

Inulina: prebiótico y usos potenciales

Inulin: prebiotic and potential uses

Teresa Romero Cortes ^a, Jesús Sánchez Roldan ^b, Martín Peralta Gil ^c, Élida Gastélum Martínez ^d, Diana A. Romero Fuentes ^e, Jaime A. Cuervo Parra ^f

Abstract:

Inulin is a soluble dietary fiber found in over 36,000 plant species as a reserve source for the lag phase. It is a GRAS (Generally Recognized as Safe) molecule that meets the definition of a "prebiotic" and is low in calories. Inulin is typically extracted with water, but it can also be obtained using microorganisms and enzymatic processes. The beneficial mechanism attributed to the intake of inulin-type fructans (ITFs) is that enzymes in the small intestine cannot digest them due to their β -configuration. Therefore, ITFs are fermented in the large intestine, selectively stimulating the growth of probiotic bacteria. ITF fermentation produces short-chain fatty acids (SCFAs) that can be metabolized and absorbed by many body parts, participating in the immune cell activation. Furthermore, the addition of inulin to the diet induces satiety, reduces food intake, and improves metabolism (cholesterol, triglycerides, glucose). It is used in the food industry, confectionery, pharmaceuticals, and animal feed, demonstrating significant benefits.

Keywords:

Fatty acids, Agave, Colon, Fructans, Microbiota

Resumen:

La inulina es una fibra dietética soluble, que se encuentra en más de 36,000 especies de plantas como fuente de reserva para la fase de latencia. Es una molécula tipo GRAS (Generalmente Reconocida Como Segura) que cumple con la definición de "prebiótico" y es de bajo valor calórico. El proceso de extracción de la inulina generalmente se realiza con agua, pero también se obtiene mediante el uso de microorganismos y procesos enzimáticos. El mecanismo benéfico que se atribuye a la ingesta de los fructanos tipo inulina (FTI), se debe a que las enzimas del intestino delgado no la digieren debido a la configuración beta (β) de la estructura; por lo cual, los FTI se fermentan en el intestino grueso estimulando selectivamente el crecimiento de bacterias de tipo probiótico. La fermentación de IFT produce ácidos grasos de cadena corta (AGCC) que pueden ser metabolizados y absorbidos por muchas partes del cuerpo, participando en la activación de las células inmunitarias. Además, la adición de la inulina en la dieta induce saciedad, reduce la ingesta de alimentos y favorece el metabolismo (colesterol, triglicéridos, glucosa). En la industria alimenticia se utiliza en confitería, farmacéutica y en la alimentación animal, mostrando grandes ventajas.

Palabras Clave:

Ácidos grasos, Agave, Colon, Fructanos, Microbiota

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-2615-1435>, Email: romero@uaeh.edu.mx

^b Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Apan | Apan-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0002-4143-2793>, Email: sa346555@uaeh.edu.mx

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Apan | Apan-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-1261-6633>, Email: martin_peralta10391@uaeh.edu.mx

^d Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco | Unidad Sureste | Mérida-Yucatán | México, <https://orcid.org/0000-0003-1629-2135>, Email: egastelum@ciatej.mx

^e Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0007-1489-1384>, Email: diana_romero10915@uaeh.edu.mx

^f Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-6586-8914>, Email: aliascha@uaeh.edu.mx

Introducción

Los fructanos, son azúcares no reductores solubles en agua, formados a base de polímeros de fructosa, derivados de la molécula de sacarosa que se sintetizan en la naturaleza. En la naturaleza, se distinguen principalmente cinco clases estructurales de fructanos: levana, mezclas de fructanos ramificados, neoseries de levana, neoseries de inulina y la inulina (Ulloa et al., 2010). Los fructanos suelen estar representados por la fórmula general GF_n, donde; la 'G' representa las unidades de glucosa, la 'F' representa las unidades de fructosa y la 'n' se refiere al número de unidades de fructosa unidas para formar la cadena completa de carbohidratos (Figura 1; Tadesse, 2019). La inulina, es una fibra dietética soluble que se encuentra ampliamente como polisacárido de reserva en el tallo, raíz, tubérculo, bulbos, granos y frutos de más de 36,000 especies de plantas (Wichienchot et al., 2011). Las fuentes vegetales principales de inulina son; jícama (*Smallanthus sonchifolius*), hoja dulce (*Stevia rebaudiana*), ajo chino (*Allium sativum*), cebada (*Hordeum vulgare*), centeno (*Secale cereale*), trigo (*Triticum aestivum*), achicoria (*Cichorium intybus*), tupinambo (*Helianthus tuberosus*), espárragos (*Asparagus sp.*), dendelion (*Taraxacum officinale*), dalia (*Dahlia pinata*), suma (*Pfalia glomerata*), cebollas (rojas y blancas), chalotas (*Allium cepa*, *Allium sp.*), bardana (*Arctium sp.*), tuna (*Opuntia ficus-indica*), banana (*Musa acuminata*) y en varias especies de maguey (*Agave sp.*; Benítez-Cortés et al., 2015; Shoaib et al., 2016; Tadesse, 2019).

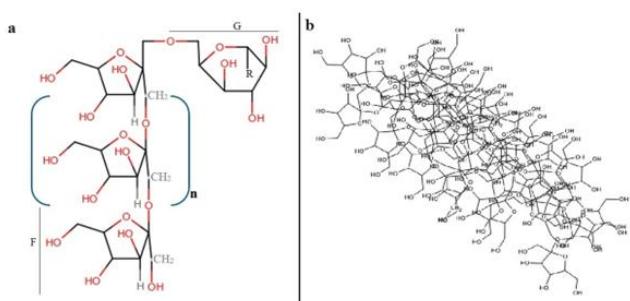


Figura 1. Estructura química de la inulina. Fructanos tipo inulina (a; adaptado de Tadesse 2019). Polímero de inulina de raíz de achicoria. (b), tomado de <https://www.fishersci.es>

En las plantas, la inulina actúa principalmente como reserva de carbohidratos que se utilizan durante la latencia, o el rebrote después de la caída prematura de las hojas y la brotación de nuevas hojas en la primavera, da tolerancia al estrés abiótico, actúa como molécula osmorreguladora durante la sequía, en suelo salino y las

bajas temperaturas (Apolinário et al., 2014). Además, se ha planteado la hipótesis de que mantiene la integridad de las bicapas lipídicas y previene el daño de la membrana celular al interactuar con los fosfolípidos (Ni et al., 2019). El valor calórico bajo de la inulina (1.5 kcal/g o 6.3 kJ/g) se debe a que no es digerible (Flamm et al., 2001; Shoaib 2016). En diversos estudios *in vitro* e *in vivo* se observó que la tasa energética de la inulina y la oligofructosa es de 1.5 kcal/g (Roberfroid, 1999).

