Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Procianidinas obtenidas de residuos de café y litche: una revisión general
Procyanidins obtained from litche and coffee residues: a general review

Vázquez-Núñez, M.A.[2], Aguilar-Zárate, P.[1], Reyes-Munguía, A.[2]*, Carranza-Álvarez, C.[2], Aguilar-Zárate, M.[3], Michel-Michel, M.R.[1]*

[1] Departamento de Ingenierías, Instituto Tecnológico de Ciudad Valles, Tecnológico Nacional de México, Carretera al Ingenio Plan de Ayala Km. 2, Colonia Vista Hermosa, Ciudad Valles, San Luis Potosí, C.P. 79010, México.
[2] Facultad de Estudios Profesionales Zona Huasteca, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Romualdo del Campo 501, Colonia Rafael Curiel, Ciudad Valles, San Luis Potosí, C. P. 79060, México.
[3] Facultad de Ciencias Químicas-CIEP, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Dr. Manuel Nava 6, Zona Universitaria, San Luis Potosí, San Luis Potosí C.P. 78210, México.
angeles.vazquezac@outlook.com; pedro.aguilar@tecvalles.mx; * abigail.reyes@uaslp.mx; candy.carranza@uaslp.mx; mayra.aguilar@uaslp.mx; * mariela.michel@tecvalles.mx

Innovación tecnológica: Importancia del uso de polifenoles y procianidinas de residuos agroindustriales de cáscara de litche y pulpa de café y su simulación gastrointestinal.

Área de aplicación industrial: Fitoquímicos y antioxidantes.

Recibido: 24 mayo 2022
Aceptado: 15 noviembre 2022

Abstract

Procyanidins are a type of polyphenols that are very abundant on the planet, which have a wide variety of bioactivities, among which their antioxidant activity stands out. These compounds can be present in many foods, as well as in the agro-industrial residues obtained from their processing, such as coffee pulp and litche shells and seeds. This is of great interest for research, since obtaining bioactive compounds from agro-industrial wastes can provide them with added value in areas such as the pharmaceutical and food industries. However, for the possible application of compounds such as procyanidins, it is important to consider everything from the extraction processes to the conservation, since they are very unstable compounds. For the preservation of these compounds, it is common to use microencapsulation methods that allow the protection of bioactive compounds, preserving their bioavailability and bioactivity, improving their stability, and allowing a controlled release. Encapsulated bioactive compounds obtained from agro-industrial wastes are a great strategy to reduce their accumulation, as well as the negative economic and environmental effects they produce, and they also have great potential as functional ingredients. However, it is important

to mention that the study of their effects on the organism and human health are aspects of great interest that should always be considered, and for this reason, increasingly precise techniques have been developed that simulate the digestion processes allowing the study of the physiological response and estimation of bioavailability. Thanks to the study of *in vitro* digestion methods, the complex digestion processes of compounds such as polyphenols have been elucidated in a general way. These processes have made it possible to observe the changes produced due to physical-chemical and mechanical factors such as the action of enzymes, acids, and salts, as well as chewing processes and peristaltic movements. After the release of the compounds, they generally reach the small intestine intact due to their complex structures that resist acid hydrolysis processes. It has also been discovered that depending on the structure, different compounds can be produced, however, this knowledge is not very extensive, so this is an area that still requires further research.

Key words: Agroindustrial wastes, *In vitro* digestion, Procyanidins.

Resumen

Las procianidinas son un tipo de polifenoles muy abundante en el planeta, que poseen una amplia variedad de bioactividades entre la que resalta su actividad antioxidante. Estos compuestos pueden estar presentes en muchos alimentos, al igual que en los residuos agroindustriales que se obtienen del procesamiento de estos, como la pulpa de café y la cáscara y semillas de litche. Esto resulta de gran interés para la investigación ya que la obtención de compuestos bioactivos de residuos agroindustriales puede proporcionarles un valor agregado en áreas como la industria farmacéutica y alimentaria. Sin embargo, para la posible aplicación de compuestos como las procianidinas es importante considerar desde los procesos de extracción hasta la conservación, ya que son compuestos muy inestables. Para la conservación de estos compuestos es común utilizar métodos de microencapsulación que permiten proteger los compuestos bioactivos conservando su biodisponibilidad y bioactividad, mejorando su estabilidad y para tener una liberación controlada. Los compuestos bioactivos encapsulados obtenidos de residuos agroindustriales son una gran estrategia para disminuir su acumulación, así como los efectos negativos económicos y ambientales que estos producen, además tienen un gran potencial como ingredientes funcionales. Sin embargo, es importante mencionar que el estudio de los efectos de estos en el organismo y la salud humana son aspectos de gran interés que siempre deben ser considerados, por ello se han desarrollado técnicas cada vez más precisas que simulan los procesos de digestión permitiendo el estudio de la respuesta fisiológica y una estimación de la biodisponibilidad. Gracias al estudio con métodos de digestión *in vitro* se ha logrado elucidar de forma general los complejos procesos de digestión de compuestos como los polifenoles. Estos procesos han permitido observar los cambios producidos debido a factores físico-químicos y mecánicos como la acción de enzimas, ácidos y sales, además de procesos de masticación y movimientos peristálticos. Después de la liberación de los compuestos, estos llegan generalmente intactos al intestino delgado debido a sus estructuras complejas que resisten los procesos de hidrolisis ácida. Posteriormente pueden ser hidrolizados y absorbidos en el intestino delgado cuando tienen grados de polimerización relativamente pequeños

o hasta el intestino grueso si su grado de complejidad aumenta, y una vez absorbidos pueden llegar hasta tejidos individuales donde son metabolizados. También se ha descubierto que dependiendo de la estructura se pueden producir distintos compuestos, sin embargo, estos conocimientos no son muy amplios por lo cual esta es un área que aún en la actualidad es necesaria mayor investigación.

Palabras clave: Digestión *in vitro*, Procianidinas, Residuos agroindustriales.

1. Introducción

Polifenoles

Los compuestos fitoquímicos en el reino vegetal pueden dividirse en cuatro grandes grupos: sustancias fenólicas, sustancias terpénicas, sustancias azufradas y sustancias nitrogenadas (alcaloides). De estos cuatro grupos, las sustancias fenólicas son de los compuestos que tienen mayor relevancia como constituyentes de frutas, hortalizas y de los alimentos derivados de estas (1). El término fenólico abarca varios miles de compuestos naturales, que pueden subdividirse en dos grandes grupos: fenólicos simples y polifenoles (2). Los polifenoles, son los metabolitos secundarios más abundantes, ya que son una categoría diversa, bioactiva y omnipresente en las plantas, que constituyen una parte esencial de la dieta humana y son de considerable interés debido a sus propiedades biológicas (3,4).

Los polifenoles son reconocidos principalmente por su remarcada capacidad antioxidante (4,5), que justifican muchos de los efectos beneficiosos que se le atribuyen (6). Estos compuestos constituyen un grupo muy grande de sustancias que abarcan familias con estructuras relativamente simples hasta moléculas poliméricas como los taninos hidrolizables y condensados (1). Estos compuestos polifenólicos pueden dividirse en varios subgrupos atendiendo a su estructura básica (1). Existen subgrupos de polifenoles que se derivan en función del número de anillos fenólicos y de los elementos estructurales que poseen entre ellos. Los principales grupos de polifenoles son: ácidos fenólicos (derivados del ácido hidroxibenzoico o del ácido hidroxicinámico), estilbenos, lignanos, alcoholes fenólicos y flavonoides (6,7).

En cuanto a los beneficios que los polifenoles poseen, han recibido gran atención en los últimos años, evaluando muchos aspectos como sus actividades químicas y biológicas, sin embargo algunos de los principales problemas que se encuentran son su rápido metabolismo y su baja biodisponibilidad (3). A pesar de que existe una amplia variedad de estudios sobre los polifenoles, aun se requieren más avances que ayuden a aprovechar los beneficios de estos compuestos para la salud de los seres humanos y comprender mejor sus actividades biológicas.

2. Generalidades de las procianidinas

Dentro de los polifenoles encontramos a los flavonoides, que constituyen una de las subfamilias a las que la comunidad científica también ha dedicado mucha atención en los últimos años (8). Dentro de este grupo las procianidinas también conocidas como taninos condensados, derivan de las proantocianidinas (9,10), las cuales son unos de los compuestos fenólicos naturales más abundantes del planeta (11).

La investigación sobre este tipo de compuestos ha surgido desde hace varias décadas (12), y desde entonces, muchos estudios han demostrado la capacidad antioxidante de los polifenoles y más específicamente de las procianidinas. Hasta

ahora se sabe que las procianidinas son flavonoides con una potente actividad antioxidante que es capaz de eliminar una amplia gama de especies de radicales libres y especies de nitrógeno (13,14). Por ello se les ha considerado una especie de antioxidante natural muy importante, no solo para la conservación de alimentos sino también por su posible aplicación clínica (11).

2.1. Estructura de las procianidinas

La estructura de las procianidinas está construida por diferentes números de unidades polihidroxi flavan-3-ol, que tienen la estructura vertebral característica de los flavonoides C6-C3-C6 (15), estas unidades son la (+)-catequina y (-)- epicatequina (9,10,16,17) que unidas por enlaces interflavanos forman dímeros (11,14,18). Los flavan-3-oles se pueden distinguir de otros flavonoides por su anillo C saturado con un grupo OH en la posición 3, que como centro quiral da lugar a las formas trans y cis de la catequina y epicatequina respectivamente (15).

Las procianidinas se pueden clasificar en función de los enlaces de sus unidades monoméricas, denominándolas procianidinas de tipo B y A (9,10). En las procianidinas de tipo B el enlace entre monómeros, principalmente o de forma más común es entre el carbono 4 del anillo B de un monómero al carbono 8 del anillo C del siguiente monómero (9,14), pero también se pueden encontrar en menor frecuencia enlaces entre el carbono 4 y el carbono 6 (11,18). Las procianidinas de tipo B, son el tipo más abundante que se puede encontrar en la naturaleza (10) siendo las procianidinas B1, B2, B3 y B4 las más frecuentes (9). Las procianidinas de tipo B que forman trímeros se les denomina procianidinas C, siendo C1 y C2 las más conocidas (19,20).

En el proceso de oxidación de las procianidinas pueden ocurrir dos mecanismos; reacciones intermoleculares para la formación de nuevas moléculas de procianidinas o la transformación parcial en procianidinas de tipo A (18,21,22).

Las procianidinas de tipo A se diferencian porque adicional al enlace interflavan, tienen un enlace de tipo éter entre los monómeros de catequina y epicatequina (10), entre el carbono 2 del anillo C y el grupo hidroxilo del carbono 7 del anillo A (9,11) o carbono 5 (18). Este grupo de procianidinas se encuentra con menos frecuencia en la naturaleza en relación con las procianidinas de tipo B (10,22,23), sin embargo las más comunes de este tipo de procianidinas son A1 y A2 (9).

Las procianidinas también pueden ser clasificadas por el grado de polimerización que presentan, la unión entre sus monómeros da origen a los oligómeros que forman a su vez polímeros, algunos autores les denominan oligoprocianidinas cuando tienen de 2 a 7 unidades de monómeros (9), mientras que otros autores les denominan procianidinas oligoméricas cuando su grado de polimerización es de 2 a 4 y superior a esto les denominan procianidinas poliméricas (11).

