Hadi et al. (2024) consiguieron aumentar la digestibilidad lenta del almidón reduciendo así, el almidón resistente, mediante la modificación del almidón de la quinoa con AGCC en cantidades específicas (mayor digestibilidad a contenido más reducido de AGCC). Por último, también se investigó la digestibilidad en las semillas de quinoa de distintos colores, concluyendo así, que la semilla de color amarillo era la de mayor digestión, seguidas de las semillas rojas y blancas y negras, respectivamente (Peng et al., 2022).

Efecto de los tratamientos sobre la absorción de glucosa

Una de las consecuencias fisiológicas del aumento de la digestibilidad del almidón es el incremento en el índice glucémico (IG), parámetro relacionado con el incremento de la absorción de glucosa desde el intestino procedente de la digestión del almidón. Así, por ejemplo, el proceso de triturado y cocinado de las semillas de quinoa da lugar a un IG de 186 (Berti et al., 2004). De manera similar, los procesos de germinación y fermentación de panes de harina de quinoa provocan un aumento del IG desde 72.2 en masas madre crudas a 76.4 en masas madre germinadas (Montemurro et al., 2019). Aunque, en ambos estudios se utilizaron semillas de quinoa, la diferencia en los IG parece ser debida a los tratamientos utilizados. La germinación y fermentación de las semillas quinoa supone un aumento de la digestibilidad del almidón menor que el triturado y cocción de estas. La germinación de las semillas provoca la rotura de la estructura celular del almidón, permitiendo así, un mayor ataque por parte de las enzimas para su hidrólisis y digestión. En cambio, en el triturado se produce una rotura de la matriz del alimento que junto con la cocción aumentan en mayor medida la disponibilidad de dejar más accesibles los enlaces para su hidrólisis (Chi et al., 2021; Magallanes-Cruz et al., 2017).

Además, del tipo de tratamiento, también hay diferencias en el IG debido al tipo de semilla empleado. En este sentido, el estudio de (Peng et al., 2022) utiliza el mismo tratamiento (molienda) en variedades de distinto color de la quinoa. Los IG de las semillas de quinoa negra, blanca, roja y amarilla son 86, 87, 95 y 97, respectivamente. Estas ligeras diferencias pueden ser debidas a la distinta composición tanto estructural como nutricional de cada variedad. De esta forma, por una parte, a mayor contenido de amilosa presente en el almidón, menor es su digestibilidad (Guerra-Matias & Arêas, 2005; Peng et al., 2022). Por otra parte, el aumento de digestibilidad también debido a la disminución del contenido de fibra de la muestra (Guerra-Matias & Arêas, 2005). La fibra es la parte de los hidratos de carbono que

no se digiere y por lo tanto a mayor contenido de fibra mayor es el retraso en el proceso de digestión (Grundy et al., 2016; Singh et al., 2010).

Efecto de los tratamientos sobre la digestibilidad de la proteína

En general, el procesado de los pseudocereales resulta en un incremento de la digestibilidad de la proteína. La aplicación de tratamientos térmicos combinados entre sí aumentó en todos los casos la digestibilidad de los distintos pseudocereales. Así puede ser en el caso de Ruales et al. (2002) en el que los procesos de lavado, secado, cocción y molienda dieron como resultado una digestibilidad de la harina de quinoa de un 95.3 % en comparación con la cruda (91.6 %). Un resultado similar ocurrió también en el estudio realizado por Calliope et al. (2015) en el que demostraron cómo el proceso de elaboración de hojuelas de quinoa aumentaba la digestibilidad proteica siendo de un 89.9 %. Olawoye & Gbadamosi (2017) también evidenciaron ese aumento en contraste con los tratamientos de autoclave, escaldado y desgrasado, mientras que Taniya et al. (2020) utilizaron la desnaturalización por calor. Todos estos procesos (que conllevan adición de agua, presión, temperaturas elevadas y eliminación de parte de su composición nutricional) hacen que las proteínas se desnaturalicen y dejen una mayor accesibilidad de los enlaces peptídicos a las enzimas, resultando así en la digestión de proteínas en aminoácidos libres (Herreman et al., 2020; Joye, 2019).