Composición y estructura de la inulina

El grado de polimerización (GP) de la inulina puede influir en el efecto prebiótico y otras propiedades relacionadas con la salud; como la disminución de la fermentación y producción de gas (Márquez-Aguirre et al., 2016). Por otro lado, la longitud de la cadena y polidispersidad depende de la especie de planta, el grado de madurez y el proceso de extracción (Guimaraes et al., 2018). Generalmente, la inulina está constituida químicamente por cadenas lineales de fructosa unidas por enlaces β-(2,1)-fructosil-fructosa, reconociéndose la molécula de inulina con un GP inferior a 10 unidades como oligofructosa o inulina de cadena más corta, y la inulina con un GP superior a 23 unidades conocida como polifructosa o inulina de cadena más larga (Akram y Garud, 2020). El GP varía entre diferentes plantas; por ejemplo, en la alcachofa de Jerusalén el GP es de 2 a 50 unidades y en la raíz de achicoria las moléculas tienen un GP de 2 a 60 unidades (Li et al., 2015). En general, la longitud de las cadenas de fructosa varía y normalmente para la inulina oscila entre 2 y 60 monómeros (Tadesse, 2019). Aunque, el grado de polimerización más alto de inulina se ha encontrado en las asteráceas (Asteraceae), particularmente en la alcachofa globo (*Cynara scolymus*) llegando arriba de 200 residuos de fructosa (Ulloa et al., 2010). La fracción de inulina de cadena corta es mucho más soluble y dulce (comparada con la fructosa), que la inulina de cadena larga (Tadesse, 2019).

Estructuralmente, la inulina puede considerarse como una cadena principal de polioxietileno con estructura helicoidal a la que están unidos restos de fructosa. A través de la difracción de rayos X, se han identificado dos formas alomorfas cristalinas de inulina: una semihidratada (formada por media molécula de agua/unidad de fructosil) y la otra hidratada (formada por una molécula de agua/unidad de fructosil). En cristalográfia, las muestras sólidas pulverizadas de inulina hidratada, reflejan un cristal polimórfico ortorrómico o rómbico y en su forma semihidratada muestra una estructura pseudo-hexagonal polimórfica u ortorrómica consistente en dos hélices paralelas de 6 unidades cada vuelta (Morros-Camps, 2011;

Lara-Fiallos, 2017). Químicamente, el polímero de inulina que contiene en el extremo final una molécula de glucosa, es bastante estable a diferencia de los polímeros que tienen un grupo terminal perteneciente a un aldehído (CHO) o cetona (CO) que es un grupo funcional que tiene la capacidad de actuar como reactivo o reductor. Sin embargo, la inulina suele contener mezclas de diferentes formas de polímeros de fructosa y es inevitable que conserve fructanos intercalados sin extremos de glucosa, incluyendo los mono y disacáridos, que pueden participar en muchas reacciones de pardeamiento tipo Maillard (Tadesse, 2019).

Métodos de producción y extracción de la inulina

La recuperación de la inulina y el grado de polimerización pueden verse afectados por el proceso de extracción utilizado; por ejemplo, la búsqueda para optimizar las condiciones de la extracción de inulina, de las raíces de achicoria/escarola y otros cultivos, aún está en desarrollo y hasta el momento se han reportado varios procedimientos, utilizando principalmente el agua como solvente de extracción (Toneli et al., 2008). El método convencional para la extracción de inulina de la achicoria/escarola (Figura 2) consiste en el remojo de las hojas en agua caliente (70-85°C) durante 30-60 minutos. La extracción del jugo y purificación mediante encalado y carbonatación (para precipitar proteínas y pectinas). Seguido de la filtración con resinas de intercambio iónico y decoloración con carbón activado para eliminar las impurezas y la deionización de la solución resultante. Posteriormente, la solución resultante, se concentra mediante evaporación hasta alcanzar 35-40 grados Brix (°Bx) y se expone al secado por aspersión hasta lograr un 5% de humedad. El producto resultante, es un polvo blanco e inodoro, soluble en agua, de acuerdo con el grado de polimerización (Kardamanidis et al., 2024). Toneli et al. (2008), extrajeron la inulina de las raíces de achicoria con agua a 80°C durante 1 hora con agitación constante, mientras que, Saengthongpinit y Sajjaanantakul (2005), utilizaron para los tubérculos de la alcachofa de Jerusalén agua a 80°C durante 1 hora, seguido de una precipitación con alcohol.

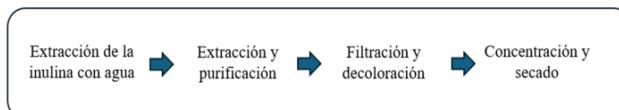


Figura 2. Proceso general para la extracción de inulina.

En el proceso de extracción sólido-líquido de fructanos tipo inulina (IFT) con agua caliente y ultrasonido, las

condiciones óptimas reportadas son; una temperatura de 79.75°C (352.9 K), un tiempo de extracción de 25 min y una relación 6/9 con respecto al solvente/materia prima (Benítez-Cortés et al., 2015). Otro método propuesto, es mediante el empleo de CO₂ supercrítico en una cámara de extracción con una temperatura y presión elevada. Los valores altos de retención en este proceso, se deben al tamaño molecular y la pureza, la cual incrementa de un 66% a valores de entre el 84 y 88% con esta tecnología de gran selectividad de componentes (Ortiz-Cerda et al., 2014). Por otro lado, los rendimientos de inulina reportados en los extractos de jícama, cabuya y raíces de bardana son de 2.27% (22.69 mg/g), 9.91% (99.12 mg/g) y 12.31%, respectivamente, (Escobar-Ledesma et al., 2020).