Tabla 1. Principales procianidinas en la naturaleza.

Tipo	Nombre trivial	Nomenclatura oficial
Procianidinas tipo B	B1	Epicatequina-(4β→8)-catequina
	B2	Epicatequina-(4β→8)-epicatequina
	B3	Catequina-(4α→8)-catequina
	B4	Catequina-(4α→8)-epicatequina
	B5	Epicatequina-(4β→6)-epicatequina
	B6	Catequina-(4α→6)-catequina
	B7	Epicatequina-(4β→6)-catequina
	B8	Catequina-(4α→6)-epicatequina
Trímeros de Procianidinas tipo B	C1	Epicatequina-(4β→8)-epicatequina-(4β→8)-epicatequina
	C2	Catequina-(4α→8)-catequina-(4α→8)-catequina
Procianidinas tipo A	A1	Epicatequina-(4β→8), (2β→O→7)-catequina
	A2	Epicatequina-(4β→8), (2β→O→7)-epicatequina

2.2. Propiedades de las procianidinas

Las procianidinas y sus múltiples propiedades biológicas asociadas a la abundancia de estas en la dieta humana las convierte en un gran objetivo de investigación en los últimos años, ya que a pesar que no son compuestos esenciales para la vida, pueden desempeñar un papel importante en la reducción de riesgos y prevención de distintas enfermedades (8,10,12).

Se sabe que de forma natural, en las plantas su función como metabolitos secundarios es como defensa frente a insectos y herbívoros, y en los alimentos, sus alteraciones se atribuyen a los cambios en los compuestos fenólicos presentes, como las procianidinas (13).

Además que muchas investigaciones ya han confirmado algunas de sus propiedades en la promoción de la salud, relacionado con su actividad antioxidantes y su acción de señalización celular (24), especialmente la neuro protección durante el envejecimiento (25), también un potencial de efectos anticancerígenos como la inhibición de proliferación de células de cáncer de mama (8), cáncer de pulmón (11) y otras propiedades anticancerígenas (9,11), también propiedades antiinfecciosas (9) antiinflamatorias (9,11,16) y cardio protectoras (9). Además, se han evaluado las procianidinas de la dieta en el contexto de la salud cardiovascular (10–12) con lo que han demostrado mejoras en la función y la salud vascular (26) y en particular, algunas investigaciones han ilustrado que los metabolitos de las procianidinas tienen la capacidad de atravesar la barrera hematoencefálica y regular las vías de transducción de señales, afectando así a la memoria y la cognición (25,27).

Además, existe evidencia de sus actividades antimicrobianas (9,10), antivirales, anti mutagénicas, cicatrizantes y anti hiperglucémicas, otros estudios han evaluado extractos de productos ricos en procianidinas y han observado su actividad como

tratamiento para la obesidad (9,28) así como sus posibles recomendaciones dietéticas futuras (12), otros estudios han informado que las procianidinas podrían aminorar la neuropatología cerebral de la enfermedad de Alzheimer mediante el bloqueo de la generación de péptidos tóxicos (25).

A pesar de toda esta evidencia su propiedad más estudiada sigue siendo la actividad antioxidante que presentan este tipo de compuestos. Numerosos estudios han demostrado los efectos beneficiosos que tienen en las células cerebrales, cuando las procianidinas disminuyen el estrés oxidativo y la peroxidación de lípidos (25), además de estas actividades, en estudios sobre el pericarpio de litchi se ha observado que facilitan la eliminación de radicales libres y la quelación de iones metálicos lo que ayuda en enfermedades como aterosclerosis, el cáncer y la diabetes (29). También se ha demostrado que su actividad antioxidante ayuda en el tracto gastrointestinal de forma local (8) y en los daños epidérmicos causados por el estrés oxidativo de la luz UV (11).

Por sus propiedades las procianidinas tienen aplicaciones en diversas áreas de la industria, debido a esto, se ha prestado atención al diseño de productos alimentarios con ingredientes funcionales para proporcionar una mejor calidad y valor nutracéutico de los alimentos (28), además del diseño de alimentos y suplementos dietéticos, algunos específicamente formulados con altos niveles de flavonoides o procianidinas (27). Sin embargo, es importante destacar que a pesar que las procianidinas han sido evaluadas experimentalmente en sus efectos tanto *in vitro* como *in vivo*, la mayoría de los conocimientos de estos mecanismos son todavía muy escaso (8), ya que su estabilidad es un problema común con el que se han enfrentado, debido a que se ven afectadas fácilmente por condiciones medioambientales como la humedad del aire, la temperatura, la intensidad de la luz y el pH (11,18,28,30).

2.3. Alimentos ricos en procianidinas

Las procianidinas pueden estar presentes naturalmente en todo el reino vegetal, con diferentes grados de polimerización, y con concentraciones muy variadas (9), se pueden encontrar en alimentos como frutas, verduras (16,25), legumbres, cereales y frutos secos (9), también en variedad de productos alimenticios que se consumen en todo el mundo, como chocolates o cacao (27,31) y bebidas como jugos y vinos (9,31,32).

Algunos ejemplos de frutos que contienen procianidinas son la uva (19) y sus semillas (11,17,28), el grano y pulpa de café (18), piña, tomate, mango (9) litchi (29), manzanas (16), cacao (26), caqui, cereza, té verde (19), naranja (9,32), kiwi, aguacate, plátano, durazno, pera (9,13) y arándanos (31).

Vegetales ricos en procianidinas son la zanahoria (9), brócoli, coliflor, ajo, pepino (32), lechuga, cebolla, papa y pimienta (9,32). Algunos ejemplos de cereales y semillas son el cacahuate, pistache, sorgo (9,33), arroz y avena (32).

Además de estos alimentos, las procianidinas también pueden encontrarse en muchas plantas (10) y sus cortezas como la del árbol de alerce (14), o la canela (9,33), también en semillas (11), flores y pericarpio (29).

2.4. Subproductos agroalimentarios ricos en procianidinas

En la industria las materias primas son sometidas a distintos procesos de transformación, lo que genera una de las principales problemáticas ambientales, que es la alta producción de residuos agroindustriales. Estos residuos representan en la actualidad un aumento en la problemática en aspectos de la economía,

medio ambiente y salud humana (28,34). También en la actualidad son muchas las actividades que generan estos residuos, lo que ha llegado a motivar la búsqueda de alternativas para su aprovechamiento (35).

Se han descrito tres grupos de tecnologías para el aprovechamiento de residuos: 1) la valorización biológica y química, 2) la obtención de combustibles y 3) la valorización térmica (36). El primer grupo resulta de mayor interés para esta investigación, ya que permite la obtención de compuestos de interés como procianidinas, flavonoles o polifenoles de estos residuos agroindustriales.

Para la obtención de este tipo de compuestos, los residuos agroindustriales más empleados son los provenientes de las frutas (36). La implementación de estas técnicas ha priorizado el aprovechamiento de estos residuos orgánicos como oportunidad de darles un valor agregado (37). Existen innumerables investigaciones que evidencian la gran cantidad de residuos agroindustriales de los cuales es posible la obtención de compuestos de interés como las procianidinas, los flavonoles y los polifenoles, estos subproductos pueden ser revisados en la Tabla 2.

Tabla 2. Compuestos de interés en diferentes subproductos agroalimentarios.

Subproductos agroalimentarios	Compuestos	Referencia
Pulpa de café	Polifenoles y procianidinas	(18)
Hojas de café	Compuestos fenólicos y procianidinas	(13)
Pericarpio y semillas de litchi	Procianidinas, polifenoles y antocianidinas	(29,38)
Semillas de acaí	Procianidinas	(10)
Cascara de zanahoria	Polifenoles y antocianinas	(39)
Cascara de lima	Polifenoles y flavonoides	(36)
Cascara de berenjena	Polifenoles, flavonoides y antocianinas	(36)
Semillas y piel de uva	Procianidinas	(28,40)
Cascara de papaya	Polifenoles y flavonoides	(39)
Piel de almendra	Procianidinas, propelargonidinas y prodelfinidinas	(41)
Subproductos de la industria vinícola	Polifenoles y procianidinas	(4)
Cascara y semillas de aguacate	Procianidinas, flavanoles, polifenoles y antocianinas	(42)

3. El litchi

3.1. Litchi en la región de la huasteca potosina

El litchi *(Litchi chinensis)* también denominado cereza de china, nuez de litchi y leechee, entre otras formas, es un fruto del árbol que pertenece a la familia *Sapindaceae* (43,44), y que es autóctono del sur de China (45,46). Se puede encontrar en zonas tropicales y subtropicales como México (22).

Este fruto llegó a México y se cultivó principalmente en el estado de Sinaloa, de donde comenzó a expandirse a varios estados de la República, (47), como Nayarit, Veracruz, Jalisco, Puebla, Morelos, Chiapas, Oaxaca, Baja california Sur, Hidalgo,

Campeche y también en San Luis Potosí (48). En estos lugares encontró un clima adecuado y se producen en grandes cantidades durante la temporada de mayo, junio y julio. Se ha determinado que para el año 2017 tenía una superficie de cultivo de aproximadamente 739 hectáreas, con una producción de 374 toneladas de lichi en 12 municipios (47), lo que nos da una idea de la cantidad de residuos agroindustriales que este cultivo puede generar.

3.2. Fitoquímicos del litchi

En la actualidad el interés por los fitoquímicos naturales ha aumentado considerablemente, y el fruto del litchi se le han investigado una amplia gama de efectos beneficiosos para la salud que se le atribuyen a ciertos compuestos fitoquímicos que pueden encontrarse en distintas partes del fruto, entre estos fitoquímicos podemos encontrar a las procianidinas (49).

El fruto de litchi se caracteriza por estar cubierto por un pericarpio indehiscente que se encuentra rodeando un arilo comestible color blanco y una semilla de color oscuro en el interior (44). La pulpa del fruto es la parte de principal consumo (45), en cambio, la semilla y la cascara son partes que suelen descartarse en su consumo o procesamiento, pero estas también se les han sido estudiados sus efectos en la salud. En el caso del pericarpio de litchi se ha investigado su efecto en la hemostasia o en el tratamiento de enfermedades como la disentería y de la semilla se ha revisado sus efectos anticancerígenos (49). Incluso son estas dos secciones del fruto a las cuales se les ha reportado mayor cantidad de compuestos fitoquímicos, ya que, para la pulpa, en recientes investigaciones se ha establecido que contiene varios compuestos fitoquímicos de interés principalmente fenólicos, sin embargo, solo se han identificado unos pocos (46). En general, los efectos beneficiosos de este fruto son asociados principalmente con los compuestos fenólicos y flavonoides presentes (22).

Los principales compuestos fitoquímicos que se pueden encontrar en todo el fruto de litchi se muestran en la Tabla 3. Debido a las posibles propiedades del fruto de litchi y sus compuestos, son potenciales opciones para la aplicación en la industria de los alimentos funcionales. Además, como se muestra en la Tabla 3, diferentes partes de este fruto son valiosas fuentes de compuestos de gran interés, y contienen cantidades variadas, en muchos casos muy significativas, lo que demuestra la importancia de utilizar y desarrollar opciones que le pueden dar un valor agregado (44).

