

# Capacidad antioxidante: conceptos, métodos de cuantificación y su aplicación en la caracterización de frutos tropicales y productos derivados

## Antioxidant capacity: concepts, quantification methods and use for tropical fruits and derived products characterization

José David Mejía-Reyes<sup>1</sup>  Karina Elizabeth García-Cabrera<sup>2</sup> 

Gamaliel Velázquez-Ovalle<sup>3</sup>  Alfredo Vázquez-Ovando<sup>4</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Chiapas  [jdmr94@outlook.com](mailto:jdmr94@outlook.com)

<sup>2</sup>Universidad Autónoma de Chiapas  [karina.garcia70@unach.mx](mailto:karina.garcia70@unach.mx)

<sup>3</sup>Universidad Autónoma de Chiapas  [gamavlz@gmail.com](mailto:gamavlz@gmail.com)

Universidad Autónoma de Chiapas  [jose.vazquez@unach.mx](mailto:jose.vazquez@unach.mx)

Recibido: 01/10/2021 Aceptado:13/10/2021

**Resumen** La capacidad antioxidante se ha convertido en una característica ampliamente demandada en los alimentos contemporáneos. El conocimiento de las moléculas que imparten esta actividad, así como los alimentos donde pueden encontrarse de manera natural, aporta información para el correcto aprovechamiento de estas importantes sustancias. Sin embargo, aún hoy día, los métodos para medir la capacidad antioxidante *in vitro* siguen poco unificados. Aunque existen al menos tres métodos universalmente utilizados, las unidades en la que se expresan los resultados son heterogéneas, lo que dificulta un poco la comparación certera entre muestras de naturaleza similar. El objetivo del presente artículo fue realizar una revisión sobre aspectos fundamentales de la capacidad antioxidante, con énfasis en las moléculas responsables de tal actividad y los métodos disponibles para cuantificarla. Adicionalmente, dado que los alimentos de origen vegetal son la principal fuente natural de compuestos antioxidantes, se incluyen reportes de estudios que cuantifican la capacidad antioxidante de frutos tropicales y de productos o coproductos de éstos..

**Palabras clave:** ABTS, antioxidantes, alimento funcional, frutas tropicales, DPPH, FRAP, Trolox.

**Abstract** Antioxidant capacity has become a widely demanded feature in actually foods. The knowledge of the molecules that contribute this activity, as well as the natural foods where they can be found, provides information for the correct use of these important substances. However, even today, methods for measuring antioxidant capacity *in vitro* remain poorly unified. Although there are at least three universally used methods, the units in which the results are expressed are heterogeneous, which makes accurate comparison between samples of a similar nature somewhat difficult. This review includes a review of basic aspects of antioxidant capacity, with an emphasis on the molecules responsible for such activity and the methods available to quantify it. Additionally, given that foods of plant origin are the main natural source of antioxidant compounds, a brief review is made of studies that quantify the antioxidant capacity of tropical fruits and their products or co-products.

**Keywords:** ABTS, antioxidants, functional food, DPPH, FRAP, superfruits, Trolox.

## Introducción

Los radicales libres son especies químicas que poseen electrones desapareados, por lo que son muy reactivos y tienden a tomar electrones de moléculas estables con el fin de alcanzar su estabilidad electroquímica. La vida media del radical libre es de microsegundos, pero en los organismos vivos, tiene la capacidad de reaccionar con todo lo que esté a su alrededor provocando gran daño a moléculas, membranas celulares y tejidos. Además, cuando los radicales se producen en cantidades excesivas o se acumulan durante años, principalmente debido a contaminantes externos, tienden a deteriorar la salud del organismo vivo (Goodarzi *et al.*, 2018).

También existen otras moléculas no radicales que son agentes oxidantes y/o son fácilmente convertidos a radicales, las cuales se denominan de manera genérica, especies reactivas del oxígeno (ERO). Las ERO incluyen una serie de derivados del oxígeno molecular que se producen de manera regular como parte de la vida aeróbica; pero cuando el aumento del contenido intracelular de ERO sobrepasa las defensas antioxidantes de la célula se produce estrés oxidativo, mediante el cual se produce daño a lípidos, proteínas y ácidos nucleicos (Sies & Jones, 2020). El estrés oxidativo se presenta en diversos estados patológicos en los cuales se altera la funcionalidad celular, contribuyendo o retroalimentando el desarrollo de enfermedades degenerativas como la aterosclerosis, cardiomiopatías, enfermedades neurológicas, cáncer, diabetes, enfermedades cardiovasculares, enfermedades autoinmunes, trastornos neurodegenerativos, envejecimiento, hipertensión, Parkinson, Alzheimer, síndrome de dificultad respiratoria aguda y otras enfermedades (Sies, 2020).

Ante el constante incremento de agentes oxidativos, muchos sistemas biológicos no

pueden compensar de manera autónoma el balance de oxidantes - antioxidantes, por lo que se vuelve necesario ingerir antioxidantes. Un antioxidante es una sustancia capaz de neutralizar la acción oxidante de los radicales mediante la liberación de electrones al medio u otro mecanismo. Generalmente, los antioxidantes son moléculas pequeñas ya sea de origen endógeno y/o exógeno. Los endógenos son aquellos que a causa de la exposición a los radicales libres se desarrollan dentro del organismo, tal es el caso de la remoción a través de la catálisis de radicales por diferentes enzimas como la catalasa y superóxido dismutasa (sistema de defensa enzimático) (Gulcin, 2020); mientras que los exógenos provienen de los alimentos que se ingieren con la dieta como la vitamina E, vitamina C y carotenoides. Otro grupo de moléculas importantes que pueden obtenerse de manera exógena son los compuestos fenólicos (isoflavonas, flavonoides, quercetina, etc.). Por esta razón, la forma más eficiente de suplir los antioxidantes para proteger al organismo del efecto oxidativo producido por los radicales libres es el consumo de alimentos ricos en estos, que permitan amortiguar los efectos causados al daño celular (Bjørklund & Chirumbolo, 2017).

Los frutos son tradicionalmente conocidos como alimentos ricos en antioxidantes, existen una gran cantidad de reportes que muestran los contenidos de compuestos antioxidantes, pero la gran mayoría de los estudios se centran en frutos de regiones templadas, los cuales por su composición química aportan considerablemente a la actividad antioxidante. Son menos los reportes de las sustancias antioxidantes y de la capacidad antioxidante de frutos cosechados en regiones tropicales, o de productos que pueden elaborarse a partir de éstos.

Aunado a lo anterior, hoy día es todavía común encontrar poco consenso sobre cuál o cuáles métodos son los más apropiados para evaluar la actividad antioxidante. Existe también diversidad en la forma de presentar los resultados, lo cual muchas veces complica las comparaciones o incluso las interpretaciones de lo que es la capacidad antioxidante.

Por lo anterior, el objetivo de esta revisión es primeramente hacer un análisis amplio sobre los compuestos responsables de la actividad antioxidante; así como los principales métodos usados para su determinación; posteriormente presentar un resumen de los frutos cultivados en ambientes tropicales y de productos obtenidos de éstos con mayor aporte a la capacidad antioxidante.