La producción y extracción de la inulina, también se realiza mediante el uso de microorganismos y procesos enzimáticos. En este sentido, la cadena carbonada de la inulina producida por bacterias es ramificada y tiene un peso molecular que varía desde 50 kDa hasta 1300 kDa, significativamente mayor que la inulina derivada de plantas (**5.6 a 6.3 kDa**; Mensink et al., 2015). Además, la inulina producida mediante procesos enzimáticos en su mayoría involucra enzimas derivadas de bacterias Gram positivas, Gram negativas, y hongos (mohos y levaduras) como: *Bacillus* (217C-11), *Escherichia coli*, *Streptococcus mutans*, *Leuconostoc citreum* (CW 28), *Aspergillus oryzae* (KB), *Aspergillus niger*, *Aspergillus sydowi* (IAM 2544) y *Kluyveromuces marxianus* (Mensink et al., 2015; Ni et al., 2019).

Funciones benéficas de la inulina

En 2003, la Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (FDA) clasificó a la inulina como una molécula tipo GRAS "Generalmente Reconocida Como Segura", considerando que la dosis de consumo diaria efectiva es de 5 g y la ingesta diaria máxima recomendada de 15-20 g (FDA, 2016). La inulina también está clasificada como prebiótico, los cuales son compuestos definidos por la Asociación Científica Internacional de Probióticos y Prebióticos (ISAPP) como "un sustrato que es utilizado selectivamente por los microorganismos del huésped y le confiere un beneficio para la salud". Los prebióticos, se distinguen de otras sustancias o compuestos porque no afectan la microbiota gastrointestinal, y por la vinculación que se crea entre los grupos microbianos y metabolitos del huésped otorgando un efecto beneficioso para la salud (Sudhir et al., 2017; Gibson et al., 2017; Hughes et al., 2022). Además, Markowiak y Śliżewska, (2017), mencionan que los prebióticos conservan las siguientes características:

- ... Resistencia a la acidez gástrica.
- ... Resistencia a la hidrólisis por enzimas de mamíferos.
- ... Resistencia a la absorción gastrointestinal.
- ... Son fermentados por la microbiota intestinal.
- ... Estimulan el crecimiento selectivo y/o la actividad de microorganismos probióticos.
- ... Efecto beneficioso en la salud del huésped.
- ... Estabilidad a las condiciones de procesamiento de alimentos.

El mecanismo benéfico que se atribuye a la ingesta de los fructanos tipo inulina (FTI), se debe a que las enzimas del intestino delgado, no la pueden digerir debido a la configuración beta (β) del carbono dos (C_2) anomérico de los monómeros de fructosa, ya que las enzimas del sistema digestivo (tracto gastrointestinal superior e intestino delgado) son específicas para la degradación de los enlaces alfa (α). Por lo cual, estos fructanos se fermentan en el intestino grueso estimulando selectivamente una diversidad homogénea de especies microbianas de tipo probiótico que forman parte de la microbiota intestinal comensal (Armas et al., 2019), con una mayor diversidad alfa (Astó et al., 2019). De esta manera, la composición molecular de la inulina da como resultado una digestión, hidrólisis y absorción mínima a través de procesos enzimáticos en segmentos clave del sistema digestivo, específicamente, el estómago, el intestino delgado y el colon ascendente derecho (proximal). Pero, cuando llega directamente al colon descendente izquierdo (distal) sufre la fermentación (Kardamanidis et al., 2024). Además, los ITF, inducen saciedad y reducen la ingesta de alimentos, mediante una mayor secreción de hormonas anoréxicas como, el péptido similar al glucagón-1 (GLP-1) en estudios realizados en animales y humanos (Alptekin et al., 2022). Los FTI de la campanilla china (*Platycodon grandiflorus*) estimulan la transcripción de los factores antiinflamatorios de la interleucina 4 (IL-4) e interleucina 10 (IL-10) de manera dependiente en una línea celular epitelial de yeyuno de porcino (IPEC-J2; Sheng et al., 2023).

La suplementación de la dieta con inulina después de 4 a 12 semanas, favorece cambios importantes en la microbiota intestinal como son; la reducción significativa de la relación de Firmicutes/Bacteroidetes (microbiota humana), disminución de varias bacterias asociadas con un estado proinflamatorio y aumento del desarrollo de los microorganismos del género *Bifidobacterium* spp., *Anaerostipes* spp., *Enterococcus faecalis*, *Phascolarctobacterium*, *Blautia*, *Akkermansia*, *Ruminococcus* y microorganismos de la familia Lachnospiraceae (Sheng et al., 2023).

La adición de la inulina en la dieta de ratas y pacientes obesos, actúa como protector de la barrera intestinal reduciendo significativamente la abundancia de lipopolisacáridos (LPS) o endotoxinas (Sheng et al., 2023). Las cuales, son estructuras que se encuentran como componente mayor en la membrana externa de las bacterias Gram negativas y desempeñan una función importante en la activación del sistema inmune (Romero y Iregui, 2010; Cuervo-Parra et al., 2024). Además, de mejorar la endotoxemia metabólica (presencia de endotoxinas bacterianas en la sangre; Tawfick et al., 2022) y reducir significativamente la abundancia de la bacteria Gram negativa *Desulfovibrio* spp., así mismo, en ratones alimentados con una dieta alta en grasas (HFD) se observó que la inulina restablece la diversidad de la microbiota intestinal y en pacientes con enfermedad del hígado graso no alcohólico (NAFLD) reduce significativamente la bacteria Gram positiva *Faecalibacterium prausnitzii* (Wu et al., 2022).