En el estudio de Bressani et al. (1993) se compara la extrusión de los granos de amaranto con el *popping* (estallido o expansión), mientras que en el de Dong et al. (2021) se utiliza la extrusión frente al tostado de los granos de quinoa. En ambos estudios, la digestibilidad de la proteína es mayor con el proceso de extrusión, si bien diferente para cada pseudocereal (74.7 % para la quinoa y 89.9 % para el amaranto), mientras que el proceso de tostado en la quinoa resultó en una digestibilidad de 71.6% y el popping en el amaranto 85.2%. En el proceso de tostado el alimento se somete a temperaturas más bajas (137-151°C) durante un mayor tiempo (15-20 minutos) que en el caso del popping se realiza lo contrario, temperaturas de 230-240°C durante 15-20 segundos. Por otra parte, durante el proceso de extrusión, las proteínas sufren una degradación molecular por la temperatura, humedad y velocidad del tornillo del extrusor, degradándose hasta dar lugar a compuestos de menor peso molecular y mayor digestibilidad, tales como los aminoácidos (Witczak et al., 2016).

La germinación también tiene un efecto positivo sobre la digestibilidad de la proteína; así Montemurro et al. (2019) observaron un aumento en las harinas germinadas (75.8 %) en comparación con las crudas (42 %). Esto es debido a que durante este proceso las enzimas proteolíticas que están latentes en el embrión de la semilla se activan y dan lugar a una mayor hidrólisis proteica (Bessada et al., 2019; J. Gu et al., 2023; Kamiloglu et al., 2024).

El tratamiento enzimático directo ha sido evaluado en varios estudios (L. Gu et al., 2024; Lee et al., 2013; Serena-Romero et al., 2023; Silva et al., 2015; Taniya et al., 2020). Sobre la quinoa fue la proteasa compuesta (22 %) la que provocó el mayor incremento de la digestibilidad, seguida de la alcalasa, papaína, enzima aromatizante y proteasa neutra (L. Gu et al., 2024). La digestión con pepsina y quimotripsina aumentó la digestibilidad proteica de los tres pseudocereales (Lee et al., 2013; Serena-Romero et al., 2023; Silva et al., 2015). El uso de ambas enzimas simultáneamente podría aumentar aún más esta digestión dada la actividad sumada de ambas. En este sentido, Serena-Romero et al. (2023) pusieron en evidencia que el uso de pepsina y pancreatina conjuntamente aumentó significativamente la digestibilidad, reportando valores de 66.3 % cuando se utilizó pepsina y de 79.2 % cuando se empleó además pancreatina.

Interacción con otros nutrientes

Según reportó Chen et al. (2019) la digestibilidad de las proteínas trigo sarraceno aumentaba con la adición de polifenoles, resultando así el mayor contenido de digestibilidad en las muestras de trigo sarraceno precipitadas isoelectricamente (61.2 %), seguidas de las muestras de extracción salina y acción enzimática. En cuatro de los estudios (Calliope et al., 2015; Dong et al., 2021; Gupta & Sehgal, 1991; Olawoye & Gbadamosi, 2017) se concluyó que los tratamientos térmicos utilizados disminuían el contenido de AN, como las saponinas, el ácido fítico, el oxalato y los taninos. Estos compuestos son termolábiles y se degradan al aumentar la temperatura de procesado; puesto que en estos estudios se utilizan técnicas con aumento de las temperaturas (escarificado, tueste, autoclave y escaldado) todos ellos resultaron en un aumento de la digestibilidad de las proteínas asociada a la disminución del contenido de AN.

6. CONCLUSIONES

La digestibilidad de las semillas de quinoa, amaranto y trigo sarraceno fue, de media, del 81.2, 71.6 y 50 %, respectivamente.

De entre los procesos empleados, el calentamiento en seco resultó en una disminución de la digestibilidad, mientras que la germinación, la molienda, la cocción, el horneado o el tueste de las semillas dieron lugar a un incremento de la digestibilidad, tanto del almidón como de las proteínas.