## Metodología

Se realizó una revisión exhaustiva de la literatura científica en torno al objetivo. Como palabras clave de búsqueda (tanto en inglés como español) fueron utilizadas, “a saber”, “capacidad antioxidante”, “superfrutas”, “alimentos funcionales”, “DPPH”, “FRAP”, “ABTS”, “frutos tropicales”, “mecanismos antioxidantes”. Como motores de búsqueda se emplearon Google Scholar, Scopus y ScienDirect. Para la selección de los artículos revisados, se establecieron dos criterios: los artículos más relevantes (sin importar el año de publicación) y los artículos más recientes (2015 a la fecha). Con estos criterios se incluyeron alrededor de 250 artículos, los cuales fueron analizados preliminarmente en el resumen y las conclusiones. Después del análisis preliminar del aporte del artículo, se seleccionaron los 108 artículos incluidos en la revisión. Estos, se recopilaron y clasificaron según la temática y se cargaron en el gestor de citas Mendeley para facilitar el proceso de citación. Posteriormente, se realizó la lectura

crítica, la escritura de los encabezados y, finalmente la redacción del manuscrito.

## Resultados y discusiones

### *Sustancias con actividad antioxidante*

Las reacciones de reducción/oxidación son reacciones esenciales en los sistemas biológicos, en el organismo humano se adquiere el oxígeno del aire para la oxidación y para formar energía en forma de ATP. Sin embargo, el oxígeno es un elemento no metálico muy reactivo que forma fácilmente óxidos con la mayor parte de los elementos y compuestos. A pesar de tratarse de una reacción vital, durante la respiración pueden surgir inconvenientes cuando el flujo de electrones se desacopla generando electrones individuales no apareados, o bien conocidos como radicales libres (Maharramova *et al.*, 2018).

Los radicales libres son moléculas o iones con electrones no apareados inestables y activos en las reacciones químicas, ejemplo de ello son las especies reactivas de oxígeno (ERO) y de nitrógeno (ERN), tales como el superóxido, hidroxilo, peróxido, el alcóxido y el óxido nítrico, quienes rápidamente atacan las moléculas de las células cercanas, causando daño inevitable y contribuyendo a la presencia de enfermedades como el síndrome metabólico, cáncer, Alzheimer y problemas cardiovasculares (Fernando *et al.*, 2016). Estas especies reactivas se pueden producir de manera natural a partir del oxígeno atmosférico (Figura 1). Para contender con las adversidades que provocan, son requeridos los antioxidantes, los cuales actúan retrasando o previniendo los procesos oxidativos que dañan a las células.

Entre los principales antioxidantes se encuentran los eliminadores de radicales libres, inhibidores del oxígeno *singlete*, inactivadores

de peróxidos y otras ERO, quelantes de iones metálicos, inhibidores de productos de oxidación secundaria e inhibidores de enzimas pro-oxidativas (Wilson *et al.*, 2017). A grandes rasgos, dependiendo del mecanismo de acción se pueden clasificar como antioxidantes primarios y secundarios; los primarios (como los tocoferoles y compuestos fenólicos) promueven la inhibición de la reacción en

cadena de la oxidación, donando hidrógeno o aceptando radicales libres y promoviendo una generación de radicales más estables; los antioxidantes secundarios evitan o retrasan la oxidación eliminando los promotores de la misma, como los iones metálicos, el oxígeno *singlete*, las enzimas pro oxidantes y otros oxidantes (Wilson *et al.*, 2017).

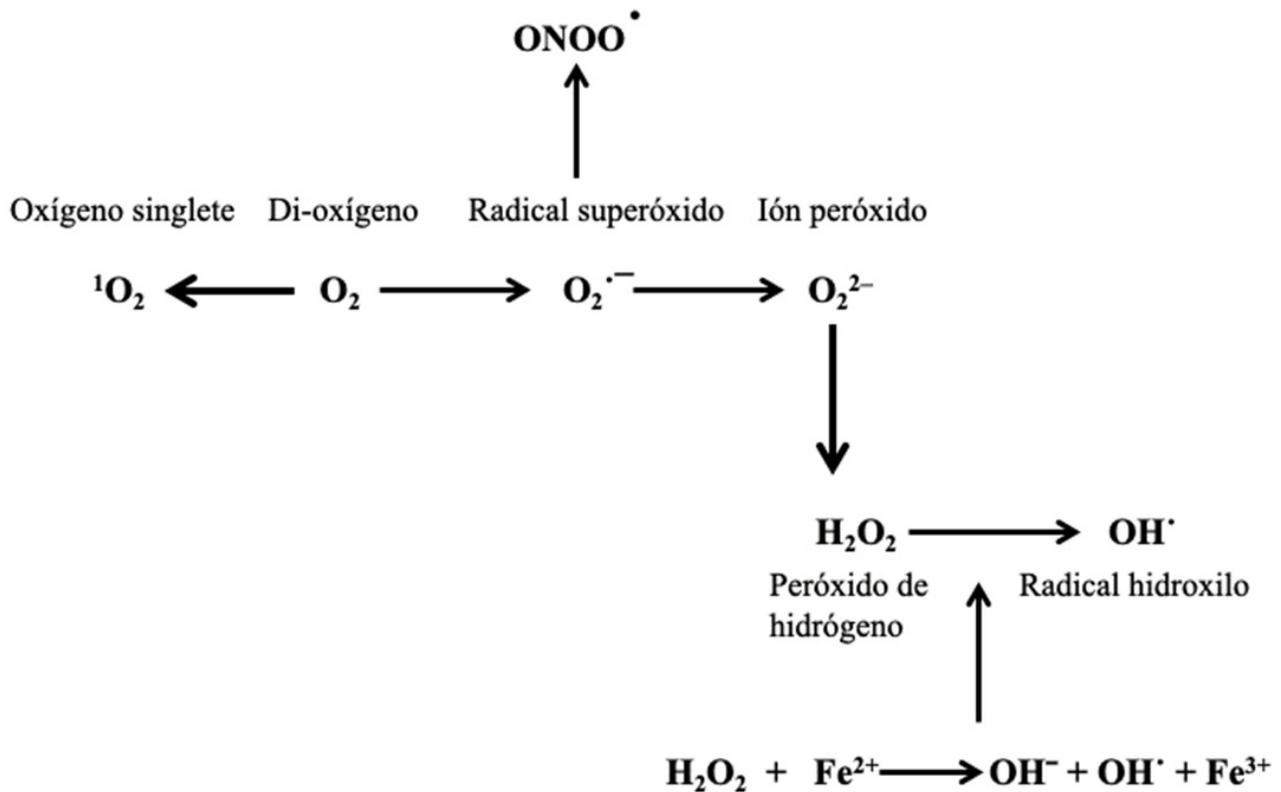


Figura 1

Formación de diferentes especies reactivas de oxígeno (ERO) y especies reactivas de nitrógeno (ERN) a partir del oxígeno atmosférico

Nota: El oxígeno atmosférico (di-oxígeno;  $\text{O}_2$ ) experimenta excitación o reducción para formar oxígeno singlete ( ${}^1\text{O}_2$ ) o radical superóxido ( $\text{O}_2^{\bullet-}$ ), respectivamente. El superóxido se dismuta para formar peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), y el peróxido de hidrógeno interactúa con  $\text{Fe}^{2+}$  y forma radicales hidroxilo ( $\text{OH}^{\bullet}$ ) a través de la reacción de Fenton. Mittler (2017).