La administración de inulina vía oral (7 gramos/matutina/día) disuelta en agua, jugo o leche durante 4 semanas en pacientes con obesidad, dislipidemia (concentración alta de colesterol y/o triglicéridos) y sensibilidad a la insulina, mostraron una reducción significativa después del tratamiento con respecto al colesterol total, lipoproteínas de baja densidad (LDL), lipoproteínas de muy baja densidad (VLDL) y de triglicéridos. Pero, no mostró ningún efecto sobre la sensibilidad a la insulina (Balcázar-Muñoz et al., 2003). También, se observó que la ingesta de inulina (9 gramos/día) durante 4 semanas en individuos masculinos sanos lograron un efecto benéfico sobre la reducción de triglicéridos y colesterol total (Balcázar-Muñoz et al., 2003). Por su parte, en pacientes con dislipidemia, no diabéticos que ingirieron inulina (20 g/día) durante 4 semanas mostraron una reducción significativa de triglicéridos (40 mg/dL; Alles et al., 1999).

La inulina ingerida como fibra soluble, previene y actúa de forma activa contra el estreñimiento dando forma, suavidad y aumento a la biomasa fecal, por la retención del contenido de agua, además de que, previene la aparición de divertículos intestinales y la aparición de hemorroides (Quitral et al., 2018). También, se ha reportado que previene el sangrado del tubo digestivo, tanto alto como bajo, la gastritis y cuadros agudos de colitis (Rosas y Campos, 2024). Las fracciones de inulina de la planta perenne Dang shen o ginseng de los pobres (*Codonopsis pilosula*) son consideradas fuentes de antioxidantes naturales potenciales, que pueden aumentar los niveles de las enzimas intestinales como el glutatión peroxidasa, superóxido dismutasa y catalasa (Sheng et al., 2023).

Por otro lado, los resultados de los grupos de individuos con inulina de alto rendimiento (HPI) o inulina enriquecida con oligofructosa (OEI) experimentaron mejoras en la circunferencia de la cintura, la testosterona total, el índice de andrógenos libres, la globulina fijadora de hormonas sexuales, los triglicéridos, así como una disminución del número de mujeres con menstruaciones irregulares u oligomenorrea (Ziae et al., 2024), el refuerzo de las funciones inmunológicas (ante cáncer o tumores; Franck, 2006), y la ayuda con el tratamiento del síndrome de ovario poliquístico (Tawfick et al., 2022). En otros trabajos, se ha observado que el tratamiento con inulina en pacientes con enfermedad renal crónica, reduce el nivel sérico de sustancias tóxicas en sangre (Indoxil-sulfato; toxina urémica), mejorando así, la tasa de filtración glomerular y la reducción del nivel de proteína C reactiva de alta sensibilidad, al modificar la composición de la microbiota intestinal (Mitrovic et al., 2023). Además, el consumo de inulina en crías de ratón a largo plazo mostró una reducción de los niveles séricos de glucosa, colesterol total, ácido úrico y creatina quinasa, sugiriendo que los fructanos de tipo inulina contribuyen a reducir el riesgo de enfermedad renal (Liu et al., 2023). También, se ha mencionado estudios sobre ITF en humanos y su efecto de salud ósea en adolescentes y mujeres post menopáusicas (Hughes et al., 2022).

Producción de los ácidos grasos de cadena corta (AGCC)

El proceso de fermentación de los prebióticos en el colon, es fundamental para el mantenimiento y desarrollo de la microbiota y de las células epiteliales. En el colon, ocurren fundamentalmente dos tipos de fermentación: la fermentación proteolítica y la fermentación sacarolítica. La fermentación proteolítica, produce derivados nitrogenados como aminas, amonio y compuestos fenólicos, mientras que, la fermentación sacarolítica es la más beneficiosa para el organismo, debido a que mediante este proceso bioquímico se producen los ácidos grasos de cadena corta (AGCC) que se generan como el producto final de la vía clásica glucolítica o vía Embden-Meyerhof-Parnas (Álvarez-Borroto et al., 2019). Específicamente, el ácido acético se forma a partir del piruvato, a través del acetil-CoA, el ácido propiónico a partir del succinato o del lactato por la vía del acrilato y el ácido butírico a partir del acetil-CoA y butiril-CoA (Cuevas-Cuevas, 2021). Los ácidos grasos de cadena corta más estudiados son: el ácido acético (C₂:0), propiónico (C₃:0) y butírico (C₄:0). Estos ácidos grasos, se encuentran en el tracto intestinal a una concentración de 70 a 140 mM en colon proximal y de 20 a 70 mM en colon distal, teniendo una proporción aproximada para acetato, propionato y butirato de 60:20:20

(Yang et al., 2018). El flujo o transferencia de los AGCC a través de la mucosa del tracto digestivo desde el lumen a la sangre, se da mediante la absorción de forma pasiva y su transporte a través del epitelio intestinal que está determinado por la difusión y permeabilidad a través de una barrera que consiste en una capa de agua adyacente a las microvellosidades de la membrana (Ros et al., 2011). La microbiota intestinal del tipo alfa produce la mayor cantidad de AGCC (Astó et al., 2019) que pueden ser metabolizados y absorbidos por muchas partes del cuerpo (Figura 3; Flamm et al., 2001).

Los AGCC más reportados como productos de la interacción de la inulina y la microbiota intestinal son: acetato, propionato, butirato, succinato, lactato, butirato, ácido acético, ácido propiónico, ácido indol-3-acético, ácido quinurénico y ácido succínico, los cuales han sido detectados en suero, plasma sanguíneo, y heces (Sheng et al., 2023). El butirato, es utilizado preferentemente por las células que recubren el epitelio del intestino grueso o colon (colonocitos) como fuente de energía, lo que les ayuda a combatir la inflamación y la carcinogénesis, mientras que, los propionatos interfieren e inhiben la producción de colesterol en el hígado del huésped. De manera general, los AGCC, promueven un efecto osmótico incrementando el volumen de agua en el intestino grueso y la absorción y biodisponibilidad de minerales, en particular del calcio y el magnesio (Rosas, 2011; Quirral et al., 2018).