Se ha descrito que el pericarpio y la semilla del litchi representan aproximadamente el 30% del peso seco de toda la fruta (44). Sin embargo, no se tiene información precisa sobre las cantidades de residuos agroindustriales producidos, ya que el cultivo y consumo de este producto no se encuentra regulado en muchas regiones en el mundo. A pesar de esto forma parte del principal punto de interés de esta investigación debido al contenido de procianidinas que se pueden encontrar en estos residuos, lo que los convierte en fuentes de antioxidantes naturales con un amplio campo de aplicaciones, que no están siendo aprovechadas actualmente en la región, a pesar de su gran importancia.

Tabla 3. Fitoquímicos presentes en las distintas partes del fruto de litchi.

Parte	Compuesto	Referencia
Pulpa	Compuestos fenólicos:	(46,49)
	Acido gálico, ácido clorogénico, ácido cafeico, (+)-catequina y (-)-epicatequina.	(49)
Pericarpio	Compuestos fenólicos:	(44,49)
	Procianidinas: A y B	(44,49,50)
	Ácido gálico, (-)-epicatequina, naringenina y cianidina.	(44)
Semilla	Polifenoles y saponinas.	(49)
	Flavonoides, procianidinas, ácido fenólico, ácido cumárico y ácido gálico.	(44)
	Proantocianidinas A1, A2, A6, (-)-galocatequina y proantocianidinas.	(51)
	Epicatequina, flavanonas, (-)-epicatequina-3-galato, ácido 4-O-α-L-rhamnopiranosil-elágico y naringina.	(44,51)

3.3. Antecedentes de procianidinas en litchi

El litchi es fruta con un aspecto atractivo para los consumidores, y que ya se ha mencionado que es rica en compuestos funcionales como los polifenoles (52). También se sabe que la naturaleza y concentraciones de los compuestos en los frutos puede variar dependiendo de lugar de cosecha, estación del año, grado de madures entre otras, por eso hay una gran cantidad de investigaciones que han comprobado la presencia de estos tipos de compuestos, así como su relación frente a los efectos benéficos que tienen para la salud. A continuación, se revisan algunas de estas investigaciones.

El pericarpio del litchi es uno de los principales partes de investigación debido a su alto contenido en compuestos activos y el poco uso que le dan en el consumo de este fruto. Como parte no comestible, desde la antigüedad se ha llegado a utilizar como medicina tradicional, con funciones hemostáticas y accesorias (23,53).

Además, hace algunos años no existía mucha información sobre la naturaleza de estos compuestos, y solo habían sido identificadas en el pericarpio procianidinas A2 y su subunidad la (-) epicatequina (53). Por lo que algunos autores mencionan la necesidad que existe de caracterizar las procianidinas oligoméricos (23). Por ello, recientemente, cada vez más estudios se enfocan en los beneficios que las procianidinas del litchi pueden traer a la salud humana, así como de elucidar las especies de procianidinas que se pueden encontrar.

En estudios con espectrómetro de masas lograron identificar moléculas de hasta pentámeros de procianidinas tipo A y dímeros y trímero de tipo B, y donde observaron que las principales procianidinas oligoméricos son procianidinas de tipo A (41.7%), incluidos los dímeros, trímeros y tetrámeros (20.4%, 19.8% y 1.6%), y procianidinas de tipo B (24.1%), incluidos los dímeros y trímeros (22.5% y 1.6%) (54). Otros autores también han demostrado la presencia de procianidinas oligoméricos de tipo A, además de epicatequinas puras en el pericarpio de litchi, ya que empleando LC-ESI-MS lograron identificar la (-)-epicatequina, y dímeros de procianidinas A1 y A2, además lograron identificar por primera vez trímeros de (epicatequina-(4β-8, 2β-O-7)-epicatequina-(4β-8)-epicatequina) (23).

Algunos autores mencionan que el contenido de procianidinas oligoméricas en el pericarpio de litchi es especialmente de tipo A, asociadas con antocianidinas y otros polifenoles, y que además son estas las que le brindan el color brillante de la cascara (29).

Estudios recientes han informado la presencia de dos nuevos trímeros de epicatequina (litchitannin B1 y B2) un trímero de epicatequina de tipo B y un complejo de tipo A/B, otro trímero de tipo B y dos de tipo A/B, que contienen epicatequina y proantocianidina B2 (55). Sin embargo actualmente todavía es complicada la tarea de caracterizar los oligómeros y polímeros de procianidinas en el litchi, por que hacen mención que es necesario utilizar nuevos métodos para su caracterización (22).

Otras investigaciones se han centrado en evaluar y demostrar los efectos benéficos para la salud que tiene estas procianidinas en el litchi.

Investigadores ha demostrado que la administración de procianidinas oligoméricos de tipo A y B tienen una alta actividad hipoglucemiante regulan la homeostasis de la glucosa, por múltiples vías, mejorando la homeostasis de la glucosa mediante la inhibición de su producción en el hígado, la regulación de la expresión de las proteínas implicadas en el sistema de transporte de glucosa y el aumento de la glucólisis en el hígado y el músculo esquelético (56). Además han demostrado que los suplementos dietéticos de procianidinas oligoméricos del pericarpio de litchi mejoran la homeostasis de la glucosa en ratones con alto contenido en grasas inducidos (57). Otras investigaciones han demostrado que los compuestos de procianidinas del litchi tienen actividad antitumoral y antioxidante (45).

Debido a la importancia que estos compuestos han presentado, algunas investigaciones se están centrando también en mejorar los procesos de extracción de las procianidinas del pericarpio de litchi (29).

4. El café

4.1. Café en la región huasteca

El café procede de un árbol del género Coffea y su origen se remonta desde la antigua Etiopia (58). El café fue introducido en México desde 1795, y actualmente es producido en catorce estados, en San Luis Potosí se cultiva en 7 municipios y se considera parte de los estados más importantes por el nivel de producción (59).

Los frutos del café están compuestos por el grano de café propiamente dicho o endospermo, la cáscara o endocarpio, una capa mucilaginosa, y la pulpa o mesocarpio (60). En la antigüedad uno de los principales intereses sobre el café, era su potencial energético o estimulante (60), sin embargo, con estudios realizados en épocas más actuales, se ha demostrado que sus propiedades son mucho mayores (58).

4.2. Fitoquímicos

Desde hace muchos años se han estado investigando distintas plantas por sus posibles beneficios a la salud humana, atribuidos a sus compuestos bioactivos (61). Con el paso de los años se han realizado diversas investigaciones que han demostrado la presencia de distintos compuestos de gran importancia en el café (58). En la semilla se han reportado hasta 1000 compuestos químicos distintos, como la cafeína, que es la principal sustancia energética del café, además de cantidades significativas de otros compuestos como: carbohidratos, lípidos, proteínas, minerales, vitaminas (58,60). También compuestos con capacidades antioxidantes que resultan de gran interés para la investigación científica (58).

La composición química del café puede varias significativamente en relación con la especie (58), sin embargo, los principales compuestos identificados son la metilxantinas, que es el compuesto bioactivo más importante del café, entre otros como el ácido clorogénico, diterpenos y la trigonelina (58).

Además de la especie, otro factor importante en la composición química del café es el procesamiento, principalmente el tostado, que puede producir cambios químicos, en la composición del café, como formación de complejos o principalmente la degradación de compuestos químicos (58). Por lo que el café tostado presenta algunas diferencias en cuanto a la composición química (58), sin embargo también se han llegado a encontrar compuestos de interés en el café usado (61) o borra de café, el cual se recupera posterior a la obtención de la bebida (60).

El procesamiento de las cerezas del café también genera una gran cantidad de subproductos, los cuales en los últimos años han sido valorizados para la obtención de compuestos activos de interés (62). Los residuos agroindustriales del café son considerados como una fuente importante de compuestos polifenólicos (60,63). Un claro ejemplo son las procianidinas que se han encontrado en una gran cantidad de residuos agroindustriales producidos desde su cultivo y procesamiento hasta su consumo (50). En lo cual se ha reportado que las perdidas en residuos agroindustriales en el procesamiento del café son entre el 40 y 45 % y que la producción mundial ha superado los 10 millones toneladas anualmente (64,65), donde la pulpa de café es principal subproducto (61).

Como ya se ha mencionado, el café tiene diversos compuestos fitoquímicos de gran interés, sin embargo, también en distintos subproductos se pueden encontrar concentraciones interesantes de estos compuestos (61). Además que pueden diferir ampliamente en base a las condiciones ambientales, la variedad y estrategia del cultivo, su etapa de desarrollo y el procesamiento (13,50,60,62,66). En la Tabla 4 se muestran los distintos fitoquímicos que se pueden encontrar en los granos de café, y sus cerezas o granos verdes, así como en los subproductos de la industria como los son la pulpa de café y el café usado o borra de café.

Tabla 4. Fitoquímicos del café y sus subproductos.

Parte	Compuestos	Referencia
Cereza o granos verdes	Lignanos y antocianinas	(58)
	Ácidos fenólicos: Elágico, cafeico y clorogénico	(61)
	Flavonoides	(60)
	Alcaloides: Cafeína	(58)
Grano	Alcaloides: Cafeína, trigonelina y metilxantinas	(58)
	Compuestos fenólicos: Ácido clorogénico, ácido cafeico, ácido ferúlico y ácido cumárico	(58,60)
	Diterpenos: Cafestol, Kahweol	(58)
	Triterpenos, catequinas, taninos, flavonoides y quinonas	(60)

Pulpa	Procianidinas B2, A, C1, dímeros, trímeros, tetrámeros y pentámeros	(50)
	Ácido clorogénicos y flavonoides	(61)
Café usado o borra de café	Compuestos fenólicos: Ácido clorogénico, ácido cafeico y ácido ferúlico Flavonoides y taninos condensados	(60,61) (60)

4.3.Antecedentes de procianidinas en Café (pulpa)

Distintos estudios sobre la pulpa de café han mencionado el aumento de la posibilidad de la agroindustrialización de este residuo, con la presencia de compuestos polifenólicos (67) y taninos condensados (68). Las investigaciones previas han reportado la presencia de compuestos como las procianidinas en la pulpa de café, sin embargo, la información sigue siendo escasa e imprecisa, por lo que la recuperación e identificación de estos compuestos se ha convertido en área interesante de investigación (18).

Autores como Ramirez-Coronel et al., 2004 (69) han identificado diferentes concentraciones de procianidinas entre la pulpa de café fresca y después de días, con grados de polimerización medios y con epicatequina como unidades constitutivas principalmente. Otros estudios sobre la composición química de la pulpa y además de la piel de café, mencionan que los taninos son los principales compuestos fenólicos presentes en estas partes del fruto del café y algunos ejemplos específicos de estos compuestos son trímeros de procianidinas y prodelfinidas (70).

Investigaciones más recientes se han enfocado en la caracterización especifica de procianidinas nativas y oxidadas de la pulpa de café. Aplicando técnicas más especializadas han revelado la presencia desde dímeros hasta pentámeros de procianidinas con la (-)-epicatequina como unidad constitutiva y por primera vez evidenciaron la presencia de trímero de procianidinas de tipo A (18).