Los organismos vivos han desarrollado una serie de mecanismos de defensa, incluyendo la remoción a través de la catálisis de radicales por diferentes enzimas (sistema de defensa enzimático); unión de proteínas a metales que favorecen la oxidación, como el hierro y cobre; protección contra el daño, como las proteínas de choque térmico y, estabilización de radicales libres con donadores de protones o electrones como es el glutatión, vitamina E

y C, bilirrubina y ácido úrico (antioxidantes no enzimáticos) (Dröge, 2002). Se pueden diferenciar en función de su origen, los de origen endógeno, que incluye a las enzimas superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), glutatión peroxidasa (GPX) y compuestos no enzimáticos como el glutatión, compuestos de bajo peso molecular como el ácido úrico, coenzima Q y ácido lipoico. Entre los exógenos (ingresan al organismo a través de la dieta y

son no enzimáticos) como la vitamina C, la vitamina E, los betacarotenos, flavonoides, licopenos, fitoestrógenos, polifenoles, glutatión, ácido úrico, ubiquinol, malatonina (Londoño, 2012).

**Vitamina E.** Es el término colectivo para una serie de isómeros con diversa capacidad antioxidante, incluye cuatro tocoferoles y cuatro tocotrienoles ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - y  $\delta$ ). Estas formas difieren en el número y la posición de los grupos metilo en la estructura del cromanol, todos se encuentran en los alimentos, pero sólo el  $\alpha$ -tocoferol permite abastecer la necesidad de esta vitamina, por lo que se reconoce como la vitamina E (Lee & Han, 2018). Siendo uno de los antioxidantes lipídicos, sino el más importante, gracias a su capacidad para captar el oxígeno, la actividad antioxidante de la vitamina E se centra específicamente en la inhibición de la peroxidación lipídica causada por los radicales libres, teniendo lugar en los fosfolípidos de la membrana celular, lipoproteínas, tejido adiposo, cerebro y en todos los tejidos que contengan una alta proporción de ácidos grasos poliinsaturados (Traber & Atkinson, 2007; Wang *et al.*, 2017).

La actividad antioxidante de la vitamina E es una de las primeras barreras de la peroxidación de los ácidos grasos poliinsaturados. Los fosfolípidos de la membrana mitocondrial, del retículo endoplasmático y plasmática poseen afinidades para el  $\alpha$ -tocoferol, por lo que está muy concentrado en estos sitios (Zou *et al.*, 2016). El  $\alpha$ -tocoferol, es la forma más común de vitamina E, ha sido considerada como crioprotectora, factor sugerido por su actividad en la prevención de la inflamación y procesos degenerativos en el hígado, cuando este es expuesto a tóxicos, contaminación ambiental y factores de la dieta (Galli *et al.*, 2017; Hashem *et al.*, 2016).

Los tocoferoles actúan interrumpiendo reacciones de cadena con radicales como resultado de su capacidad de transferir el hidrógeno fenólico a un radical peróxilo, quedando, a la vez, en la forma de radical fenoxi o fenoxilo, en reacciones intermedias no reversibles que presuponen la transformación de la vitamina hasta su producto final inocuo (Viglianisi & Menichetti, 2019).

**Vitamina C.** La vitamina C es una vitamina soluble en agua que se considera un eliminador natural de radicales libres, se encuentra principalmente en cítricos (pulpa y la cáscara); incluye dos formas de ácido ascórbico con actividad antioxidante, el ácido L-ascórbico y L- ácido dehidro-ascórbico (Figura 1). Actúa en combinación con otros antioxidantes primarios como la vitamina E y los carotenoides, así como en conjunto con las enzimas antioxidantes, la mayoría de las plantas y animales sintetizan ácido ascórbico a partir de la glucosa y los humanos son incapaces de sintetizarlo y requieren obtenerlo de la dieta (Pehlivan, 2017).

El efecto antioxidante de esta vitamina está bien documentado, el mecanismo de acción incluye la inhibición de la formación de radicales superóxidos o de nitrosaminas durante la digestión; siendo un agente que reduce los radicales fenoxilo formados durante la actividad de la vitamina E, a través de la donación de un átomo de hidrógeno formando un radical relativamente estable y poco reactivo (ascorbilo). También actúa en combinación con otros antioxidantes primarios como la vitamina E y los carotenoides, así como en conjunto con las enzimas antioxidantes regenerando el  $\alpha$ -tocoferol desde el radical  $\alpha$ -tocoferilo en membranas y lipoproteínas (Kamal-Eldin & Budilarto, 2015). El ascorbato como antioxidante y cofactor de las reacciones redox, es importante en la activación de los

mecanismos epigenéticos que controlan la diferenciación celular, cuya desregulación puede conducir al desarrollo de ciertos tipos de cáncer (Fenech *et al.*, 2018).

**Carotenoides.** Son lípidos responsables de la pigmentación en animales, plantas y microorganismos, pero también desempeñan funciones importantes, a menudo críticas, en los sistemas biológicos, forman parte de la dieta diaria de los humanos, existen dos tipos de carotenoides: los carotenos, que no contienen oxígeno en sus anillos terminales y las xantofilas que si los tienen; son hidrocarburos que contienen generalmente 40 carbonos con un extenso sistema de dobles enlaces conjugados. Algunos carotenoides pueden tener 30 y 50 carbonos cuando estos son producidos por ciertas bacterias con diferentes vías intermediarias (Ribeiro *et al.*, 2018).

Esta característica particular (sistema de dobles enlaces) es la principal responsable de sus propiedades pigmentarias y de la capacidad de muchos de estos compuestos para interactuar con los radicales libres y el oxígeno *singlete* y, por tanto, actuar como eficaces antioxidantes. En las plantas se pueden encontrar esterificados o no esterificados (Abuajah *et al.*, 2015) y pueden ser clasificados como carotenos ( $\alpha$ -,  $\beta$ -caroteno y licopeno), quienes sólo contienen una cadena de hidrocarburos sin ningún grupo funcional; mientras que los que llevan un grupo funcional que contiene oxígeno se denominan xantofilas (astaxantina, luteína, zeaxantina) (Ribeiro *et al.*, 2018).

**Betacaroteno.** En los vegetales, el betacaroteno es el carotenoide predominante. Las frutas y hortalizas como las zanahorias, mangos o la calabaza tienen altas concentraciones de betacaroteno, este contenido aumenta

con la maduración y es responsable de la intensificación del color aunado a la degradación de clorofila. Es un carotenoide con actividad de provitamina A. Esta tiene una alta capacidad antioxidante que favorece la prevención del cáncer, especialmente el de pulmón, boca y estómago. En el intestino se metaboliza para formar dos moléculas de retinaldehído en dos moléculas de vitamina A, mientras que la cantidad restante es reducida a retinol. Esta capacidad es exclusiva de algunos carotenos y no posee una relación directa con su potencial antioxidante (Ribeiro *et al.*, 2020). Su principal mecanismo de estabilización de radicales libres está determinado por su capacidad para estabilizar el oxígeno *singlete* y convertirlo nuevamente a su forma menos reactiva (triplete) (Young & Lowe, 2018).