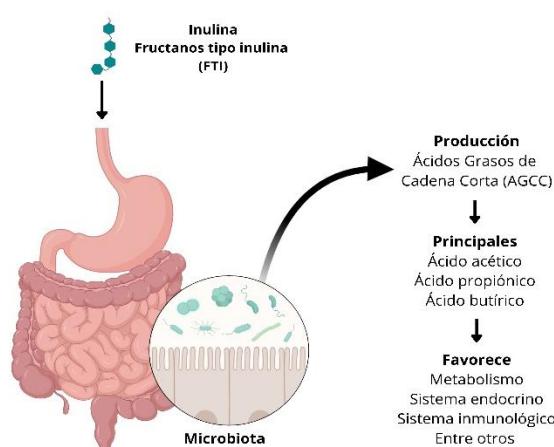


Figura 3. Beneficios de los AGCC por la ingesta de inulina o FTI.

Los AGCC, participan en la activación regulada de las células inmunitarias y la secreción de citocinas, actúan directamente sobre las células T (Linfocito T) reprogramando su actividad metabólica y su estado epigenético para controlar la diferenciación de las células T efectoras (Teff) y las células T reguladoras (Treg); además, pueden ingresar a la circulación y regular la función de las

células inmunitarias en otros tejidos (Kim et al., 2014). Los AGCC, generan un impacto antiobesogénico debido a que promueven el gasto de energía y la oxidación de ácidos grasos en las mitocondrias del hígado y los músculos, mediante la activación de la proteína quinasa activada por monofosfato de adenosina 5 (5'-AMP; Amabebe et al., 2020) y exhiben propiedades antiinflamatorias al promover la función de la barrera intestinal, afectando de forma contraproducente la obesidad (Martin-Gallaixaux et al., 2021).

Además de los AGCC, también se ha demostrado que los microorganismos benéficos producen diferentes péptidos y proteínas o toxinas peptídicas. Por ejemplo, los grupos bacterianos del ácido láctico producen lantibióticos (clase I), bactriocinas (clase II) y bacteriolisinas (clase III), que inhiben directamente el crecimiento de enteropatógenos, incluida la bacteria Gram negativa *E. coli*. De manera específica *Lactobacillus reuteri*, secreta la reuterina un potente bactericida que tiene un pH neutro, es soluble en agua, tiene bajo peso molecular y es resistente a enzimas como son las nucleasas, proteasas y lipasas (Sulenier et al., 2009; Tadesse, 2019; Escamilla et al., 2024).

Otras aplicaciones de la inulina

Las características de la solubilidad, el comportamiento térmico, la morfología cristalina, las propiedades reológicas y la estabilidad de la inulina están determinadas por el grado de polimerización y la distribución de tamaño (Mensink et al., 2015). Las capacidades destacadas han favorecido que se utilice como aditivo, sustituto de grasas y de azúcares, modificador de textura, entre otras funciones que incluyen; retener agua, espesar, formar microcristales, propiedades gelificantes, modificación del comportamiento reológico y la mejora de la sensación en boca (Drabińska et al., 2016; Shoaib et al., 2016).

La inulina se utiliza como material excipiente en tabletas, coadyuvante en vacunas, como ingrediente estructurante en detergentes en la industria farmacéutica y como empaques bioactivos de diferentes alimentos (Madrigal y Sangronis, 2007). En la formulación de alimentos, la inulina se utiliza para la mejora de las propiedades organolépticas en algunos productos como; lácteos fermentados, confites, chocolates, bebidas, postres congelados, cereales, barras energéticas, cárnicos, productos reducidos en grasas o azúcares, preparaciones de frutas y jarabe de fructosa (Eurofins, 2013). En la elaboración de pastas, al agregar la inulina en las harinas se logra un buen índice de hinchamiento y firmeza del producto, con un mejor contenido nutricional y un menor índice glicémico reduciéndose hasta en un 15% (Van et al., 1995). Como

sustituto de grasa, los fructanos hidratados en concentraciones de 40-45%, adoptan una textura y una palatabilidad muy similar a la grasa; además, que la tasa de reemplazo equivale a 0.25 g de inulina por gramo de grasa, reduciéndose el contenido energético de 37.6 kJ/g de las grasas a 2.09 kJ/g de la inulina hidratada (Li et al., 2015).

En la alimentación animal, la inulina y sus derivados se usan para disminuir olores desagradables en las heces de animales domésticos (perros y gatos), como sustituto de antibióticos en pollos, conejos y cochinos (Madrigal y Sangronis, 2007). Por otro lado, el efecto benéfico de los IFT en la fisiología y comportamiento productivo de rumiantes parece depender del tipo de compuesto, la dosis, la edad de los animales y de las condiciones de producción (Hernández-Sánchez et al., 2022). Además, la ingesta de inulina suplementada con un probiótico, reduce la población de coliformes, la incidencia de diarreas e incrementa la ganancia de peso en corderos y terneras lactantes (Lucey et al., 2021; Hernández-Sánchez et al., 2022). En novillos, el uso de dietas con concentraciones altas de inulina mejora la ganancia diaria del peso (Tian et al., 2019; Hernández-Sánchez et al., 2022). En ganado lechero, se observó que el prebiótico actúa como un antiadhesivo para micotoxinas relacionadas con hemorragias intestinales (Wang et al., 2021; Hernández-Sánchez et al., 2022). Por otro lado, la inulina de maguey (*Agave tequilana* Weber) probada a tres niveles de concentración (0, 1, y 2%) en conejos, redujo el consumo aparente de los nutrientes, e incrementó la digestibilidad, incluyendo la energía bruta, redujo el consumo de agua y disminuyó la cantidad (UFC/g) de la bacteria Gram negativa *E. coli* en las heces. Donde en general, la concentración de inulina del 2% en la dieta mostró la mejor digestibilidad y microflora intestinal (Alvarado-Loza et al., 2017).

Efectos adversos de la inulina

No obstante, el consumo de la inulina puede provocar algunos efectos comunes como; náuseas, hinchazón, flatulencias, heces blandas, así como provocar efectos secundarios graves en pacientes con enfermedad inflamatoria intestinal (EII) o alergias (Sheng et al., 2023). Así mismo, se ha observado en ratones con diferentes edades, una diferenciación en la microbiota intestinal y en la producción de los AGCC después de la ingesta de inulina, observándose en ratones de edad mediana al ácido butírico como el metabolito más predominante y al ácido propiónico disminuido (Muthyal et al., 2022).