Otros investigadores se centran no solo en la identificación de estos compuestos, sino además en optimizar su extracción y encapsulación a partir de estos residuos agroindustriales, como mecanismos de protección y para mejorar la solubilidad y evitar la degradación. Empleando técnicas como liofilización y secado por aspersión, para retener los compuestos polifenólicos y preservar su actividad antioxidante (71).

5. Métodos de obtención y preservación de procianidinas

Para la obtención y preservación de procianidinas se suelen seguir una serie de procesos que comienzan con la obtención de los compuestos a partir del material vegetal, seguido de un proceso de purificación de los extractos y un proceso opcional de secado o concentración de los compuestos (41). A partir de estos resultados es posible realizar la identificación de los distintos metabolitos, así como la preservación de los mismo empleando distintas técnicas.

5.1. Métodos de extracción

La gran importancia que tienen las procianidinas para distintas industrias ya está bien comprobada y se ha mencionado anteriormente, por lo cual ha surgido el creciente interés de buscar nuevas fuentes naturales y seguras de obtención de estos compuestos debido a sus importantes bioactividades. En distintos trabajos se ha sido utilizado con éxito la extracción de

polifenoles como las procianidinas de distintas fuentes naturales (72).

Existen diferentes factores que intervienen y condicionan el proceso de extracción de estos compuestos polifenólicos, ya que los resultados, la composición y los rendimientos dependen en gran parte tanto por la naturaleza del disolvente utilizado como de las condiciones a las que se lleva a cabo el proceso de extracción (73).

El factor principal y considerado más importante son los solventes utilizados, que se emplean para obtener los compuestos dentro de una matriz vegetal (73). El proceso de extracción generalmente se lleva a cabo a partir de una maceración del material vegetal rico en procianidinas con disolventes orgánicos (41) polares, principalmente como etanol, metanol, acetato de etilo y acetona, ya sea puros o en soluciones acuosas (41,73).

La temperatura y el pH son factores que también tienen un papel importante en el proceso de extracción, debido a que facilitan la accesibilidad del solvente a la estructura tisular del material vegetal optimizando el proceso de extracción de los compuestos (73). Utilizar procesos con aumentos de temperaturas es una alternativa que pueden ayudar a disminuir el tiempo y volumen de solvente utilizado en el proceso, ya que además de que puede ayudar a facilitar la infiltración del solvente, pueden aumentar la solubilidad de los compuestos de interés (74), bajo estas condiciones se pueden emplear distintos tiempos, factor que también se considera importante (75) con periodos desde minutos hasta horas (41).

Se ha reportado el empleo de estas condiciones para la extracción de compuestos tales como las epicatequinas y procianidinas (73,75), sin embargo en la extracción de compuestos polifenólicos es indispensable considerar la inestabilidad de los compuestos frente a las altas temperaturas (76). Por otro lado, considerando el pH, se puede emplear mezclas de extracción aciduladas con ácidos como ácido acético, ácido cítrico o cualquier acido de tipo orgánico (41).

Debido a la deficiencias del método de extracción con solventes orgánicos (74), y la necesidad de la obtención de mayores cantidades de compuestos, el desarrollo de técnicas para la optimización de los procesos de extracción es un punto clave de interés en la investigación (75), la optimización abarca desde evaluar distintos solventes (77) considerar la aplicación de técnicas más ecológicas (75) hasta el empleo de técnicas que comúnmente se emplean para asistir al proceso de extracción, usando equipos como baños de ultrasonido (41), microondas o empleando la extracción con CO_2 supercrítico (74). La aplicación de estas técnicas, por ejemplo la extracción asistida con ultrasonido presenta ventajas como la reducción de disolventes y del tiempo del proceso (72), lo que permitiría mejorar el aprovechamiento de material vegetal (75), así como la bioactividad de sus metabolitos (72).

5.2. Purificación e identificación

En investigaciones previas se ha determinado la actividad de las procianidinas, la gran capacidad antioxidante que poseen depende de varios factores estructurales como, el grado de polimerización que poseen, el tipo de enlaces que presentan entre sus monómeros (procianidinas de tipo A y tipo B). Además la hidroxilación de sus unidades constitutivas (44) y su estereoquímica mixta, que pueden producir actividades biológicas variadas (78). Por ello resulta de interés identificar las distintas biomoléculas de procianidinas, además que es esencial la comprensión profunda de sus estructuras y las concentraciones que se pueden encontrar en los extractos de distintos alimentos (9).

Previo al proceso de identificación de compuestos, es común realizar técnicas de purificación de los extractos obtenidos, ya que para el estudio de estos compuestos es necesario disponer de ellos en estados puros o en mezclas sencillas. Los principales métodos de purificación utilizados son las técnicas cromatográficas (41,79). Una de las técnicas más utilizadas es la cromatografía en columna, que comúnmente utiliza fases estacionarias como Sephadex LH-20 (79), Poliamida, Dowex o Amberlite (41), entre otras. Sin embargo es importante señalar que estas técnicas permiten obtener únicamente cantidades relativamente pequeñas y además, para separaciones más finas es necesario el uso de técnicas con mayor capacidad de resolución (79).

Para la identificación de procianidinas se han utilizado repetidamente varias técnicas como, la resonancia magnética, dicroísmo circular y especialmente técnicas de espectrometría de masas (80). En la actualidad el uso de estas técnicas de espectrometría de masas acopladas a equipos de HPLC ha permitido la identificación de un gran número de estructuras de procianidinas de distintas matrices (81).

Las técnicas de detección de masas permiten la identificación de los compuestos asignando valores específicos en relación con la masa y la carga, sin embargo para la detección de nuevos compuestos, no existen estándares por lo que es necesario el uso de equipos de masas en tándem que proveen información de la estructura gracias a los patrones de fragmentación de los iones (81).

Las procianidinas poliméricas, que presentan en particular largas cadenas con altos pesos moleculares son muy complejas, lo que dificultan su análisis con los métodos actuales (9,44,78), lo que se espera mejore con avances en cuanto a la sensibilidad de los equipos, poder de resolución, precisión y nuevas funcionalidades, lo que permitirá que sea posible la identificación de procianidinas con grados de polimerización mucho mayores (82).

5.3. Métodos de preservación de procianidinas

Las procianidinas a pesar de su bioactividad son compuestos que pueden ser degradados fácilmente durante su procesamiento, almacenamiento o transporte (80), además que pueden ser afectadas por ciertos factores ambientales como la luz, el oxígeno, la temperatura y el pH (83,84), por lo que resulta difícil su manipulación (85), por ello se considera indispensable el usos de técnicas para la preservación de estos compuestos lábiles.

Una de las soluciones para la preservación de compuestos es la microencapsulación, ya que es una tecnología que permite atrapar una sustancia en un agente de recubrimiento para producir microcápsulas (86), protegiendo el material de condiciones desfavorables (87), manteniendo su biodisponibilidad, bioactividad (84,88) y mejorando su estabilidad (89). Además que es una técnica utilizada para crear barreras para mejorar olores y sabores desagradables (90,91), otra ventaja es que esta tecnología permite alargar la vida útil (87) y lograr una liberación controlada de los compuestos (87,91).

Existen distintas técnicas de microencapsulación, que se clasifican en general como métodos físicos, químicos y fisicoquímicos (92). Todos poseen funcionamiento, ventajas y desventajas distintas, sin embargo, su objetivo principal es proteger el material del núcleo (93). Por ello la selección de este método, depende principalmente de la sustancia a encapsular y de las características deseadas de la microcápsula (92).

Por otro lado, los materiales utilizados como agentes de encapsulación también son variados, principalmente son distintos tipos de gomas, carbohidratos, celulosas, lípidos, proteínas y materiales inorgánicos (92). Para la encapsulación de compuestos polifenólicos como las procianidinas se suele combinar estos diferentes agentes encapsulantes con las distintas técnicas de encapsulación de acuerdo con las características requeridas. En la Tabla 5, se muestra las distintas técnicas y agentes encapsulantes que se han empleado para la encapsulación de este tipo de compuestos.

Tabla 5. Métodos utilizados para la encapsulación de compuestos polifenólicos y procianidinas.

Técnica	Compuesto	Material de pared	Referencia
Secado por aspersión	Procianidinas	Goma arábiga y maltodextrina	(94)
	Polifenoles y antocianinas	Goma arábiga, goma guar y polidextroza	(95)
	Polifenoles	Goma arábiga	(96)
		Maltodextrina y leche desnatada	(93)
Liofilización	Polifenoles totales	Maltodextrina y proteína de soja	(97)
	Fenoles y flavonoides	Maltodextrina	(71)
Coacervación	Procianidinas	Gelatina y alginato de sodio	(80)
Nanoliposomas	Procianidinas	Colesterol y lecitina de soja	(98)
Liposomas	Procianidinas	Lecitina de soja	(99)
		Lecitina de huevo y colesterol	(83)
Copolimerización	Procianidinas	Quitosano	(90)
Extrusión	Proantocianidinas	Alginato de sodio	(84)
Emulsiones	Procianidinas	Aceite y agua	(100)
Encapsulación electrohidrodinámica	Compuestos polifenólicos	Zeína	(101)
Microencapsulación	Antocianinas	Maltodextrina y goma arábiga	(102)

6. Digestión de las procianidinas

Los efectos de los alimentos en la salud humana, así como la respuesta fisiológica, son de gran interés para la comunidad científica, y para obtener más información se han desarrollado estrategias como el estudio de los alimentos siguiendo con detalle los complejos procesos de la digestión (103,104).

6.1. Digestión *in vivo*

La digestión es un proceso continuo y dinámico (105), donde ocurre la trasformación de los alimentos ingeridos en moléculas sencillas para una fácil absorción, para la obtención de energía y creación y reparación de tejidos (106,107). La digestión se divide principales en dos procesos que ocurren simultáneamente (107,108):

1) Trasformación mecánica que descompone los alimentos en partículas más pequeñas.
2) Transformación química, donde intervienen distintos compuestos que descomponen las macromoléculas para poder ser absorbidas en el torrente sanguíneo.

Los procesos químicos de transformación se dividen en tres principales faces: oral, gástrica e intestinal (105,106).

6.1.1. Digestión oral

La digestión oral es el primer paso del proceso de la digestión y tienen lugar en la boca, donde se produce la masticación, triturado de los alimentos y el mezclado con la saliva (106,109), además de la acción de ciertas enzimas, que tienen la capacidad de modificar parcialmente los alimentos (105), principalmente la α-amilasa (109) y la lipasa (106). En los alimentos sólidos se produce una reducción del tamaño y la formación del bolo alimenticio, mientras que los alimentos líquidos pueden ser vaciados directamente (105).

6.1.2. Digestión gástrica

La digestión gástrica se lleva a cabo en el estómago, este órgano tiene cuatro funciones principales: almacenamiento, mezcla, triturado y vaciado (105). Además, en esta etapa actúan ciertas enzimas como la pepsina, y las secreciones de ácido clorhídrico disminuyendo el pH para llevarse a cabo la hidrolisis proteica (106). En este lugar se llevan a cabo movimientos de contracción y relajación que provocan la reducción del tamaño de los compuestos de los alimentos y la mezcla con las secreciones gástricas formando el quimo (106).