El procesado de la quinoa incrementó la digestibilidad del almidón hasta el 98.0 % y de la proteína hasta el 95.3 %. El procesado del amaranto incrementó la digestibilidad del almidón hasta el 75.4 % y de la proteína hasta el 84.4 %. El procesado del trigo sarraceno incrementó la digestibilidad del almidón hasta el 76.6 % y de la proteína hasta el 70.0 %.

El incremento de la digestibilidad del almidón se tradujo en última instancia en un aumento del índice glucémico.

7. LIMITACIONES

Entre las limitaciones que se han encontrado en la elaboración del presente TFG cabría destacar, en primer lugar, la escasez de los estudios llevados a cabo con amaranto y trigo sarraceno, ya que la mayoría de ellos se centran en abordar la quinoa. En segundo lugar, la mayoría de los estudios muestran los valores de digestibilidad de los alimentos tras el procesado, siendo escasos aquellos que valoran la digestibilidad de los pseudocereales sin procesar. Por último, tanto los estudios realizados in vivo como los sujetos elegidos pueden considerarse insuficientes para que los resultados puedan ser extrapolables con garantías a la población en general y a la población geriátrica en particular.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Abdul Hadi, N., Marefati, A., Purhagen, J., & Rayner, M. (2024). Physicochemical and functional properties of short-chain fatty acid starch modified with different acyl groups and levels of modification. *International Journal of Biological Macromolecules*, 267, 131523. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131523>
- Aguilar, E. G., Albarracín, G. de J., Uñates, M. A., Piola, H. D., Camiña, J. M., & Escudero, N. L. (2015). Evaluation of the Nutritional Quality of the Grain Protein of New Amaranths Varieties. *Plant Foods for Human Nutrition*, 70(1), 21–26. <https://doi.org/10.1007/s11130-014-0456-3>
- Bello-Perez, L. A., Flores-Silva, P. C., Agama-Acevedo, E., & Tovar, J. (2020). Starch digestibility: past, present, and future. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(14), 5009–5016. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8955>
- Berti, C., Riso, P., Monti, L. D., & Porrini, M. (2004). In vitro starch digestibility and in vivo glucose response of gluten-free foods and their gluten counterparts. *European Journal of Nutrition*, 43(4), 198–204. <https://doi.org/10.1007/s00394-004-0459-1>
- Bessada, S. M. F., Barreira, J. C. M., & Oliveira, M. B. P. 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>
- Bressani, R., De Martell, E. C. M., & De Godínez, C. M. (1993). Protein quality evaluation of amaranth in adult humans. *Plant Foods for Human Nutrition*, 43(2), 123–143. <https://doi.org/10.1007/BF01087917>
- Brodkorb, A., Egger, L., Alming, M., Alvito, P., Assunção, R., Ballance, S., Bohn, T., Bourlieu-Lacanal, C., Boutrou, R., Carrière, F., Clemente, A., Corredig, M., Dupont, D., Dufour, C., Edwards, C., Golding, M., Karakaya, S., Kirkhus, B., Le Feunteun, S., ... Recio, I. (2019). INFOGEST static in vitro simulation of gastrointestinal food digestion. *Nature Protocols*, 14(4), 991–1014. <https://doi.org/10.1038/S41596-018-0119-1>
- Calliope, S. R., Lobo, M. O., & Sammán, N. C. (2015). Process of elaboration of cooked quinoa flakes | Proceso de elaboración de hojuelas cocidas de quínoa (*Chenopodium quinoa* Willd). *Archivos Latinoamericanos de Nutricion*, 65(4), 234–242. <https://www.alanrevista.org/ediciones/2015/4/art-4/>
- Chen, X., Chen, Y., Li, J., Wang, Y., & Yang, X. (2019). Enzyme-assisted development of biofunctional polyphenol-enriched buckwheat protein: physicochemical properties, *in vitro* digestibility, and antioxidant activity. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(6), 3176–3185. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9534>
- Cheng, C., & England, E. (2024a). Macronutrients - Nutrition. *FP Essentials*, 539, 7–12. <https://www.aafp.org/pubs/fpe/editions/539-nutrition/macronutrients.html>
- Cheng, C., & England, E. (2024b). Micronutrients - Nutrition. *FP Essentials*, 539, 13–17. <https://www.aafp.org/pubs/fpe/editions/539-nutrition/micronutrients.html>
- Chi, C., Li, X., Huang, S., Chen, L., Zhang, Y., Li, L., & Miao, S. (2021). Basic principles in starch multi-scale structuration to mitigate digestibility: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 109, 154–168. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.024>