Conclusión

La inulina, es un compuesto que se encuentra de manera natural en diferentes partes estructurales de muchas especies vegetales. Por lo cual, la gran importancia de la inulina como un compuesto GRAS, prebiótico y compuesto bioactivo, es que su ingesta en la dieta sirve de una forma sencilla y eficaz para la mejora del microbiota intestinal, la función inmune intestinal y sistémica, y puede prevenir enfermedades metabólicas de gran interés mundial. Además de que, sus características fisicoquímicas le permiten dar aplicaciones como ingrediente en las formulaciones alimenticias, farmacéuticas y en la alimentación animal.

Referencias

- Akram, W. & Garud, N. (2020). Optimization of inulin production process parameters using response surface methodology. Future Journal of Pharmaceutical Sciences, 6, 68. <https://doi.org/10.1186/s43094-020-00087-1>
- Alles, M. S., de Roos, N. M., Bakx, J. C., van de Lisdonk, E., Zock, P. L. & Hautvast, J. G. A. J. (1999). Consumption of fructooligosaccharides does not favorably affect blood glucose and serum lipid concentrations in patients with type 2 diabetes. The American Journal of Clinical Nutrition, 69, 64-69. <https://doi.org/10.1093/ajcn/69.1.64>
- Alptekin, İ. M., Çakiroğlu, F. P. & Örmeci, N. (2022). Effects of β-glucan and inulin consumption on postprandial appetite, energy intake and food consumption in healthy females: A randomized controlled trial. Nutrition and Health, 28, 433–442.
- Alvarado-Loza, E., Orozco-Hernández, R., Paredes-Ibarra, F. & Fuentes-Hernández, V. (2017). El 2% de inulina de agave en el alimento del conejo afecta positivamente la digestibilidad y microbiota intestinal. Abanico Veterinario, 7, 55-62. <http://dx.doi.org/10.21929/abavet2017.73.6>
- Álvarez-Borroto, R., González-Gavilánez, H. R. & Montenegro-Cepeda, A. C. (2019). Extracción y determinación del contenido de fructanos del tipo inulina del yacón (*Smallanthus sonchifolius*): esquema tecnológico para su producción industrial. Tecnología Química, 39, 37-48.
- Amabebe, E., Robert, F. O., Agbalalah, T. & Orubu, E. S. F. (2020). Microbial dysbiosis- induced obesity: Role of gut microbiota in homoeostasis of energy metabolism. British Journal of Nutrition, 123, 1127–1137.
- Apolinário, A. C., de Lima-Damasceno, B. P. G., de Macêdo-Beltrão, N. E., Pessoa, A., Converti, A. & da Silva, J. A. (2014). Inulin-type fructans: a review on different aspects of biochemical and pharmaceutical technology. Carbohydrate Polymers, 101, 368–378. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.09.081>
- Armas, R. R. A., Martínez, G. D. & Pérez, C. E. R. (2019). Fructanos tipo inulina: efecto en la microbiota intestinal, la obesidad y la saciedad. Gaceta Médica Espirituana, 21, 134-145.
- Astó, E., Méndez, I., Rodríguez-Prado, M., Cuñé, J., Espadaler, J. & Farran-Codina, A. (2019). Effect of the degree of polymerization of fructans on ex vivo fermented human gut microbiome. Nutrients, 11, 1293. <https://doi.org/10.3390/nu11061293>
- Balcázar-Muñoz, B. R., Martínez-Abundis, E. & González-Ortiz, M. (2003). Efecto de la administración oral de inulina sobre el perfil de lípidos y la sensibilidad a la insulina en individuos con obesidad y dislipidemia. Revista Médica de Chile, 131, 597-604. <http://dx.doi.org/10.4067/S0034-98872003000600002>
- Benítez-Cortés, I., Pérez-Martínez, A., Álvarez-Borroto, R., Collado-García, O. & González-Díaz, Y. (2015). Perspectivas de la producción de inulina a partir de la tuna (*Opuntia ficus-indica*). Tecnología Química, 35, 193-205.
- Cuervo-Parra, J. A., Aparicio-Burgos, J.E., Pérez-España V.H., Morales-Ovando M. A., Peralta-Gil M. & Romero-Cortes T. 2024. Bioquímica de la pared celular de Gram positivas y Gram negativas. Pádi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI. 12, 1-8. DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v12i23.11450>
- Cuevas-Cuevas, V. M. (2021). Microbiota intestinal y ácidos grasos de cadena corta: definiendo los vínculos entre ambos. Revista de la Facultad de Ciencias Médicas, 18, 2-8.
- Drabińska, N., Zieliński, H. & Krupa-Kozak, U. (2016). Technological benefits of inulin-type fructans application in gluten-free products – A review. Trends in Food Science & Technology, 56, 149-157. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.08.015>
- Escamilla, G. E., Baca, C. M. L., Alcazar, P. A. G., Segoviano, R. J. C. & López, L. A. P. (2014, 19 de diciembre). Proceso de obtención de un alimento gelificado contra caries dental suplementado con reuterina parcialmente purificada de *Lactobacillus reuteri*. <https://vidoc.impi.gob.mx/visor?usr=SIGA&texp=SI&tdoc=E&id=MX/a/2014/016135>
- Escobar-Ledesma, F. R., Sánchez-Moreno, V. E., Vera, E., Ciobotă, V., Vargas, J. P. & Jaramillo, L. (2020). Extraction of Inulin from Andean Plants: An Approach to Non-Traditional Crops of Ecuador. Molecules, 25, 5067. <https://doi.org/10.3390/molecules25215067>
- Eurofins, A. (2024, 11 de mayo). Carbohydrates testing. Dietary fibers testing. <http://www.dietaryfibretesting.com/>
- Flamm, G., Glinsmann, W., Kritchevsky, D., Prosky, L. & Roberfroid, M. (2001). Inulin and oligofructose as dietary fiber: a review of the evidence. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 41, 353-362. <https://doi.org/10.1080/20014091091841>
- Food and Drug Administration (FDA). (2016). Science review of isolated and synthetic non-digestible carbohydrates. U.S. Department of Health and Human Services. <https://www.fda.gov/media/101853/download>
- Franck, A. (2006). Inulin. En: Stephen, A. (Ed.). Food Polysaccharides and Their Applications. Marcel Dekker.
- Gibson, G. R., Hutchins, R., Sanders, M. E., Prescott, S. L., Reimer, R. A., Salminen, S. J., Scott, K., Stanton, C., Swanson, K. S. & Cani, P. D. (2017). Expert consensus document: the International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of prebiotics. Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology, 14, 491.
- Guimaraes, J. L., Silva, E. K., Rodrigues, C. A. L., Cunha, R. L., Monica, Q. F., Meireles, M. A. A. & Cruz, A. G. (2018). Manufacturing a prebiotic whey beverage exploring the influence of degree of inulin polymerization. Food Hydrocolloids, 77, 787–795. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.11.021>
- Hernández-Sánchez, D., Rico-López, S., Sánchez-Santillán, P., Ayala-Monter, M. A., Crosby-Galván, M. M. & López-Garrido, S. J. (2022). Inulina: su uso como prebiótico en la nutrición de rumiantes. Tropical and Subtropical Agroecosystems, 25, 105.