6.1.3. Digestión intestinal

Esta etapa de la digestión se lleva a cabo en el intestino delgado, el cual tiene dos funciones principales: la digestión y la absorción de nutrientes (105,107). Este es el principal órgano para la absorción de nutrientes debido a que posee una gran superficie de absorción compuesta por vellosidades intestinales y la membrana apical del enterocito por microvellosidades (106), que absorben los nutrientes por difusión simple, facilitada o transporte activo (105,108). En esta etapa las enzimas pancreáticas y otras enzimas digestivas producen la descomposición de las macromoléculas de los alimentos (105).

Posteriormente los componentes que no son absorbidos llegan al intestino grueso para recuperar las sales biliares, absorber agua y electrolitos, también se produce su fermentación y almacenamiento para eliminarse del organismo (106), terminado finalmente el proceso de digestión en el ano.

El estudio de todos estos procesos puede llevarse a cabo mediante métodos o modelos estáticos y dinámicos *(in vitro)* o modelos animales y humanos *(in vivo)* (103), modelos *in silico* y modelos *ex vivo* (106).

Los estudios *in vivo* permiten estudiar de forma directa la absorción de los nutrientes o sus metabolitos, con una mejor estimación de la biodisponibilidad, sin embargo, presentan ciertas limitaciones, como costes elevados, alta complejidad, procesos no justificables por motivos ético, entre otras (104,106,110). Además de que poseen poca repetividad debido a las posibles variaciones individuales (105) por ello es de suma importancia la disponibilidad de modelos *in vitro* que simulen los procesos de digestión con precisión (107).

6.2. Digestión *in vitro*

El estudio de la digestión de los alimentos se podría considerar ideal y preciso realizarse *in vivo*, sin embargo, como se mencionó anteriormente estos estudios presentan grandes retos, por lo que existe un creciente interés en el diseño de métodos de digestión *in vitro* cada vez más precisos (105,108), interés que han surgido principalmente en las últimas décadas (107).

Los modelos de digestión *in vitro* han sido utilizados ampliamente para el estudio de distintos compuestos bioactivos y poseen

grandes ventajas como sencillez, rapidez y son procesos que permiten al investigador controlar distintas condiciones y variables del proceso (106), además que no tienen restricciones éticas (105,107).

Dependiendo del objetivo del estudio, la digestión simulada puede incluir la fase oral, gástrica y del intestino delgado, y en algunos casos la fermentación del intestino grueso (107). Las técnicas de digestión *in vitro* permiten el estudio de la digestibilidad, la liberación y la interacción de distintos compuestos además de que estas tecnologías son imprescindibles para estudiar la bioaccesibilidad y biodisponibilidad de los compuestos de interés (106), actualmente estos métodos proporcionan un alternativa útil a los modelos animales y humanos (107). Estos modelos se suelen dividir en dos principalmente: modelos estáticos y modelos dinámicos (103,106), estos métodos difieren entre sí en ciertos parámetros (107,108), principalmente por su nivel de complejidad y relevancia fisiológica, son procesos que van desde modelos estáticos simples, de un paso, hasta modelos dinámicos multicompartimentales, que simulan distintos procesos simultáneamente (105,107,108).

6.2.1. Modelos estáticos

Estos métodos emplean herramientas estáticas simulando las fases de la digestión mediante la sucesión de recipientes agitados con un único conjunto de condiciones (105). Son especialmente fácil de usar, económicos y generalmente no requieren de equipos específicos (103). Sin embargo, estos modelos pretenden simplificar procesos fisiológicos muy complejos (111) y no son capaces de reproducir con precisión condiciones *in vivo* complejas (107), ya que no consideran los aspectos dinámicos del proceso digestivo (103,104), que pueden ser factores de gran impacto para la descomposición de las partículas y liberación de nutrientes (107), además que resulta difícil la comparación de resultados entre estudios (103,108).

6.2.2. Modelos dinámicos

Estos modelos son diseñados por la necesidad de procesos más precisos, ya que, a diferencia de los modelos estáticos, estos permiten simular aspectos dinámicos (105). Este método permite simular los cambios fisiológicos en la digestión producidos por factores como el pH, temperatura, movimientos peristálticos, concentraciones variables de enzimas, las secreciones continuas de fluidos, entre otros (105,106). También existen distintos modelos dinámicos de digestión y los principales factores que se consideran para diferenciarse son i) la geometría, ya sea alineación vertical o horizontal, ii) la bioquímica, dependiendo de las diferentes secreciones digestivas y iii) las fuerzas físicas aplicadas (107).

Como se mencionó anteriormente, se han desarrollado distintos sistemas de digestión *in vitro* que tienen una amplia variedad de aplicaciones por lo que es indispensable la cuidadosa selección del tipo de métodos de digestión en función de objetivo del estudio (105).

6.3. Digestión de polifenoles y procianidinas

Los efectos biológicos que se han descrito de compuestos como los polifenoles y las procianidinas dependen en gran parte de su biodisponibilidad y que lleguen activos a los tejidos objetivos. (112,113). Estas propiedades puede afectarse por factores del proceso de digestión (106,114). Por lo tanto, es de importancia conocer plenamente los procesos de metabolismo y absorción de estos compuestos. Lamentablemente estos conocimientos no son muy amplios, y es poca la información que se tiene consecuencia a la

falta de investigación, principalmente enfocado a las procianidinas (112).

Las propiedades físico-químicas de los polifenoles son factores de gran importancia que condicionan los procesos de distribución, absorción, metabolismo y excreción de estos compuestos (106,112) ya que condicionan aspectos como la hidrosolubilidad, peso molecular, su estructura química, grado de polimerización o de conjugación (106).

En el proceso de digestión de compuestos como los polifenoles, el primer paso es la liberación de la matriz alimentaria para poder interactuar con las vellosidades del intestino delgado y poder ser absorbidos (103). Es importante mencionar que la matriz alimentaria en la que se encuentran los compuestos es un factor de suma importancia en el proceso de digestión ya que previo a la liberación pueden darse interacciones directas con otros componentes y modificar su liberación, biodisponibilidad o proceso de absorción (106,112), es aquí donde resaltan las ventajas de los procesos de encapsulación que pueden proteger a los compuestos de factores como el proceso de ingesta, la acción de ciertas enzimas digestivas así como de factores ambientales adversos (115).

Una vez liberados, los compuestos sufren distintos cambios debido a factores físico-químicos y mecánicos propios del proceso de la digestión que ya se han mencionados anteriormente (106). En los alimentos, los compuestos polifenólicos pueden encontrarse en forma glicosilada, esterificada o formando polímeros (106). Las procianidinas en particular se encuentran comúnmente con diferentes grados de polimerización (9) y elevados pesos moleculares (112). Para poder ser absorbidos estos compuestos deben ser hidrolizados, proceso que generalmente ocurre en el intestino delgado, pero también puede ser realizado parcialmente en fases previas de la digestión como en la fase oral, por enzimas como la β-glucosidasa (106), o de lo contrario también puede ocurrir en el intestino grueso dependiendo del grado de complejidad de la molécula.

Es importante mencionar que la degradación de las procianidinas por el tránsito digestivo depende de la naturaleza de estas ya que debido a la complejidad de la estructura de la mayoría de las procianidinas, resisten los procesos de hidrólisis ácida de la fase digestiva del estómago llegando intactos al intestino delgado (112,116). Donde su absorción es limitada, por lo que pueden llegar hasta el intestino grueso, donde pueden ser metabolizadas por la microbiota (106,112,113), dando lugar a reacciones adicionales como desglucosidacion, hidrólisis, deglucuronidación y desmetilación (103,112). Dando lugar a productos que pueden ser absorbidos en este sitio (103), o bien pueden ser eliminados en las heces (112).

Sin embargo hay estructuras de monómeros que pueden ser absorbidos fácilmente en el intestino delgado y así como algunas estructuras oligoméricas, que si sufren degradaciones transformándose en moléculas de menor peso molecular (106). Se han realizado estudios que muestran que estructuras de dímeros como las procianidinas B3 y trímeros como las procianidinas C2 al igual que el monómero de (+) -catequina son capaces de atravesar el epitelio intestinal (112–114,117). Sin embargo, el destino metabólico de procianidinas con grados de polimerización mayores a los trímeros en gran parte sigue sin estar claro. Además, que aún se desconoce gran parte de los cambios que pueden sufrir las procianidinas en el proceso de digestión, fuera de la degradación de las moléculas, es importante conocer los posibles cambios o perdidas que ocurren en las propiedades bioactivas que poseen.

Una vez que ya son absorbidos, los polifenoles pueden alcanzar tejidos individuales, donde son metabolizados, el hígado es el principal órgano (109). Estos compuestos pueden sufrir tres tipos de procesos de conjugación: metilación, sulfatación y glucuronidación (112). Además sufren reacciones que aumentan su capacidad hidrofílica, permitiendo su eliminación biliar o son transportados al riñón para posteriormente ser distribuidos por la circulación sistémica a los tejidos periféricos (106), o para su eliminación por la orina (109,118), simultáneamente puede ocurrir procesos donde las estructuras conjugadas regresan al intestino delgado a través de transporte enterohepático vía biliar, donde pueden ser reabsorbidos (106,109). La figura número 1 muestra de forma general del proceso de digestión, trasporte, absorción y eliminación de los polifenoles.