**Licopeno.** Formado por ocho unidades de isopreno y 11 enlaces dobles lineales, el licopeno es un carotenoide no pro-vitamina A y posee una significativa actividad antioxidante y de carácter lipofílico (Kwatra, 2020; Yin *et al.*, 2019). Se encuentra abundantemente en el tomate y otros frutos (sandía, papaya o pomelo rosado) otorgando la coloración roja y naranja de algunas frutas y verduras, pero también se puede encontrar en algunas no rojas o no naranjas, como los espárragos y el perejil (Hedayati *et al.*, 2019). A diferencia del betacaroteno, este no se convierte en vitamina A. Su principal función es proteger el ADN, las proteínas y los lípidos contra la oxidación y puede actuar sobre otros radicales libres como el peróxido de hidrógeno, el dióxido de nitrógeno y los radicales hidroxilos (Imran *et al.*, 2020).

**Xantofilas (luteína y zeaxantina).** Las xantofilas son moléculas que poseen uno o más átomos de oxígeno en su estructura; la función principal de estos pigmentos es evitar la formación de radicales libres y moléculas oxidativas causantes de diversos daños a

las membranas de las células de los ojos. Esta capacidad se atribuye al grupo ceto, en conjugación con el esqueleto de polieno, al cual se considera que estabiliza los radicales centrados en carbono de manera más efectiva que el esqueleto de polieno por sí solo. Algo que distingue a estas xantofilas de otros carotenoides como el  $\alpha$  y  $\beta$  caroteno es que no son precursores de la vitamina A (Sy *et al.*, 2015) por lo tanto no pueden convertirse en retinol.

La zeaxantina es un carotenoide oxigenado, perteneciente a los pigmentos isoprenoides, la zeaxantina y la luteína son isómeros según sus estructuras químicas y una intervención enzimática. Zeaxantina se encuentra de manera abundante en las verduras de hoja verde, flores, frutas y maíz amarillo como un pigmento liposoluble (Saini & Keum, 2018). Es un colorante natural que se desempeña en el mantenimiento de la salud humana; por un lado, el tejido celular del cuerpo puede protegerse apagando el oxígeno y eliminando los radicales libres y, por otro lado, puede aliviar los daños causados por la peroxidación lipídica (Yunping *et al.*, 2020).

La luteína suele encontrarse en flores, cereales, frutas y verduras, como las espinacas y la col rizada (Yang *et al.*, 2018), esterificada o no esterificada con ácidos grasos, comúnmente con ácido palmítico (Abdel-Aal & Rabalski, 2015). Es el único carotenoide (aparte de la zeaxantina) que se encuentra principalmente en la mácula lútea del ojo, donde la luz es enfocada por el cristalino; debido al intenso color amarillo que presenta la luteína, se utiliza ampliamente como colorante alimentario natural (Rodríguez-Amaya, 2016), o para uso en industrias farmacéuticas, suplementos dietéticos, alimentos y piensos para animales (Ochoa-Becerra *et al.*, 2020). Generalmente coexiste en la naturaleza con su estereoisómero zeaxantina y los dobles

enlaces de la columna vertebral de isopreno pueden existir en sus conformaciones E/Z. En la naturaleza, el isómero geométrico más común de la luteína es su conformación E siendo termodinámicamente más estable que el cis (Yang *et al.*, 2018).

**Minerales.** Los minerales son un grupo de poderosos antioxidantes. El cobre, manganeso, selenio, zinc y hierro son ejemplos de minerales que ejercen función antioxidante en diversos procesos y pasos metabólicos en el organismo. El zinc es un biometal relativamente abundante en el cuerpo humano, participa en el metabolismo de las células y en el centro activo de más de 200 metaloproteínas (Psomas, 2020). Los compuestos simples de zinc (II), como el óxido de zinc se utilizan en el tratamiento de infecciones y lesiones de la piel y del tratamiento de infecciones que causan diarrea incontrolable. Estos han sido probados *in vitro* por su efecto antidiabético, antiinflamatorio, antibacterianos, antiproliferativos y eliminadores de radicales (Tarushi *et al.*, 2017).

El cobre participa en funciones de carácter antioxidante como cofactor de las enzimas fenoloxidasas, ascorbato oxidasa, superóxido dismutasa (SOD) y participa en el transporte de electrones en las cadenas respiratoria y fotosintética. Potenciando el sistema inmunitario, en la formación de enzimas, proteínas y neurotransmisores, actúa como antioxidante, protegiendo las células de los efectos tóxicos de los radicales libres, y facilita la fijación del calcio y del fósforo (Singh *et al.*, 2017).

El manganeso es un oligoelemento vital para el funcionamiento del cuerpo humano, es funcional en los procesos redox y cofactor en las enzimas que son esenciales en la producción de energía, como la superóxido dismutasa de

manganeso (MnSOD), una enzima antioxidante que protege contra los daños provocados por los radicales libres (Kaya *et al.*, 2019), muchos complejos estructurales centrados en el hierro y el manganeso han sido estudiados en detalle para revelar su utilidad proporcionada por las propiedades redox (Nichols *et al.*, 2018).

El selenio interviene en la síntesis de enzimas relacionados con la función oxidativa, como el glutatión peroxidasa, que como su nombre indica elimina grupos peróxidos, incluyendo el peróxido de oxígeno, como oligoelemento esencial, desempeña un papel clave en el mantenimiento de la homeostasis redox, la defensa antioxidante, la función antitumoral y la regulación inmunológica para la salud humana y animal (Schomburg, 2017). Este mineral se incorpora a las proteínas en forma de selenoproteínas y, de este modo, ayuda a prevenir el daño celular; en la naturaleza existe en diferentes estados oxidativos (-2, 0, +4 y +6 de valencia) y formas químicas (selenito, selenato, selanio elemental, selenometionina/selenocisteína, etc.) (Xu *et al.*, 2018).

El hierro es un elemento esencial necesario para muchos procesos fisiológicos del cuerpo humano, entre ellos el transporte de oxígeno, transferencia de electrones, regulación de los genes, regulación del crecimiento, diferenciación celular y como cofactor en muchas reacciones enzimáticas. Forma parte del sistema antioxidante del organismo, ya que contribuye a eliminar grupos peróxidos. Sin embargo, su capacidad de cambiar de valencia fácilmente ( $2^+/3^+$ ) hace que pueda también intervenir, dependiendo del medio, en la formación de radicales libres (Kumar *et al.*, 2017).

**Compuestos fenólicos o polifenoles.** Las plantas sintetizan una gran variedad de

metabolitos secundarios que contienen en su estructura un grupo fenol (anillo aromático con grupo hidroxilo), las cuales de manera genética reciben el nombre de compuestos fenólicos, polifenoles o fenilpropanoides. Este grupo de metabolitos secundarios está conformado por diferentes estructuras químicas y actividad, lo que engloba a más de 8000 compuestos (Gordo, 2018), derivados de las vías de Shikimato y de los fenilpropanoides. Son objeto frecuente de investigación debido a sus diversas funciones; se les ha asociado con la asimilación de nutrientes, síntesis proteica, actividad enzimática, fotosíntesis, formación de componentes estructurales y la defensa ante los factores adversos del ambiente como la agresión por patógenos e insectos (Valencia-Avilés *et al.*, 2017).