- Hughes, R. L., Alvarado, D. A., Swanson, K. S. & Holscher, H. D. (2022). The Prebiotic Potential of Inulin-Type Fructans: A Systematic Review. *Advances in Nutrition*, 13, 492-529. <https://doi.org/10.1093/advances/nmab119>
- Kardamanidis, A., Misailidis, N., Ferreira, R. G. & Petrides, D. (2024). Inulin Production from Chicory Roots – Process Modeling and Techno-Economic Assessment (TEA) using SuperPro Designer. Intelligen, Inc, 1-17. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24973.31205>
- Kim, C. H., Park, J. & Kim, M. (2014). Gutmicrobiota-derived short-chain fatty acids, T cells, and inflammation. *Immune Network*, 14, 277–288. <https://doi.org/10.4110/in.2014.14.6.277>
- Lara-Fiallos, M., Julián-Ricardo, M. C., Pérez-Martínez, A., Benítez-Cortés, I. & Lara-Gordillo, P. (2017). Avances en la producción de inulina. *Tecnología Química*, XXXVII, 2, 220-238.
- Li, W., Zhang, J., Yu, C., Li, Q., Dong, F., Wang, G., Gu, G. & Guo, Z. (2015). Extraction, degree of polymerization determination and prebiotic effect evaluation of inulin from Jerusalem artichoke. *Carbohydrate Polymers*, 121, 315-319. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.12.055>
- Liu, C., Yuan, P., Wang, Y., Yang, X., Xu, Y., Zhang W., Han, X., Chen, K., Wang, G. & Shao, T. (2023). Effects of burdock inulin-type fructans exposure on the physiological function of healthy mice and their filial generation. *The Journal of Veterinary Medical Science*, 85, 425–433. <https://doi.org/10.1292/jvms.22-0530>
- Lucey, P. M., Lean, I. J., Aly, S. S., Golder, H. M., Block, E., Thompson, J. S. & Rossow, H. A. (2021). Effects of mannan-oligosaccharide and *Bacillus subtilis* supplementation to preweaning Holstein dairy heifers on body weight gain, diarrhea, and shedding of fecal pathogens. *Journal of Dairy Science*, 104, 4290–4302. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19425>
- Madrigal, L. & Sangronis, E. (2007). La inulina y derivados como ingredientes claves en alimentos funcionales. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 57, 387-396.
- Markowiak, P. & Śliżewska, K. (2017). Effects of probiotics, prebiotics, and synbiotics on human health. *Nutrients*, 9, 1021.
- Márquez-Aguirre, A. L., Camacho-Ruiz, R. M., Gutiérrez-Mercado, Y. K., Padilla, C. E., González-Ávila, M., Gálvez-Gastélum, F. J. & Ortuno-Sahagún, D. (2016). Fructans from Agave tequilana with a lower degree of polymerization prevent weight gain, hyperglycemia, and liver steatosis in high-fat diet-induced obese mice. *Plant Foods for Human Nutrition*, 71, 416–421. <https://doi.org/10.1007/s11130-016-0578-x>
- Martin-Gallaixaux, C., Marinelli, L., Blottiére, H. M., Larraufie, P. & Lapaque, N. (2021). SCFA: Mechanisms and functional importance in the gut. *The Proceedings of the Nutrition Society*, 80, 37–49. <https://doi.org/10.1017/s0029665120006916>
- Mensink, A. M., Frijlink, W. H., van der Voort, M. K. & Hinrichs, W. L. J. (2015). Inulin, a flexible oligosaccharide I: Review of its physicochemical characteristics. *Carbohydrate Polymers*, 130, 405–419. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.05.026>
- Mitrovic, M., Stankovic-Popovic, V., Tolinacki, M., Golic, N., Sokovic, B. S., Veljovic, K., Nastasijevic, B., Soldatovic, I., Svorcan, P. & Dimkovic, N. (2023). The impact of synbiotic treatment on the levels of gut-derived uremic toxins, inflammation, and gut microbiome of chronic kidney disease patients-a randomized trial. *Journal of Renal Nutrition*, 33, 278–288. doi: 10.1053/j.jrn.2022.07.008
- Morros-Camps, J. (2011). Obtención de biopolímeros tenso activos basados en medios de inulina. Universidad de Barcelona.
- Muthyala, S. D. V., Shankar, S., Klemashevich, C., Blazier, J. C., Hillhouse, A. & Wu, C. S. (2022). Differential effects of the soluble fiber inulin in reducing adiposity and altering gut microbiome in aging mice. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 105, 108999. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2022.108999>
- Ni, D., Xu, W., Zhu, Y., Zhang, W., Zhang, T., Guang, C. & Mu, W. (2019). Inulin and its enzymatic production by inulosucrase: Characteristics, structural features, molecular modifications and applications. *Biotechnology Advances*, 37, 306-318. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.01.002>
- Ortiz-Cerda, I. E., Bonnin, J., Bostyn, S., Ruiz-Cabrera, M. A. & Moscosa-Santillán, M. (2014). Experimental and CFD Modeling Study of Inulin-Type Fructan Purification from a Model Solution by Diafiltration on a Pilot-Scale Unit. *Separation Science and Technology*, 49, 1125–1134. <https://doi.org/10.1080/01496395.2014.88092>
- Quiral, V., Torres, M., Velásquez, M. & Bobadilla, M. (2018). Efecto de inulina en la saciedad en humanos. *Perspectivas en Nutrición Humana*, 20, 79-89. <https://doi.org/10.17533/udea.penh.v20n1a07>
- Roberfroid, M. B. (1999). Concepts in functional foods: the case of inulin and oligofructose. *The Journal of Nutrition*, 129(7 Suppl), 1398S-1401S. <https://doi.org/10.1093/jn/129.7.1398S>
- Romero, H. S. & Iregui, C. A. (2010). El Lipopolisacárido. *Revista de Medicina Veterinaria*, 19, 37-45.
- Ros, B. G., Martínez, G. C. & Valencia, A. J. A. (2011). Biodisponibilidad de los ácidos grasos de cadena corta: mecanismos de absorción. *Anales de la Real Academia de Ciencias Veterinarias de Andalucía Oriental*, 24, 125-134.
- Rosas, M. N. & Campos, A. A. G. (2019). Inulina y su potencial funcional contra la colitis. Saber más. <https://www.sabermas.umich.mx/archivo/articulos/471-numero-53/902-inulina-y-su-potencial-funcional-contra-la-colitis.html>
- Rosas, M. R. (2011). Inmunonutrición. Probióticos, prebióticos y simbióticos. Offarm, 30, 54-59.
- Saengthongpinit, W. & Sajjaanantakul, T., (2005). Influence of harvest time and storage temperature on characteristics of inulin from Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) tubers. *Postharvest Biology and Technology*, 37, 93–100. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2005.03.004>
- Saulnier, D. M., Spinler, J. K., Gibson, G. R. & Versalovic, J. (2009). Mechanisms of probiosis and prebiosis: considerations for enhanced functional foods. *Current Opinion in Biotechnology*, 20, 135-141.
- Sheng, W., Ji, G. & Zhang, L. (2023). Immunomodulatory effects of inulin and its intestinal metabolites. *Frontiers in Immunology*, 14, 1224092. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.1224092>
- Shoaib, M., Shehzad, A., Omar, M., Rakha, A., Raza, H., Sharif, H. R., Shakeel, A., Ansari, A. & Niazi, S. (2016). Inulin: Properties, health benefits and food applications. *Carbohydrate Polymers*, 20, 444-454. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.04.020>
- Sudhir, P. S., Jadaun, J. S., Narnoliya, L. K. & Pandey, A. (2017). Prebiotic oligosaccharides: special focus on fructooligosaccharides, its biosynthesis and bioactivity. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 183, 613-35.
- Tadesse, T. F. (2019). Direct and Indirect Actions of Inulin as Prebiotic Polysaccharide: A Review. *CPQ Nutrition*, 3, 01-15.