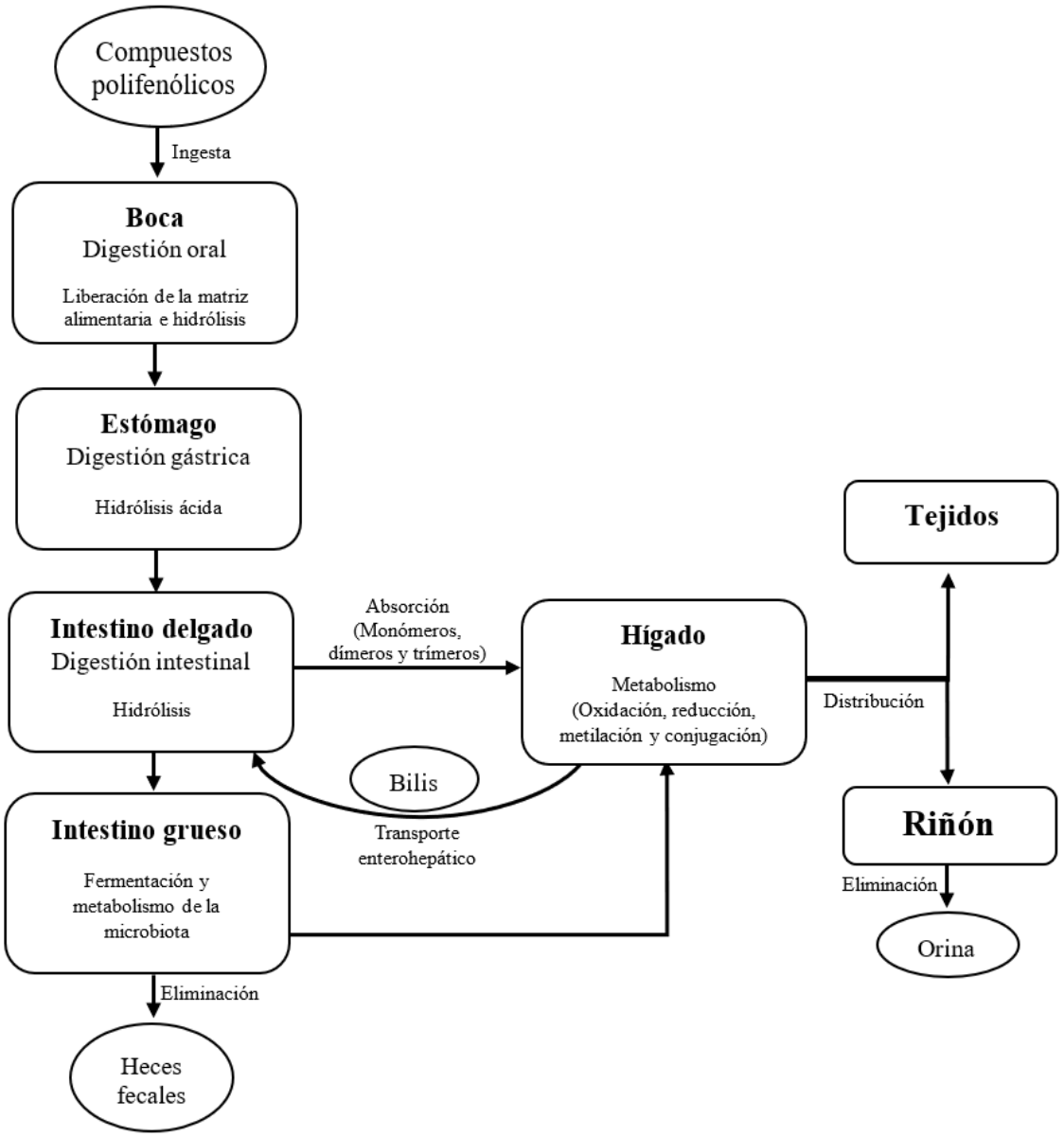


Figura 1. Proceso general de la digestión de compuestos polifenólicos. Elaboración propia.

6.4. Metabolitos obtenidos por la digestión

Las procianidinas en fases de la digestión previas a la absorción pueden sufrir procesos que rompen sus enlaces en compuestos con grados de polimerización menores o incluso en sus unidades constitutivas, la catequina y epicatequina (10,16,109). Las procianidinas que llegan hasta el intestino grueso pueden ser metabolizadas en varios ácidos aromáticos por la microbiota intestinal, los metabolitos obtenidos son principalmente derivados del ácido fenilpropiónico, fenilacético, fenilvalérico y benzóico con diferentes grados de hidroxilación (112). Además, las procianidinas en el hígado pueden sufrir procesos de oxidación, reducción, metilación y conjugación (109).

En este sitio también, los polifenoles sufren procesos de degradación, hidrolizando los glucósidos en agliconas (109), y metabolizando las agliconas en ácidos aromáticos (103,112).

Dependiendo de la estructura se producen distintos compuestos, de los flavonoles se produce el ácido hidroxifenilacético, de las flavanonas y flavonas el ácido hidroxifenilpropiónico y de los flavanoles los fenilvalerolactonas y ácido hidroxifenilpropiónico. Estos pueden ser metabolizados hasta derivados del ácido benzoico (112).

7. Conclusión

La obtención de compuestos a partir de residuos agroindustriales es una estrategia que promete grandes beneficios para distintas áreas, principalmente por las propiedades bioactivas y la gran variedad de aplicaciones que tienen compuestos como las procianidinas. Compuestos polifenólicos estructuralmente diversos, de los cuales se ha comprobado ampliamente distintas propiedades bioactivas y su presencia en distintos residuos agroindustriales, tal es el caso de la cáscara de litche y pulpa de café. No obstante procesos como la digestión y absorción de estos compuestos continúan siendo áreas de escasa información, mucho menos en combinacion con procesos de conserbación como la microencapsulación, que puede ayudar a la protección de dichos compuestos que comunmente son altamente inestables.

8. Referencias

1. Tomas-Barberán FA. Los polifenoles de los alimentos y la salud. Aliment Nutr y Salud. 2003;10(2):41–53.

2. Dimitric Markovic JaM, Boris P, Dejan M, Amić D, Begović N, Mojović M, et al. Antiradical activity of delphinidin , pelargonidin and malvin towards hydroxyl and nitric oxide radicals : the energy requirements calculations as a prediction of the possible antiradical mechanisms. Food Chem. 2016.

3. Rasouli H, Farzaei MH, Khodarahmi R. Polyphenols and their benefits : A review. Int J Food Prop. 2017;20(2):1700–41. Available from: https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1354017

4. Valencia-Avilés E, Ignacio-Figueroa I, Sosa-Martínez E, Bartolomé-Camacho MC. Polyphenols: antioxidant and toxicological properties. Rev la Fac Ciencias Químicas. 2017;16(10):15–29.

5. Cory H, Passarelli S, Szeto J, Tamez M, Mattei J. The Role of Polyphenols in Human Health and Food Systems: A Mini-Review. Front Nutr. 2018;5(09):1–9.

6. Quiñones M, Miguel M, Aleixandre A. Los polifenoles, compuestos de origen

natural con efectos saludables sobre el sistema cardiovascular. Nutr Hosp. 2012;27(1):76–89.

7. Castro Acosta M. Polifenoles: compuestos bioactivos con efectos beneficos en la prevención de diabetes tipo 2. REDCieN - Cienc y Nutr. 2019;1(3):6.

8. Lujano E, Manganiello L, Contento A, Ríos Á. Identification and quantification of (+) - Catechins and Procyanidins in cocoa from Ocumare de la Costa, Venezuela. Rev Ing. 2019;26(2):192–201.

9. Rue EA, Rush MD, Van Breemen RB. Procyanidins: a comprehensive review encompassing structure elucidation via mass spectrometry. Phytochem Rev. 2018;17(1):1–16.

10. Martins GR, Rafael F, Amaral L, Brum FL, Mohana- R, Moura SST De, et al. Chemical characterization, antioxidant and antimicrobial activities of açaí seed (Euterpe oleracea Mart.) extracts containing A- and B-type procyanidins. LWT - Food Sci Technol. 2020;109830. Available from: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109830

11. Hou K, Wang Z. Application of Nanotechnology to Enhance Adsorption and Bioavailability of Procyanidins : A Review Application of Nanotechnology to Enhance Adsorption and Bioavailability of Procyanidins : A Review. Food Rev Int. 2021;00(00):1–15. Available from: https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1888970

12. Ottaviani JI, Heiss C, Spencer JPE, Kelm M, Schroeter H. Molecular Aspects of Medicine Recommending fl avanols and procyanidins for cardiovascular health : Revisited. Mol Aspects Med. 2018;30:1–13. Available from: https://doi.org/10.1016/j.mam.2018.02.001

13. Ngamsuk S, Huang TC, Hsu JL. Determination of phenolic compounds, procyanidins, and antioxidant activity in processed coffea Arabica L. leaves. Foods. 2019;8(9):1–13.

14. Li X, He C, Song L, Li T, Cui S, Zhang L, et al. Antimicrobial activity and mechanism of Larch bark procyanidins against Staphylococcus aureus. Oxford. 2017;49(10):1058–66.

15. Ullah C, Unsicker SB, Fellenberg C, Constabel CP, Schmidt A, Gershenzon J, et al. Flavan-3-ols Are an Effective Chemical Defense against. Plant Physiol. 2017;175(12):1560–78.

16. Bourvellec C Le, Bagano P, Boas V, Lepercq P, Comtet-marre S, Auffret P, et al. Procyanidin — Cell Wall Interactions within Apple Matrices Decrease the Metabolization of Procyanidins by the Human Gut Microbiota and the Anti-Inflammatory Effect of the Resulting Microbial Metabolome In Vitro. Nutrients. 2019;11:664.

17. Liu R, Shi C, Song Y, Wu T, Zhang M. Impact of oligomeric procyanidins on wheat gluten microstructure and physicochemical properties. Food Chem. 2018; Available from: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.03.103

18. Wong-Paz JE, Guyot S, Aguilar-Zárate P, Muñiz-Márquez DB, Contreras-Esquivel JC, Aguilar CN. Structural characterization of native and oxidized procyanidins (condensed tannins) from coffee pulp (Coffea arabica) using phloroglucinolysis and thioglycolysis-HPLC-ESI-MS. Food Chem. 2021;340(05):127830. Available from: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127830

19. Rohr GE, O S, B M. ANALYSIS OF PROCYANIDINS. Stud Nat Prod Chem. 2000;21(1):497–570.

20. Auger C, Al-Awwadi N, Bornet A, Rouanet J-M, Gasc F, Cros G, et al. Catechins and procyanidins in Mediterranean diets. Food Res Int. 2004;37:233–45.

21. Poupard P, Sanoner P, Baron A, Renard CMGC, Guyot S. Characterization of procyanidin B2 oxidation products in an apple juice model solution and confirmation of their presence in apple juice by high-performance liquid chromatography coupled to electrospray ion trap mass spectrometry. J Mass Spectrom. 2011;46(11):1186–97.

22. Miranda-hernández AM, Muñiz-márquez DB, Wong-paz JE, Aguilar-zárate P, Rosa-hernández M De, Larios-cruz R, et al. Characterization by HPLC – ESI – MS 2 of native and oxidized procyanidins from litchi (Litchi chinensis) pericarp. Food Chem. 2019;291(04):126–31. Available from: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.04.020

23. Sui Y, Li X, Li S, Xie B, Sun Z. Fitoterapia Characterization and preparation of oligomeric procyanidins from Litchi chinensis pericarp. Fitoterapia. 2016;112:168–74. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.fitote.2016.06.001

24. Wong Paz JE, Guyot S, Contreras Esquivel JC, Aguilar Zarate P, Rodriguez Herrera R, Aguilar CN. Separation of coffee pulp bioactive phenolic compounds by MPLC fractionation and identification by HPLC-ESI-MS. 2020. p. 217–28.

25. Zhao S, Zhang L, Yang C, Li Z, Rong S. Procyanidins and Alzheimer ' s Disease. Mol Neurobiol. 2019.

26. Rodriguez-Mateos A, Weber T, Skene SS, Ottaviani JI, Crozier A, Kelm M, et al. Assessing the respective contributions of dietary flavanol monomers and procyanidins in mediating cardiovascular effects in humans: randomized, controlled, double-masked intervention trial. Am J Clin Nutr. 2018;108:1229–37.

27. Bussy U, May BR, Olanrewaju Y, Hewitt G, Anderson N, Crozier A, et al. Function in foodstu ff s and dietary supplements. Food Funct. 2020;11:131–8.

28. Zou Y, Wu C, Ma C, He S, Brennan CS, Yuan Y. LWT - Food Science and Technology Interactions of grape seed procyanidins with soy protein isolate : Contributing antioxidant and stability properties. LWT - Food Sci Technol. 2019;115(07):108465. Available from: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108465

29. Li S, Yang Y, Li J, Zhu Z, Lorenzo JM, Barba FJ. Increasing Yield and Antioxidative Performance of Litchi Pericarp Procyanidins in Baked Food by Ultrasound-Assisted Extraction Coupled with Enzymatic Treatment. Molecules. 2018;23:1–13.