Además de estas funciones, los polifenoles son reconocidos por su remarcada capacidad antioxidante; la cual depende del número y la disposición de los grupos hidroxilos en las moléculas de interés, no son antioxidantes activos a menos que la sustitución en la posición *orto* o *para* haya aumentado la densidad de electrones en el grupo hidroxilo y haya disminuido la energía del enlace oxígeno-hidrógeno, aumentando así la reactividad frente a los radicales libres de los lípidos (Gulcin, 2020).

Los polifenoles se pueden clasificar de muchas maneras debido a su diversidad estructural, según su estructura química hay 2 grandes grupos: flavonoides y no flavonoides. En el grupo de los flavonoides, se encuentran los flavonoles, flavonas, flavan-3-oles, isoflavonas, flavanonas, dihidroflavonoles, antocianidinas y chalconas. En contraste, el grupo de no flavonoides está conformado por ácidos hidroxibenzóicos, ácidos hidroxicinámicos, polifenoles volátiles, estilbenos y compuestos diversos (lignanós y cumarinas) (Valencia-Avilés *et al.*, 2017).

**Flavonoides.** Son la clase más abundante de polifenoles derivados de los aminoácidos aromáticos, fenilalanina y tirosina, estructuralmente consisten de dos anillos bencénicos (anillos A y B) unidos por un heterociclo piránico (anillo C). Para su estudio sistemático, los más de 4000 flavonoides descritos hasta ahora se han clasificado en varias clases de acuerdo con las variantes estructurales que presenta el anillo C. Los principales subgrupos de flavonoides son: flavonoles, flavonas, flavanonas, dihidroflavonas, isoflavonas, antocianidinas. De menor importancia son las chalconas, dihidrochalconas, DHF, flavan-3,4-dioles, cumarinas, biflavonoides y neoflavonoides (Zhang *et al.*, 2015).

Los flavonoles se encuentran repartidos en todos los alimentos de origen vegetal. Las cáscaras y hollejos de las frutas son particularmente ricos en estos compuestos proporcionando un ligero color amarillo a los tejidos vegetales. La estructura química que suelen poseer es 3-hidroxi-2-fenilcromen-4-ona; se caracterizan por poseer un grupo ceto en el carbono C4 y una insaturación entre los carbonos C2 y C3. Poseen además un grupo hidroxilo adicional en el carbono C3. Entre los flavonoles más comunes se pueden nombrar el kaempferol, quercetina, isorramnetina y miricetina, presentándose en forma de glicósidos (Morales *et al.*, 2004).

Las flavonas son estructuralmente similares a los flavonoles, a diferencia de que las flavonas carecen del grupo hidroxilo en el carbono 3, estas poseen un anillo bencénico en el carbono C3 con grupos hidroxilos en C7 y C4, se caracterizan por un alto grado de diversidad química, debido a las modificaciones de la estructura química, que incluyen la hidroxilación, la glicosilación O-C, la metilación O y la acilación (Jiang *et al.*,

2016), siendo encontrados con regularidad en plantas leguminosas. En los vegetales son responsables del color de las flores, junto con los flavonoles, son los principales pigmentos de las flores de color blanco y crema y actúan como copigmentos con las antocianinas en las flores azules (Hostetler *et al.*, 2017). Debido a su capacidad para eliminar los radicales libres derivados del oxígeno, además de su probada capacidad antioxidante, las flavonas poseen propiedades antiinflamatorias, antialérgicas, antivirales, contra el cáncer y neuroprotectoras (Zhao *et al.*, 2019).

Las flavanonas constituyen una clase única de flavonoides, contienen varios glucósidos de tres agliconas principales: hesperitina, naringenina y eriodictiol. A diferencia de los flavonoles y las flavonas, que pueden encontrarse en diferentes alimentos, las flavanonas se presentan casi exclusivamente en cítricos y en menor medida, en tomates y algunas hierbas aromáticas (como la menta) (Pereira-Caro *et al.*, 2020). Generalmente, las flavanonas están glicosiladas por un disacárido en la posición siete o bien una neohesperidosa, lo cual les confiere un gusto amargo, como la naringina en el pomelo o la hesperidina en las naranjas (Li & Schluesener, 2015).

Por su parte, las isoflavonas se consideran como fitoestrógenos, debido a su similitud estructural con los estrógenos y la capacidad de unirse a los receptores estrogénicos (Křížová *et al.*, 2019). La estructura básica de la isoflavona consiste en un anillo bencénico en el carbono C3 con grupos hidroxilos en C7 y C4. Son compuestos que pueden presentarse tanto glicosilados o como agliconas, existen principalmente tres tipos de agliconas, dependiendo de los sustituyentes en los carbonos 5 y 6, llamados daidzeina, genisteina y gliciteina (Bustamante-Rangel *et al.*, 2018). Están ampliamente distribuidas dentro del reino vegetal, pero es más común

encontrarlas en la familia *Leguminosae*, destacando por su contenido la soya (Yu *et al.*, 2016). Las isoflavonas eliminan una amplia gama de especies reactivas de oxígeno, nitrógeno y cloro.

Las antocianidinas son las estructuras básicas de las antocianinas, conforman un grupo importante de pigmentos vegetales formando conjugados con azúcares y ácidos grasos para formar un grupo diverso en colores responsables de tonalidades azules, violeta, púrpura, rojo, escarlata y naranjas brillantes. Las más comunes son la pelargonidina, la cianidina, la delfinidina, la peonidina, la petunidina y la malvidina siendo la principal fuente de obtención de estas, las frutas, aunque se les puede adquirir en la dieta a través de los cereales, vinos y algunos vegetales (Valencia-Avilés *et al.*, 2017).

**No flavonoides.** Los ácidos hidroxicinámicos con un esqueleto C6-C3, se encuentran principalmente como ácido cumárico, cafeíco y ferúlico conjugados con ácido tartárico o ácido quínico y en raras ocasiones en estado libre (Philipov & Doncheva, 2013). Los hidroxicinamatos C6-C3 producidos como conjugados son denominados ácidos clorogénicos. Estos compuestos pueden acumularse hasta valores de 10% en granos de café y son la principal ingesta de fenólicos en consumidores regulares de esta bebida. Están presentes en alimentos como uvas y en vinos de uva tintos y blancos (Stevanovic *et al.*, 2009).

Los taninos hidrolizables como el ácido tánico y los elagitaninos son polímeros cuyo peso molecular varía entre 500 y 5000 Da. Se caracterizan por una parte central que consiste en un poliol (generalmente glucosa) donde las funciones hidroxilo están esterificadas con ácido gálico. Hay dos tipos de

taninos hidrolizables: a) los galotaninos cuya hidrólisis libera ácido gálico y sus derivados galloilados, así como b) los elagitaninos quienes liberan por hidrólisis al ácido gálico, elágico, hexahidroxidifénico, valónico y cuyos grupos galoil están conectados a través de enlaces C-C (Valencia-Avilés *et al.*, 2017).