Tawfick, M. M., Xie, H., Zhao, C., Shao, P. & Farag, M. A. (2022). Inulin fructans in diet: Role in gut homeostasis, immunity, health outcomes and potential therapeutics. International Journal of Biological Macromolecules, 208, 948–961.

Tian, K., Liu, J., Sun, Y., Wu, Y., Chen, J., Zhang, R., He, T. & Dong, G. (2019). Effects of dietary supplementation of inulin on rumen fermentation and bacterial microbiota, inflammatory response and growth performance in finishing beef steers fed high or low-concentrate diet. Animal Feed Science and Technology, 258, 114299. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2019.114299>

Toneli, J. T. C. L., Park, K. J., Ramalho, J. R. P., Murr, F. E. X. & Fabbro, I. M. D. (2008). Rheological characterization of chicory root (*Cichorium intybus* L.) inulin solution. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 25, 461–471.

Ulloa, J. A., Espinosa, A. H., Cruz, R. G. K., Rosas, U. P., Ulloa, R. B. E. & Ramírez, R. J. C. (2010). Los fructanos y su papel en la promoción de la salud. Revista Fuente, 2, 57-62.

van Loo, J., Coussement, P., de Leenheer, L., Hoebregs, H. & Smits, G. (1995). On the presence of inulin and oligofructose as natural ingredients in the western diet. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 35, 525-552. <https://doi.org/10.1080/10408399509527714>

Wang, Y., Nan, X., Zhao, Y., Jiang, L., Wang, H., Hua, D., Zhang, F., Wang, Y., Liu, J., Yao, J. & Xiong, B. (2021). Dietary supplementation with inulin improves lactation performance and serum lipids by regulating the rumen microbiome and metabolome in dairy cows. Animal Nutrition, 7, 1189-1204. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2021.09.007>

Wichienchot, S., Thammarutwasik, P., Jongjareonrak, A., Chansuwan, W., Hmadhlou, P., Hongpattarakere, T., Itharat, A. & Ooraikul, B. (2011). Extraction and analysis of prebiotics from selected plants from southern Thailand. Journal of Science and Technology, 33, 517-523.

Wu, Z., Du, Z., Tian, Y., Liu, M., Zhu, K., Zhao Y. & Wang, H. (2022). Inulin accelerates weight loss in obese mice by regulating gut microbiota and serum metabolites. Frontiers in Nutrition, 9, 980382. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.980382>

Yang, G., Chen, S., Deng, B., Tan, C., Deng, J., Zhu, G., Yin, Y. & Ren, W. (2028). Implication of G Protein-Coupled Receptor 43 in Intestinal Inflammation: A Mini-Review. Frontiers in Immunology, 9, 1-6.

Ziae, R., Shahshahan, Z., Ghasemi-Tehrani, H., Heidari, Z., Nehls, M. S., & Ghiasvand, R. (2024). Inulin-type fructans with different degrees of polymerization improve insulin resistance, metabolic parameters, and hormonal status in overweight and obese women with polycystic ovary syndrome: A randomized double-blind, placebo-controlled clinical trial. Food Science & Nutrition, 12, 2016–2028. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3899>