- D'Amico, S., Schoenlechner, R., Tömöskösi, S., & Langó, B. (2017). Proteins and Amino Acids of Kernels. In *Pseudocereals* (pp. 94–118). Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9781118938256.ch5>
- Dong, G., Dong, J., Zhu, Y., Shen, R., & Qu, L. (2021). Development of weaning food with prebiotic effects based on roasted or extruded quinoa and millet flour. *Journal of Food Science*, 86(3), 1089–1096. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15616>
- EFSA. (2011). Scientific Opinion on the substantiation of a health claim related to “slowly digestible starch in starch-containing foods” and “reduction of post-prandial glycaemic responses” pursuant to Article 13(5) of Regulation (EC) No 1924/2006. *EFSA Journal*, 9(7). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.2292>
- FAO. (2024a). Cultivos tradicionales. Amarantho. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. <https://www.fao.org/traditional-crops/amaranth/es>
- FAO. (2024b). FAOSTAT. Food and agriculture data. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. <https://www.fao.org/faostat/en/#home>
- FAO. (2024c). Plataforma de información de la quinua. *Organización de Las Naciones Unidas Para La Alimentación y La Agricultura*. <https://www.fao.org/in-action/quinoa-platform/es/>
- Fu, L., Gao, S., & Li, B. (2023). Impact of Processing Methods on the In Vitro Protein Digestibility and DIAAS of Various Foods Produced by Millet, Highland Barley and Buckwheat. *Foods*, 12(8), 1714. <https://doi.org/10.3390/foods12081714>
- García-Ramón, F., Alvarez, H., Sotelo-Méndez, A., Gonzáles Huaman, T., Norabuena, E., Zarate Sarapura, E., & Sumarriva Bustinza, L. (2022). Nutritional quality and evaluation physic, sensory and biological of conventional and gluten-free breads | Calidad nutricional, evaluación física, sensorial y biológica en panes convencionales y libres de gluten. *Nutricion Clinica y Dietetica Hospitalaria*, 42(1), 106–114.
<https://doi.org/10.12873/421garcia>
- García-Villanova Ruiz, B., & Guerra Hernández, E. J. (2017). Cereales y productos derivados. In Á. Gil Hernández (Ed.), *Tratado de Nutrición. Tomo III. Composición y calidad nutritiva de los alimentos* (3ª ed., pp. 97–138). Editorial Médica Panamericana.
- Grundy, M. M.-L., Edwards, C. H., Mackie, A. R., Gidley, M. J., Butterworth, P. J., & Ellis, P. R. (2016). Re-evaluation of the mechanisms of dietary fibre and implications for macronutrient bioaccessibility, digestion and postprandial metabolism. *British Journal of Nutrition*, 116(5), 816–833. <https://doi.org/10.1017/S0007114516002610>
- Gu, J., Bk, A., Wu, H., Lu, P., Nawaz, M. A., Barrow, C. J., Dunshea, F. R., & Suleria, H. A. R. (2023). Impact of processing and storage on protein digestibility and bioavailability of legumes. *Food Reviews International*, 39(7), 4697–4724.
<https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2039690>
- Gu, L., Peng, N., Chen, S., McClements, D. J., Tang, Z., Li, J., Chang, C., Su, Y., & Yang, Y. (2024). Bioactive peptides derived from quinoa protein: fabrication, antioxidant activities, and in vitro digestion profiles. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 18(2), 894–903. <https://doi.org/10.1007/s11694-023-02212-z>