El ácido gálico, vinílico y p-hidroxibenzoico son los ácidos hidroxibenzoicos más comunes. Estos compuestos orgánicos con un anillo fenólico y un grupo carboxílico asociado forman una estructura de tipo C6-C1 (Zhang *et al.*, 2015). La función del ácido 2-hidroxibenzoico o ácido salicílico en las plantas se asocia con la regulación del crecimiento endógeno y su participación en la regulación de varios procesos fisiológicos, como cierre de estomas, absorción de iones, inhibición de la biosíntesis de etileno y transpiración. Se encuentran muy frecuentemente en las frutas en forma de ésteres (Mercado-Ruiz *et al.*, 2019).

Los ácidos hidroxicinámicos se derivan del ácido cinámico, normalmente están presentes en plantas y frutas en forma de ésteres de ácidos orgánicos o glucósidos o unidos a proteínas y otras moléculas de la pared celular como celulosa, xilanos y lignina (López-Romero *et al.*, 2016). Se sintetizan mediante la vía del Shikimato, donde el aminoácido fenilalanina es el precursor en esta ruta, son usados por las plantas como defensa ante patógenos e insectos, con posibles efectos bioactivos y beneficios en humanos y animales cuando son utilizados como suplementos alimenticios (Peña-Torres *et al.*, 2019).

Los estilbenos son fitoalexinas que se obtienen a partir de la ruta mixta del ácido shikimico y del acetato. Existen más de 400 estilbenos naturales y se encuentran en un grupo heterogéneo de plantas; sin

embargo, su producción está regulada por la enzima estilbeno sintetasa, la cual no se expresa en todo momento (Sirerol *et al.*, 2016). Estos compuestos se pueden dividir en estilbenos monoméricos y oligoméricos. Los oligoméricos se obtienen por el acoplamiento entre estilbenos monoméricos tanto homogéneos como heterogéneos formando estructuras complejas. Los monoméricos están basados en el resveratrol, junto con otros estilbenos monoméricos, el oxiresveratrol, pterostilbeno, piceatannol, isorhapotigenina y cis-estilbeno, combretastatina (Arús *et al.*, 2017; Courtois *et al.*, 2017).

Otros compuestos con naturaleza polifenólica no flavonoides son los lignanos y las cumarinas, los lignanos son derivados de dos unidades C6-C3 unidas por un enlace  $\beta$ - $\beta'$  en la cadena lateral, los lignanos se originan en la vía biosintética del ácido shikímico, estos son dímeros de dos unidades fenilpropanoides, que proceden del metabolismo de la L-fenilalanina, a partir del ácido cinámico y por reacciones sucesivas de hidroxilación y metilación en el anillo aromático, se obtienen los ácidos p-cumárico, cafeico, ferúlico, 5-hidroxiferulico y sinapico; se encuentran en más de 70 familias en el reino vegetal, especialmente en semillas de linaza y sésamo y se han caracterizado más de 200 lignanos y 100 neolignanos (Cui *et al.*, 2020).

Las cumarinas, pertenecientes a la familia de las benzopironas, son probablemente los metabolitos más comunes derivados de la ruta biosintética del Shikimato-corismato, son sustancias de origen vegetal derivadas de la 1,2 benzopirona y presentes en gran cantidad de plantas, en miembros de la familia *Rutaceae* se han encontrado aproximadamente 200 cumarinas. Los derivados de las cumarinas han sido reportados con capacidad antioxidante muy promisorias. Las cumarinas tienen un

gusto amargo y los animales la evitan siempre que pueden, pues producen hemorragias internas (García-Argáez *et al.*, 2003). Debido precisamente a esta característica, se emplea además como anticoagulante.

### Métodos empleados para determinar la capacidad antioxidante

Hasta ahora, no existen métodos mundialmente unificados para medir capacidad antioxidante, en parte, debido a las diferentes condiciones en las cuales se desarrollan estas metodologías, además de la complejidad de los sistemas y de la diversidad de matrices que necesitan ser evaluadas. Es por ello que, el método ideal debería evaluar el efecto de los compuestos de un alimento en condiciones de reacción que imiten las que se dan cuando el estrés oxidativo es inducido *in vivo* por las ERO y las ERN (Gulcin, 2020).

Según Apak *et al.* (2016) un método estandarizado para la actividad antioxidante debe cumplir lo siguiente: i) medir de manera clara y demostrable las reacciones químicas que ocurren, b) utilizar una fuente de radicales biológicamente relevante, ii) ser sencillo, iii) basarse en un procedimiento con punto final y mecanismo químico claramente definidos, iv) los productos químicos y la instrumentación empleados deben ser de fácil adquisición, v) debe tener una buena reproducibilidad dentro de una misma serie y a través del tiempo, vi) debe poder adaptarse al ensayo de antioxidantes tanto hidrofílicos como lipofílicos y al uso de diferentes fuentes de radicales, vii) debe poder adaptarse al análisis de alto rendimiento para los análisis de control de calidad de rutina.

Aún hoy día se emplean diversos ensayos químicos, junto con tecnologías de detección altamente sensibles y automatizadas, para

evaluar la actividad antioxidante a través de mecanismos particulares, por ejemplo, la actividad de barrido contra ciertos tipos de radicales libres o ERO, el poder reductor y la quelación de metales, entre otros.

### Métodos de eliminación de radicales/ERO.

Estos ensayos no requieren ningún sustrato lipídico y suelen emplear un sistema químico que contiene un oxidante (radicales libres u otras ERO), una sonda oxidable (no necesaria para algunos ensayos) y los antioxidantes investigados. Dependiendo de las reacciones químicas implicadas, estos ensayos se dividen en dos categorías: ensayos basados en la transferencia electrónica (ET, Electron Transfer) (Figura 2) y ensayos basados en la reacción de transferencia de átomos de hidrógeno (HAT, Hydrogen Atom Transfer) teniendo diferentes mecanismos de reacción (Figura 3).

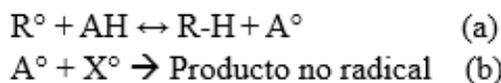


Figura 2

Mecanismo ET.  
Nota: Soto (2015).

Las actividades antioxidantes se expresan como inhibición de la oxidación de la sonda mediada por las ERO, o como equivalentes de un antioxidante de referencia seleccionado, como el trolox (6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcroman-2-ácido carboxílico), el ácido ascórbico u otro compuesto.

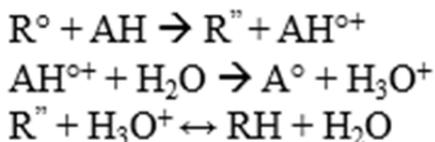


Figura 3

Mecanismo HAT  
Nota: Soto (2015).

La oxidación de la sonda se puede medir mediante varias tecnologías de detección, entre ellas se encuentran los métodos espectrofotométricos,

fluorométricos, quimioluminiscentes, RPE (resonancia paramagnética de electrones), IR-TF (infrarrojo con transformada de Fourier), RMN (resonancia magnética nuclear) y amperométricos, entre otros (Shahidi & Zhong *et al.*, 2015).