30. Ho S, Thoo YY, Young DJ, Siow LF. Cyclodextrin encapsulated catechin: Effect of pH, relative humidity and various food models on antioxidant stability. LWT - Food Sci Technol. 2017;85:232–9. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2017.07.028

31. Gu L, Kelm M, Hammerstone Jf, Beecher G, Cunningham D, Vannozzi S, et al. Fractionation of Polymeric Procyanidins from Lowbush Blueberry and Quantification of Procyanidins in Selected Foods with an Optimized Normal-Phase HPLC − MS Fluorescent. Agric Food Chem. 2002;50:4852–60.

32. Hellström JK, Törrönen AR, Mattila PH. Proanthocyanidins in common food products of plant origin. J Agric Food Chem. 2009;57(17):7899–906.

33. Gu L, Kelm MA, Hammerstone JF, Beecher G, Holden J, Haytowitz D, et al. Concentrations of Proanthocyanidins in Common Foods and Estimations of Normal Consumption. J Nutr. 2003;134(3):613–7.

34. Lucarini M, Durazzo A, Romani A, Campo M, Lombardi-Boccia G, Cecchini F. Bio-based compounds from grape seeds: A biorefinery approach. Molecules. 2018;23(8):1–12.

35. Cury R, M KMSA, Sc YM, Martinez M, Esp A, Olivero V, et al. Agroindustriales waste impact , management and exploitation. Rev Colomb Cienc Anim. 2017;9:122–32.

36. Vargas Corredor YA, Ibeth PPL. Use Of Agro-Industrial Waste In Improving The Quality Of The Environment. Rev Fac Ciencias Basicas. 2018;5(1):59–72.

37. Osorio MB. El diseño como estrategia de circularidad en el aprovechamiento de residuos agroindustriales. Designia. 2021;8(2):131–51.

38. Li S, Zhu Z, Pinto CA, Barba FJ, He J, Montesano D, et al. Evaluation of gliadins-diglycosylated cyanidins interaction from litchi pericarp through ultraviolet and fluorescence measurements. Int J Food Prop. 2018;00(00):1–11. Available from: https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1372471

39. Vargas y Vargas M de L, Figueroa Brito H, Tamayo Cortez JA, Toledo López VM, Moo Huchin VM. Aprovechamiento de cáscaras de frutas : análisis nutricional y compuestos bioactivos. Rev Científica Multidiscip Prospect. 2019;26(2).

40. Venkitasamy C, Zhao L, Zhang R, Pan Z. Chapter 6 - Grapes. In: Integrated Processing Technologies for Food and Agricultural By-Products. Elsevier Inc.; 2019. p. 133–63. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-814138-0.00006-X

41. Bartolomé Sualdea B, Monagas Juan M, Garrido Lafuente I, Lebrón Aguilar R, Gómez-Cordovés de la Vega MC, Quintela Fernández JC, et al. Extractos

fenólicos de piel de almendra conteniendo procianidinas, propelargonidinas y prodelfi- nidinas, y su procedimiento de obtención. Of ESPAÑOLA Pat Y MARCAS. 2010.

42. Isaza Misas SP, Jaramillo Rojas MA, Mora Arango CL. Antioxidant activity in blackberry and avocado byproducts: preliminary identification of its potential in the development of ingredients with industrial applications.

43. Emanuele S, Lauricella M, Calvaruso G, D'Anneo A, Giuliano M. Litchi chinensis as a functional food and a source of antitumor compounds: An overview and a description of biochemical pathways. Nutrients. 2017;9(9).

44. Zhu X rong, Wang H, Sun J, Yang B, Duan X wu, Jiang Y ming. Pericarp and seed of litchi and longan fruits: constituent, extraction, bioactive activity, and potential utilization. J Zhejiang Univ Sci B. 2019;20(6):503–12.

45. Hurrell JA, Delucchi G. Frutas. XV. 2010. 132 p.

46. Deepak G. Secondary Metabolite Credentials and Biological Properties of Litchi chinensis. Lychee Biotechnol. 2017;1–448.

47. Delegación SADER SL. Fruta de temporada lichi. 2018. Available from: https://www.gob.mx/agricultura/sanluispotosi/articulos/fruta-de-temporada-lichi?idiom=es

48. Garza Nuñez A, Cruz Hernandez M. El Litchi , Una Alternativa de producción para la huasteca potosina. SAGARPA. 2001. p. 31.

49. Zhao L, Wang K, Wang K, Zhu J, Hu Z. Nutrient components, health benefits, and safety of litchi (Litchi chinensis Sonn.): A review. Compr Rev Food Sci Food Saf. 2020;19(4):2139–63.

50. Valencia-Hernandez LJ, Wong-Paz JE, Ascacio-Valdés JA, Chávez-González ML, Contreras-Esquivel JC, Aguilar CN. Procyanidins : From Agro-Industrial Waste to Food as Bioactive Molecules. Foods. 2021;10:3152.

51. Punia S, Kumar M. Litchi (Litchi chinenis) seed: Nutritional profile, bioactivities, and its industrial applications. Trends Food Sci Technol. 2021;108(11):58–70. Available from: https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.12.005

52. Araújo Garcia CC, Souza Santos V, Ferreira Almeida ME. ACEITAÇÃO DA FARINHA DE LICHIA E SEU EFEITO NO EMAGRECIMENTO DE. Rev Bras Obesidade , Nutr e Emagrecimento. 2015;9(52):158–66.

53. Liu L, Xie B, Cao S, Yang E, Xu X, Guo S. Food Chemistry A-type procyanidins from Litchi chinensis pericarp with antioxidant activity. Food Chem. 2007;105:1446–51.

54. Li S, Xiao J, Chen L, Hu C, Chen P, Xie B, et al. Identification of A-series oligomeric procyanidins from pericarp of Litchi chinensis by FT-ICR-MS and LC-MS. Food Chem. 2012;135(1):31–8. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.04.039

55. Gong Y, Fang F, Zhang X, Liu B, Luo

H, Li Z, et al. B type and complex A/B type epicatechin trimers isolated from litchi pericarp aqueous extract show high antioxidant and anticancer activity. Int J Mol Sci. 2018;19(1).

56. Li X, Sui Y, Li S, Xie B, Sun Z. A-type procyanidins from litchi pericarp ameliorate hyperglycaemia by regulating hepatic and muscle glucose metabolism in streptozotocin (STZ)-induced diabetic mice fed with high fat diet. J Funct Foods. 2016;27:711–22. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.jff.2016.08.010

57. Li X, Wu Q, Sui Y, Li S, Xie B, Sun Z. Dietary supplementation of A-type procyanidins from litchi pericarp improves glucose homeostasis by modulating mTOR signaling and oxidative stress in diabetic ICR mice. J Funct Foods. 2018;44(04):155–65. Available from: https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.12.024

58. Araújo Teles TN, Tavares Cavlcanti Liberato M da C, Souza AA. Avaliação fitoquímica, quantificação de fénois totais, flavanóides e atividade antioxidante do extrato etanólico do grão do café (Coffea.L.), da variedade typica produzido nas áreas sobreadas na serra do maciço de Baturité no Ceará. In: Andrade DF, editor. Produção Acadêmica do Laboratório de Bioquímica e Biotecnologia da Universidade Estadual do Ceará. 1st ed. 2021. p. 112–37.

59. Arredondo Gómez A, Ávila Ayala R, Muñoz Gutiérrez L. Diagnóstico del viverismo en la Huasteca Potosina. SAGARPA. San Luis Potosí, S.L.P.; 2012.

60. Hernández Montoya DA. Efecto in vitro de la fibra dietaria antioxidante de café (Coffea arabica L.) usado sobre el metabolismo colónico. Universidad Autónoma de Querétaro; 2021.

61. Aristizábal CE, Vargas AF, Alvarado PN. Numerical determination of the correct solvents to extract a phytochemical from coffee pulp using Hansen solubility parameters , risk assessment , sustainability evaluation , and economic analysis. Determinación numérica de los disolventes correctos para. DYNA. 2019;86(211):138–47.

62. Magoni C, Bruni I, Guzzetti L, Dell'Agli M, Sangiovanni E, Piazza S, et al. Valorizing coffee pulp by-products as anti-inflammatory ingredient of food supplements acting on IL-8 release. Food Res Int. 2018;112:129–35. Available from: https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.06.026

63. Rebollo-Hernanz M, Cañas S, Taladrid D, Benítez V, Bartolomé B, Aguilera Y, et al. Revalorization of coffee husk: Modeling and optimizing the green sustainable extraction of phenolic compounds. Foods. 2021;10(3).

64. Sangta J, Wongkaew M, Tangpao T, Withee P, Haituk S, Arjin C, et al. Recovery of Polyphenolic Fraction from Arabica Coffee Pulp and Its Antifungal Applications. Plants. 2021;10(07):1422.

65. Atila F. A Useful Way to Dispose of Phenolic-rich Agro- industrial Wastes : Mushroom Cultivation. Eur J Eng Nat Sci. 2019;3(2):32–41.

66. Echeverria MC, Nuti M. Valorisation

of the Residues of Coffee Agro-industry: Perspectives and Limitations. Open Waste Manag J. 2017;10(1):13–22.

67. Serna-Jiménez JA, Torres-Valenzuela LS, Martínez Cortínez K, Hernández Sandoval MC. Aprovechamiento de la pulpa de café como alternativa de valorización de subproductos. Rev ION. 2018;31(1):37–42.

68. Noriega Salazar A, Silva Acuña R, García de Salcedo M. Uso potencial en la alimentación animal Revisión Utilización de la pulpa de café en la alimentación animal. Zootec Trop. 2018;26(4):411–9.

69. Ramirez-Coronel MA, Marnet N, Kolli VSK, Roussos S, Guyot S, Augur C. Characterization and Estimation of Proanthocyanidins and Other Phenolics in Coffee Pulp (Coffea, arabica) by Thiolysis-High-Performance Liquid Chromatography. J Agric Food Chem. 2004;52(5):1344–9.

70. Farah A, Donangelo CM. Phenolic compounds in coffee. Brazilian J Plant Physiol. 2006;18(1):23–36.

71. Ballesteros LF, Ramirez MJ, Orrego CE, Teixeira JA, Mussatto SI. Encapsulation of antioxidant phenolic compounds extracted from spent coffee grounds by freeze-drying and spray-drying using different coating materials. Food Chem. 2017;237:623–31.

72. Li H, Tan Y, Zhang Z, Xia Y, Li X, Cui L, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction of procyanidins from perilla seed hull and their antioxidant activities in vitro. Food Sci Technol. 2019;2061(06):378–87.

73. Bustos-hipólito E, Legorreta-siañez AV, Luisa A, Garfias J, González-gonzález LR, Arenas-huertero FJ. Effect of the extraction solvent on the bioactivity and antioxidant capacity of apple peel extracts. Investig Univ Multidiscip. 2012;11:123–30.

74. Dong ZY, Wang HH, Li MY, Liu W, Zhang TH. Optimization of high-intensity pulsed electric field-assisted extraction of procyanidins from Vitis amurensis seeds using response surface methodology. E3S Web Conf. 2020;189:02029.