- Guerra-Matias, A. C., & Arêas, J. A. G. (2005). Glycemic and insulinemic responses in women consuming extruded amaranth (*Amaranthus cruentus* L). *Nutrition Research*, 25(9), 815–822. <https://doi.org/10.1016/j.nutres.2005.09.002>
- Gupta, C., & Sehgal, S. (1991). Development, acceptability and nutritional value of weaning mixtures. *Plant Foods for Human Nutrition*, 41(2), 107–116. <https://doi.org/10.1007/BF02194079>
- Han, F., Han, F., Wang, Y., Fan, L., Song, G., Chen, X., Jiang, P., Miao, H., & Han, Y. (2019). Digestible indispensable amino acid scores of nine cooked cereal grains. *British Journal of Nutrition*, 121(1), 30–41. <https://doi.org/10.1017/S0007114518003033>
- Herreman, L., Nommensen, P., Pennings, B., & Laus, M. C. (2020). Comprehensive overview of the quality of plant- And animal-sourced proteins based on the digestible indispensable amino acid score. *Food Science & Nutrition*, 8(10), 5379–5391. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1809>
- Huang, J., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Li, C. (2024). Modulation of starch structure, swallowability and digestibility of 3D-printed diabetic-friendly food for the elderly by dry heating. *International Journal of Biological Macromolecules*, 264, 130629. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130629>
- Joshi, D. C., Sood, S., Hosahatti, R., Kant, L., Pattanayak, A., Kumar, A., Yadav, D., & Stetter, M. G. (2018). From zero to hero: the past, present and future of grain amaranth breeding. *Theoretical and Applied Genetics*, 131(9), 1807–1823. <https://doi.org/10.1007/s00122-018-3138-y>
- Joye, I. (2019). Protein Digestibility of Cereal Products. *Foods*, 8(6), 199. <https://doi.org/10.3390/foods8060199>
- Kamiloglu, S., Tomas, M., Ozkan, G., Ozdal, T., & Capanoglu, E. (2024). In vitro digestibility of plant proteins: strategies for improvement and health implications. *Current Opinion in Food Science*, 57, 101148. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2024.101148>
- Lee, S., Han, Y., Do, J.-R., & Oh, S. (2013). Allergenic potential and enzymatic resistance of buckwheat. *Nutrition Research and Practice*, 7(1), 3. <https://doi.org/10.4162/nrp.2013.7.1.3>
- Lehmann, U., & Robin, F. (2007). Slowly digestible starch – its structure and health implications: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 18(7), 346–355. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2007.02.009>
- Magallanes-Cruz, P. A., Flores-Silva, P. C., & Bello-Perez, L. A. (2017). Starch Structure Influences Its Digestibility: A Review. *Journal of Food Science*, 82(9), 2016–2023. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13809>
- 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>
- Matías Luis, G., Hernández Hernández, B. R., Peña Caballero, V., Torres López, N. G., Espinoza Martínez, V. A., & Ramírez Pacheco, L. (2018). Current and potential uses of