El ensayo de capacidad de absorción de radicales de oxígeno (ORAC en inglés) mide la capacidad de ruptura de la cadena de radicales de los antioxidantes mediante el control de la inhibición de la oxidación inducida por los radicales peróxido, estos radicales son predominantes en la oxidación de los lípidos en los alimentos y los sistemas biológicos en condiciones fisiológicas (Figura 4). Por ello, se considera a los valores obtenidos por ORAC relevantes biológicamente como referencia de la eficacia antioxidante. En este ensayo tipo HAT (Camarena-Tello *et al.*, 2018), el radical peróxido reacciona con una sonda fluorescente dando lugar a la pérdida de fluorescencia, que se registra con un fluorímetro (Figura 3). Se utiliza como referencia un antioxidante estándar, normalmente el Trolox (Ácido-6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcroman-2-carboxílico), mostrando los valores ORAC como equivalentes de trolox. Una desventaja de este método es que mucha de la base científica de este método sigue siendo poco clara (Sueishi *et al.*, 2018).

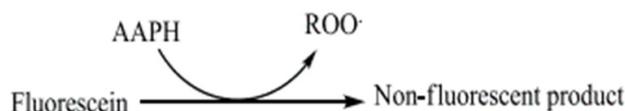


Figura 4

Mecanismo de acción ensayo ORAC  
Nota: Gupta (2015).

El método de eliminación del radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH) es de los más utilizados y ofrece el primer enfoque para evaluar la actividad antioxidante total. El DPPH es un radical cromógeno estable de color púrpura intenso. El método se basa en la donación de electrones de los antioxidantes para neutralizar el radical DPPH. La reacción va acompañada de un cambio de color medido a 517 nm, y la

decoloración actúa como indicador de la eficacia antioxidante (Figura 5); este ensayo es una técnica relativamente sencilla y sólo requiere un espectrofotómetro UV o un espectrómetro RPE (resonancia paramagnética electrónica) y se basa en gran medida en la suposición de que la actividad antioxidante es igual a su capacidad o el

llamado poder reductor, aunque su sensibilidad puede verse afectada por una serie de factores, como el tipo y la cantidad de disolvente utilizado, la presencia y la concentración de hidrógeno e iones metálicos y la frescura del reactivo de DPPH (Musa *et al.*, 2013).

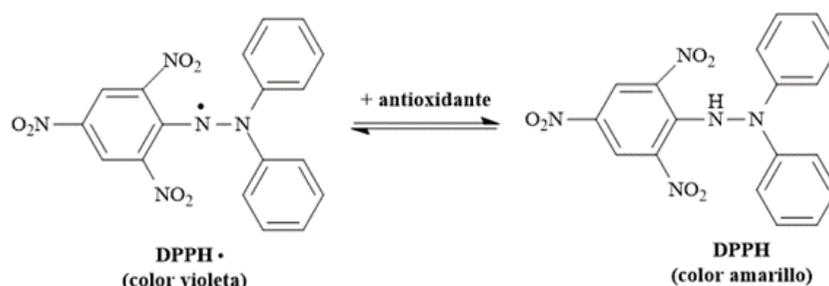


Figura 5

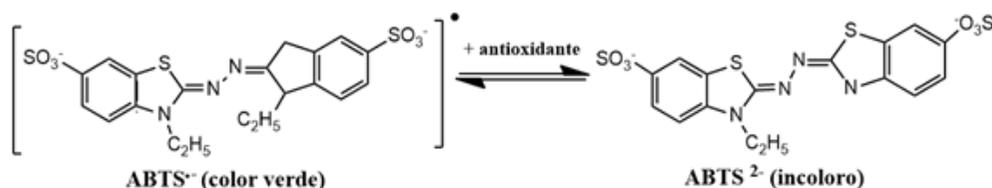
Reacción entre el DPPH y un antioxidante

Nota: Guija-Poma *et al.* (2015).

Los resultados de este método pueden expresarse de muchas maneras; bien como el poder reductor de la muestra o empleando un estándar antioxidante, muchas veces el trolox, pero también el ácido ascórbico u otro.

Un método igualmente sencillo y muy utilizado es el ensayo de la capacidad de eliminación del ácido 2,2'-azinobis (3- etilbenzotiazolina-6-sulfónico) conocido coloquialmente como el ensayo del ABTS, anteriormente conocido como ensayo de la capacidad antioxidante equivalente a trolox (TEAC por sus siglas en inglés). Este

ensayo mide la capacidad de los antioxidantes para eliminar el radical catión  $ABTS^{\bullet+}$ , un cromóforo azul-verde con absorción máxima a 734 nm que disminuye su intensidad en presencia de antioxidantes (Figura 6). El  $ABTS^{\bullet+}$  puede generarse a partir de ABTS en presencia de agentes oxidantes fuertes. Los antioxidantes pueden neutralizar el catión radical  $ABTS^{\bullet+}$  por reducción directa a través de la donación de electrones o por radicales a través de la donación de átomos de hidrógeno, y el equilibrio de estos dos mecanismos suele estar determinado por el antioxidante (Prior *et al.*, 2005).



Figura

Mecanismo de reacción del ABTS

Nota: Gupta (2015).

El grado de decoloración del color azul-verde, depende de la duración de la reacción, de la actividad intrínseca y de la concentración en la muestra. De forma similar a otros ensayos de eliminación de radicales, el ensayo TEAC puede monitorear la disminución de la absorbancia

a través del tiempo, o la caída en un punto final determinado. Los resultados obtenidos por el ensayo generalmente se expresan como equivalentes de Trolox (Tian & Schaich, 2013), después de interpolar las lecturas de absorbancia frente a concentraciones conocidas de Trolox.

### Métodos basados en el potencial redox no radical.

Los antioxidantes también se conocen como reductores. Su capacidad de donación de electrones no sólo permite eliminar los radicales libres y otras ERO derivadas del oxígeno, sino que también reduce los elementos de mayor valencia a su estado de menor valencia. El potencial redox o el poder reductor de los antioxidantes es un indicador importante de su eficacia antioxidante, y se mide mediante la reacción redox con varios iones metálicos, como el hierro, cobre, cromo, cerio, entre otros.

El ensayo de poder antioxidante reductor del ion férrico (FRAP) es un método

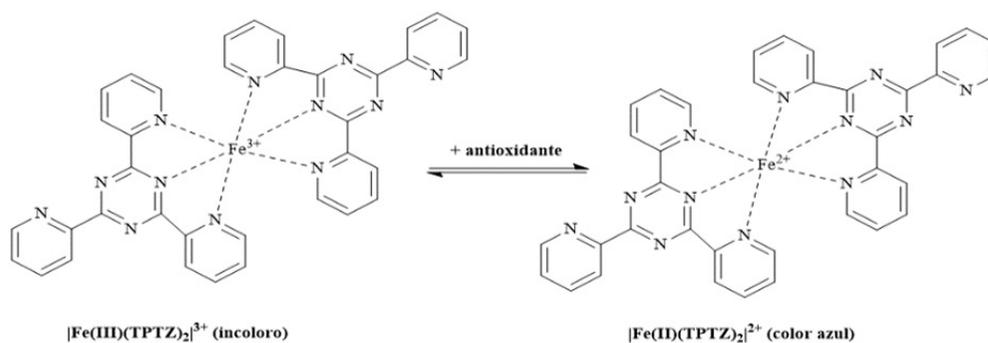


Figura 7

Principio químico del método FRAP.