75. Rivero Granados FJ. Aprovechamiento de semillas de uva sobremaduras para la mejora del color de vinos tintos elaborados en clima cálido. Universidad de Sevilla; 2019.

76. Khanal RC, Howard LR, Prior RL. Effect of heating on the stability of grape and blueberry pomace procyanidins and total anthocyanins. Food Res Int. 2010;43(5):1464–9. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2010.04.018

77. Alrugaibah M, Yagiz Y, Gu L. Use natural deep eutectic solvents as efficient green reagents to extract procyanidins and anthocyanins from cranberry pomace and predictive modeling by RSM and artificial neural networking. Sep Purif Technol [Internet]. 2021;255(06):117720. Available from: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117720

78. Rush MD, Rue EA, Wong A, Kowalski P, Glinski JA, Breemen RB

van. Rapid Determination of Procyanidins Using MALDI-ToF/ToF Mass Spectrometry. J Agric Food Chem. 2019;66(43):11355–61.

79. Gutierrez-docio A, Almod P, Moreno-fernandez S, Silvan JM, Martinez-rodriguez AJ, Alonso GL, et al. Evaluation of an Integrated Ultrafiltration / Solid Phase Extraction Process for Purification of Oligomeric Grape Seed Procyanidins. Membranes (Basel). 2020;10:147.

80. Tie S, Zhang X, Wang H, Song Y, Tan M. Procyanidins-Loaded Complex Coacervates for Improved Stability by Self-Crosslinking and Calcium Ions Chelation. J Agric Food Chem. 2020;68(10):3163–70.

81. De la Rosa LA, Álvarez-Parrilla E, García-Fajardo JA. Identificación de compuestos fenólicos en extractos de almendra (Prunus dulcis) y nuez pecana (Carya illinoinensis) mediante cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas en tándem (HPLC-MS/MS). TIP Rev Espec en Ciencias Químico-Biológicas. 2019;22:1–13.

82. Rue EA, Rush MD, Breemen RB. Procyanidins: a comprehensive review encompassing structure elucidation via mass spectrometry. Physiol Behav. 2019;173(3)(1):665–76.

83. Luo M, Zhang R, Liu L, Chi J, Huang F, Dong L, et al. Preparation, stability and antioxidant capacity of nano liposomes loaded with procyandins from lychee pericarp. J Food Eng. 2020;284(04):110065. Available from: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110065

84. Li Q, Shi J, Liu L, McClements DJ, Duan M, Chen X, et al. Encapsulation of fruit peel proanthocyanidins in biopolymer microgels: Relationship between structural characteristics and encapsulation/release properties. Food Hydrocoll [Internet]. 2021;117(1):106693. Available from: https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106693

85. Zhang L, Mou D, Du Y. Procyanidins: Extraction and micro-encapsulation. J Sci Food Agric. 2007 Sep;87(12):2192–7.

86. Papillo VA, Locatelli M, Travaglia F, Bordiga M, Garino C, Coïsson JD, et al. Cocoa hulls polyphenols stabilized by microencapsulation as functional ingredient for bakery applications. Food Res Int. 2019;115:511–8. Available from: https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.004

87. Assadpour E, Jafari SM. Advances in Spray-Drying Encapsulation of Food Bioactive Ingredients: From Microcapsules to Nanocapsules. Annu Rev Food Sci Technol. 2019;10:103–31.

88. de Souza VB, Thomazini M, Echalar Barrientos MA, Nalin CM, Ferro-Furtado R, Genovese MI, et al. Functional properties and encapsulation of a proanthocyanidin-rich cinnamon extract (Cinnamomum zeylanicum) by complex coacervation using gelatin and different polysaccharides. Food Hydrocoll. 2018;77:297–306.

89. Song J, Jiang L, Peng H, Qi M, Zhang M, Qi J, et al. Microcapsule prepared by extruding starch and procyanidins

inhibited protein oxidation and improved quality of chicken sausages. LWT - Food Sci Technol. 2022;154:112617. Available from: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112617

90. Bi J, Tian C, Zhang GL, Hao H, Hou HM. Novel procyanidins-loaded chitosan-graft-polyvinyl alcohol film with sustained antibacterial activity for food packaging. Food Chem. 2021;365(1):130534. Available from: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130534

91. Poozesh S, Bilgili E. Scale-up of pharmaceutical spray drying using scale-up rules: A review. Int J Pharm. 2019;562(03):271–92. Available from: https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2019.03.047

92. Villena MMJ, Hernández MME, Lara GV, Martínez RMA. Técnicas de microencapsulación: una propuesta para microencapsular. ARS Pharm. 2009;50(1):43–50.

93. Ćujić-Nikolić N, Stanisavljević N, Šavikin K, Kalušević A, Nedović V, Samardžić J, et al. Chokeberry polyphenols preservation using spray drying: effect of encapsulation using maltodextrin and skimmed milk on their recovery following in vitro digestion. J Microencapsul. 2019;36(8):693–703.

94. Santiago-Adame R, Medina-Torres L, Gallegos-Infante JA, Calderas F, González-Laredo RF, Rocha-Guzmán NE, et al. Spray drying-microencapsulation of cinnamon infusions (Cinnamomum zeylanicum) with maltodextrin. LWT - Food Sci Technol. 2015;64(2):571–7.

95. Kuck LS, Zapata Noreña CP. Microencapsulation of grape (Vitis labrusca var. Bordo) skin phenolic extract using gum Arabic, polydextrose, and partially hydrolyzed guar gum as encapsulating agents. Food Chem. 2016;194:569–76.

96. Ćujić-Nikolić N, Stanisavljević N, Šavikin K, Kalušević A, Nedović V, Bigović D, et al. Application of gum Arabic in the production of spray-dried chokeberry polyphenols, microparticles characterisation and in vitro digestion method. Lek sirovine. 2018;38(38):9–16.

97. Papoutsis K, Golding JB, Vuong Q, Pristijono P, Stathopoulos CE, Scarlett CJ, et al. Encapsulation of citrus by-product extracts by spray-drying and freeze-drying using combinations of maltodextrin with soybean protein and ι-carrageenan. Foods. 2018;7(7):1–12.

98. Chen Y, Huang F, McClements DJ, Xie B, Sun Z, Deng Q. Oligomeric procyanidin nanoliposomes prevent melanogenesis and UV radiation-induced skin epithelial cell (HFF-1) damage. Molecules. 2020;25(6):1–16.

99. Toro-Uribe S, López-Giraldo LJ, Decker EA. Relationship between the Physiochemical Properties of Cocoa Procyanidins and Their Ability to Inhibit Lipid Oxidation in Liposomes. J Agric Food Chem. 2018;66(17):4490–502.

100. Berendsen R, Güell C, Ferrando M. A procyanidin-rich extract encapsulated in water-in-oil-in-water emulsions produced by premix membrane emulsification. Food Hydrocoll.

2015;43:636–48.

101. Dicastillo CL, Piña C, Garrido L, Arancibia C, Galotto MJ. Enhancing thermal stability and bioaccesibility of açaí fruit polyphenols through electrohydrodynamic encapsulation into zein electrosprayed particles. Antioxidants. 2019;8(10):464.

102. Akhavan Mahdavi S, Jafari SM, Assadpoor E, Dehnad D. Microencapsulation optimization of natural anthocyanins with maltodextrin, gum Arabic and gelatin. Int J Biol Macromol. 2017;85:379–85.

103. Bohn T, Carriere F, Day L, Deglaire A, Freitas D, Golding M, et al. Correlation between in vitro and in vivo data on food digestion. What can we predict with static in vitro digestion models? Food Sci Nutr. 2018;58(13):2239–61.

104. Brodkorb A, Egger L, Alminger M, Alvito P, Ricardo A, Ballance S, et al. This is a repository copy of INFOGEST static in vitro simulation of gastrointestinal food digestion. Nat Protoc. 2019;14(4):991–1014.

105. Li C, Yu W, Wu P, Dong X. Trends in Food Science & Technology Current in vitro digestion systems for understanding food digestion in human upper gastrointestinal tract. Trends Food Sci Technol. 2020;96(6):114–26. Available from: https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.015

106. Fernandez Jalao I. Influencia de la matriz alimentaria y el procesado en la estabilidad, bioaccesibilidad y metabolismo de compuestos fenólicos naturales en un modelo dinámico de digestión gastrointestinal y fermentación colónica. Universidad Complutense De Madrid; 2020.

107. Lucas-gonzález R, Viuda-martos M, Angel J, Juana F. In vitro digestion models suitable for foods: Opportunities for new fields of application and challenges. Food Res Int. 2018;10(07):02–055. Available from: https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.02.055

108. Berthelsen R, Klitgaard M, Rades T, Müllertz A. In vitro digestion models to evaluate lipid based drug delivery systems ; present status and current trends. Adv Drug Deliv Rev journa. 2019;142:35–49.

109. Serra Maqueda A. Polyphenol metabolism : from in vitro to in vivo approaches. Universitat de Lleida; 2012.

110. Ménard O, Bourlieu C, Oliveira SC De, Dellarosa N, Laghi L, Carrière F, et al. A fi rst step towards a consensus static in vitro model for simulating full-term infant digestion. Food Chem. 2018;240(06):338–45. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.145

111. Egger L, Ménard O, Baumann C, Duerr D, Schlegel P, Stoll P, et al. Digestion ofmilk proteins: Comparing static and dynamic in vitro digestion systems with in vivo data. Food Res Int. 2017;10:12–049. Available from: https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.12.049

112. García Ramírez B. Absorción In Vivo De Oligómeros De Epicatequina.

Universitat Rovira I Virgili.; 2005.

113. Gonthier MP, Donovan JL, Texier O, Felgines C, Remesy C, Scalbert A. Metabolism of dietary procyanidins in rats. Free Radic Biol Med. 2003;35(8):837–44.

114. Shoji T, Masumoto S, Moriichi N, Akiyama H, Kanda T, Ohtake Y, et al. Apple procyanidin oligomers absorption in rats after oral administration: Analysis of procyanidins in plasma using the porter method and high-performance liquid chromatography/tandem mass spectrometry. J Agric Food Chem. 2006;54(3):884–92.

115. Pérez Esteve É, Gómez Llorente H. Sistemas nanoestructurados basados en lípidos para la encapsulación de compuestos bioactivos. Universitat Politècnica de València; 2020. Available from: https://riunet.upv.es/handle/10251/146350

116. Paulos K, Costa JMS, Portugal P V., Spranger MI, Sun BS, Moreira OC, et al. Caracterización Química y Nutricional de los Subproductos de la Vinificación para Aplicacion en la Alimentación de Rumiantes. Soc ESPAÑOLA OVINOTECNIA Y CAPRINOTECNIA. 2005;048:223–37.

117. Yang H, Tuo X, Wang L, Tundis R, Portillo MP, Simal-Gandara J, et al. Bioactive procyanidins from dietary sources: The relationship between bioactivity and polymerization degree. Trends Food Sci Technol. 2021;111(05):114–27. Available from: https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.063

118. San José Barrero F j. Revaluation Of By-Products Of The Vegetal Canning Industry. Obtaining Fibre Of Artichoke And Development Of Digestive Type Biscuit. Universidad De Burgos; 2018.