- Amaranth (*Amaranthus* spp.). *Journal of Negative & No Positive Results*, 3(6), 423–436. <https://www.jonnpr.com/PDF/2410.pdf>
- Mena, P., & Angelino, D. (2020). Plant Food, Nutrition, and Human Health. *Nutrients*, 12(7), 2157. <https://doi.org/10.3390/nu12072157>
- Montemurro, M., Pontonio, E., Gobetti, M., & Rizzello, C. G. (2019). Investigation of the nutritional, functional and technological effects of the sourdough fermentation of sprouted flours. *International Journal of Food Microbiology*, 302, 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.08.005>
- Motta, C., Castanheira, I., Gonzales, G. B., Delgado, I., Torres, D., Santos, M., & Matos, A. S. (2019). Impact of cooking methods and malting on amino acids content in amaranth, buckwheat and quinoa. *Journal of Food Composition and Analysis*, 76, 58–65. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2018.10.001>
- Müller, I., & Morlock, G. E. (2024). Quantitative saccharide release of hydrothermally treated flours by validated salivary/pancreatic on-surface amylolysis (nanoGIT) and high-performance thin-layer chromatography. *Food Chemistry*, 432, 137145. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137145>
- Olawoye, B. T., & Gbadamosi, S. O. (2017). Effect of different treatments on *in vitro* protein digestibility, antinutrients, antioxidant properties and mineral composition of *Amaranthus viridis* seed. *Cogent Food & Agriculture*, 3(1), 1296402. <https://doi.org/10.1080/23311932.2017.1296402>
- Pachari Vera, E., Alca, J. J., Rondón Saravia, G., Callejas Campioni, N., & Jachmanián Alpuy, I. (2019). Comparison of the lipid profile and tocopherol content of four Peruvian quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars ('Amarilla de Maranganí', 'Blanca de Juli', INIA 415 'Roja Pasankalla', INIA 420 'Negra Collana') during germination. *Journal of Cereal Science*, 88, 132–137. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.05.015>
- Pathan, S., & Siddiqui, R. A. (2022). Nutritional Composition and Bioactive Components in Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Greens: A Review. *Nutrients* 2022, Vol. 14, Page 558, 14(3), 558. <https://doi.org/10.3390/NU14030558>
- Paucar-Menacho, L., Dueñas, M., Peñas, E., Frias, J., & Martínez-Villaluenga, C. (2018). Effect of Dry Heat Puffing on Nutritional Composition, Fatty Acid, Amino Acid and Phenolic Profiles of Pseudocereals Grains. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 68(4), 289–297. <https://doi.org/10.1515/pjfn-2018-0005>
- Peiretti, P. G., Gai, F., & Tassone, S. (2013). Fatty acid profile and nutritive value of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seeds and plants at different growth stages. *Animal Feed Science and Technology*, 183(1–2), 56–61. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2013.04.012>
- Peng, M., Yin, L., Dong, J., Shen, R., & Zhu, Y. (2022). Physicochemical characteristics and *in vitro* digestibility of starches from colored quinoa (*Chenopodium quinoa*) varieties. *Journal of Food Science*, 87(5), 2147–2158. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16126>
- Repo-Carrasco-Valencia, R., & Arana, J. V. (2017). Carbohydrates of Kernels. In *Pseudocereals* (pp. 49–70). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118938256.ch3>

- Ruales, J., Grijalva, Y. de, Lopez-Jaramillo, P., & Nair, B. M. (2002). The nutritional quality of an infant food from quinoa and its effect on the plasma level of insulin-like growth factor-1 (IGF-1) in undernourished children. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 53(2), 143–154. <https://doi.org/10.1080/09637480220132157>
- Sá, A. G. A., Moreno, Y. M. F., & Carciofi, B. A. M. (2020). Food processing for the improvement of plant proteins digestibility. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(20), 3367–3386. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1688249>
- Sánchez-García, J., Muñoz-Pina, S., García-Hernández, J., Tárrega, A., Heredia, A., & Andrés, A. (2024). Protein digestibility and ACE inhibitory activity of fermented flours in older adults and standard gastrointestinal simulation. *Food Research International*, 180, 114080. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114080>
- Sánchez-Velázquez, O. A., Manzanilla-Valdez, M. L., Mondor, M., Melgar-Lalanne, G., & Hernández-Álvarez, A. J. (2022). Pseudocereals. In *Molecular Mechanisms of Functional Food* (pp. 520–595). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119804055.ch16>
- Sensoy, I. (2021). A review on the food digestion in the digestive tract and the used in vitro models. *Current Research in Food Science*, 4, 308–319. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.04.004>
- Serena-Romero, G., Ignot-Gutiérrez, A., Conde-Rivas, O., Lima-Silva, M. Y., Martínez, A. J., Guajardo-Flores, D., & Cruz-Huerta, E. (2023). Impact of In Vitro Digestion on the Digestibility, Amino Acid Release, and Antioxidant Activity of Amaranth (*Amaranthus cruentus* L.) and Cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) Proteins in Caco-2 and HepG2 Cells. *Antioxidants*, 12(12), 2075. <https://doi.org/10.3390/antiox12122075>
- Shuka, A., Srivastava, N., Suneja, P., Yadav, S. K., Hussain, Z., Rana, J., & Yadav, S. (2018). Genetic diversity analysis in Buckwheat germplasm for nutritional traits. *NIScPR Online Periodicals Repository*, Nov-2018, 827–837. [https://nopr.niscpr.res.in/bitstream/123456789/45342/1/IJEB%2056\(11\)%20827-837.pdf](https://nopr.niscpr.res.in/bitstream/123456789/45342/1/IJEB%2056(11)%20827-837.pdf)
- Silva, J. A. da, Pompeu, D. G., Costa, O. F. da, Gonçalves, D. B., Spehar, C. R., Marangoni, S., & Granjeiro, P. A. (2015). The importance of heat against antinutritional factors from *Chenopodium quinoa* seeds. *Food Science and Technology (Campinas)*, 35(1), 74–82. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.6427>
- Singh, J., Dartois, A., & Kaur, L. (2010). Starch digestibility in food matrix: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 21(4), 168–180. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.12.001>
- Siwatch, M., & Yadav, R. B. (2017). Pseudocereals: Nutritional Quality, Processing and Potential Health Benefits. *Current Nutrition & Food Science*, 13(4). <https://doi.org/10.2174/1573401313666170214165153>
- Tang, Y., Li, X., Chen, P. X., Zhang, B., Liu, R., Hernandez, M., Draves, J., Marcone, M. F., & Tsao, R. (2016). Assessing the Fatty Acid, Carotenoid, and Tocopherol Compositions of Amaranth and Quinoa Seeds Grown in Ontario and Their Overall Contribution to Nutritional Quality. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(5), 1103–1110. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b05414>

- Taniya, M. S., MV, R., PS, S., Krishnan, G., & S, P. (2020). Bioactive peptides from amaranth seed protein hydrolysates induced apoptosis and antimigratory effects in breast cancer cells. *Food Bioscience*, 35, 100588. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100588>
- U.S. Department of Agriculture, A. R. S. (2019). *FoodData Central*. <https://fdc.nal.usda.gov/>.
- Vrenna, M., Peruccio, P. P., Liu, X., Zhong, F., & Sun, Y. (2021). Microalgae as Future Superfoods: Fostering Adoption through Practice-Based Design Research. *Sustainability*, 13(5), 2848. <https://doi.org/10.3390/su13052848>
- Witczak, M., Ziobro, R., Juszczak, L., & Korus, J. (2016). Starch and starch derivatives in gluten-free systems – A review. *Journal of Cereal Science*, 67, 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.07.007>
- Yang, Z., Zhang, Y., Wu, Y., & Ouyang, J. (2023). Factors influencing the starch digestibility of starchy foods: A review. *Food Chemistry*, 406, 135009. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135009>
- Yu, S., Dong, K., Pora, B. L. R., & Hasjim, J. (2022). The Roles of a Native Starch and a Resistant Dextrin in Texture Improvement and Low Glycemic Index of Biscuits. *Processes*, 10(11), 2404. <https://doi.org/10.3390/pr10112404>
- Zeyneb, H., Pei, H., Cao, X., Wang, Y., Win, Y., & Gong, L. (2021). In vitro study of the effect of quinoa and quinoa polysaccharides on human gut microbiota. *Food Science & Nutrition*, 9(10), 5735–5745. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2540>
- Zhang, S., Hu, J., Sun, Y., Ji, H., Liu, F., Peng, X., Zhong, Y., Geng, F., & Nie, S. (2022). In vitro digestion of eight types of wholegrains and their dietary recommendations for different populations. *Food Chemistry*, 370, 131069. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131069>
- Zhou, Y., Zhao, S., Jiang, Y., Wei, Y., & Zhou, X. (2019). Regulatory Function of Buckwheat-Resistant Starch Supplementation on Lipid Profile and Gut Microbiota in Mice Fed with a High-Fat Diet. *Journal of Food Science*, 84(9), 2674–2681. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14747>

9. ANEXOS

Figura 1. Resumen gráfico del TFG.