Nota: Gupta (2015).

El ensayo de la capacidad antioxidante reductora del ion cúprico (CUPRAC), es un ensayo de reducción de cobre desarrollado como una variante del ensayo FRAP. Utiliza el cobre como oxidante en lugar del hierro. El método mide el poder reductor de los antioxidantes para convertir el ion cúprico ( $\text{Cu}^{2+}$ ) en cuproso ( $\text{Cu}^+$ ). Al igual que en el ensayo FRAP, se emplea un ligando para formar un complejo cobre-ligando que facilita la medición de la absorbancia. La neocuproína es el ligando comúnmente empleado en el ensayo CUPRAC. El complejo  $\text{Cu}^{2+}$ -neocuproína puede ser reducido por los antioxidantes a  $\text{Cu}^+$ -neocuproína, que es un cromóforo con una absorción máxima a 450 nm (Figura

típico basado en la TE que mide la reducción del complejo del ligando de iones férricos ( $\text{Fe}^{3+}$ ) al complejo ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ), de color intenso, por parte de los antioxidantes en medios ácidos (Figura 7). Los resultados se expresan como equivalentes micromolares de  $\text{Fe}^{2+}$  o en relación con un estándar antioxidante. Es sencillo, rápido y rentable y no requiere equipo especializado; su uso se ha extendido para evaluar la actividad antioxidante en fluidos biológicos, alimentos y extractos de plantas (Benzie & Devaki, 2017). Este método se desarrolla bajo condiciones ácidas (pH 3.6), la actividad antioxidante se determina como el aumento de la absorbancia a 593 nm generando una coloración azul intensa (Benítez-Estrada *et al.*, 2020).

8). Este método resulta aplicable a matrices alimentarias relativamente insolubles, así como a productos cosméticos insolubles como cremas, bálsamos y polvos (Akar & Burnaz, 2019).

Por otro lado, la propiedad antioxidante de los quelantes de metales se evalúa cuando se forma un complejo entre el antioxidante y el metal, de manera que los iones metálicos ya no pueden actuar como iniciadores de la oxidación lipídica. Por lo tanto, la capacidad de quelación de metales también se utiliza como indicador de la actividad antioxidante, normalmente en combinación con otros ensayos antioxidantes.

En general, la capacidad de quelación de metales se determina midiendo el efecto quelante de los antioxidantes para el ion ferroso, el sulfato ferroso y la ferrozina son las fuentes de iones ferrosos más utilizadas. Una pérdida de absorbancia a 485 nm (para el sulfato ferroso) o 562 nm (para la ferrozina) tras la adición de antioxidantes representa la formación de un

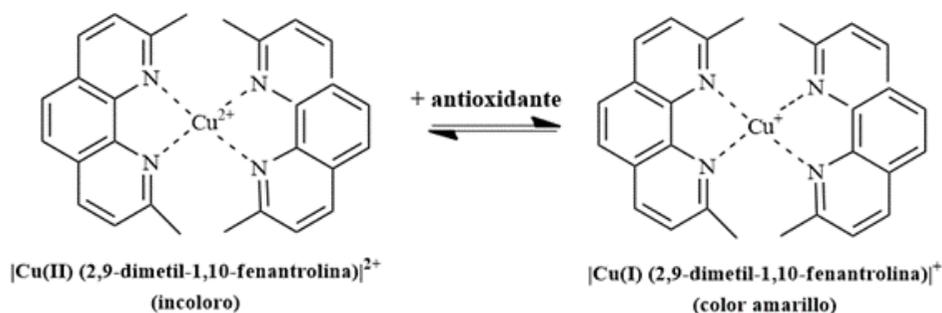


Figura 8

Mecanismo de acción ensayo CUPRAC  
Nota: Tomado de Gupta (2015).

### Frutas tropicales y capacidad antioxidante

Durante los últimos años, la ingesta de frutas recién cosechadas ha ido incrementando en todo el mundo. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2020) tan solo en el 2019 el comercio de frutas tropicales a nivel mundial alcanzó un nuevo máximo de 7.7 millones de toneladas, lo que supuso un incremento del 6.4 %, o 465 000 toneladas, en comparación con el año anterior, siendo las más exportadas (en orden de importancia) la piña (40%), aguacate (28%), mangos, mangostanes-guayabas (27%) y papayas (5%). Este aumento está ligado a diversos factores como la búsqueda de productos más saludables para un mayor cuidado de la salud y aumento en la ingesta de nutrientes en los alimentos, evitando el consumo de conservantes que en estudios experimentales han demostrado causar efectos nocivos a la salud (Priyadarshini & Priyadarshini, 2018).

De acuerdo con esto, existe mayor conciencia global de los efectos benéficos no

complejo metal-antioxidante, y la capacidad de quelación del compuesto añadido puede cuantificarse espectrofotométricamente. En la mayoría de los casos, la capacidad de estos grupos se expresa como equivalentes de EDTA (ácido etilendiaminotetraacético) (Shahidi & Zhong, 2015).

nutrimientales de las frutas, específicamente de compuestos funcionales como la fibra, pigmentos y antioxidantes. En estudios epidemiológicos se ha informado sistemáticamente de que las frutas son fuentes naturalmente ricas en antioxidantes, que ayudan a reducir la incidencia de enfermedades degenerativas, como el envejecimiento, la arteriosclerosis, la artritis, la disfunción cerebral, el cáncer, las enfermedades cardíacas y la inflamación (Ellong *et al.*, 2015).

La potente actividad antioxidante de los extractos de frutas se debe a los efectos aditivos y sinérgicos de los fitoquímicos presentes en estas, lo que podría ayudar a explicar por qué ningún antioxidante sintético por sí solo es capaz de sustituir a la combinación de fitoquímicos naturales que se encuentran en las frutas para conseguir los beneficios deseados para la salud. La lista de sustancias con estas características es extensa, pero figuran los compuestos fenólicos, incluidos los flavonoides (Nimse & Pal, 2015).

Las frutas clasificadas como "superfrutas", han atraído la atención de los

consumidores y de la industria alimentaria, sobre todo por su alto contenido en antioxidantes utilizándose como fuentes naturales de fitoquímicos bioactivos para la salud. Este grupo incluye a una gran cantidad de frutas de climas boreales que, por su composición química y pigmentación son ricas en sustancias antioxidantes.

Unos pocos frutos tropicales comparten esa denominación de superfruta, tal vez el ejemplo más conocido es el cacao (*Theobroma cacao L.*), fruto de donde se obtiene el chocolate (Vázquez-Ovando *et al.*, 2016). Sin embargo, un gran número de frutas tropicales que han demostrado tener niveles excepcionalmente altos de compuestos antioxidantes siguen siendo prácticamente desconocidas para los consumidores, tal como reporta Pereira-Netto (2018), ocurre con frutos de consumo local en regiones de Brasil. En este mismo sentido Gregoris *et al.* (2013) reportan contenidos relativamente altos en frutos de *Solanum paniculatum* y *Spondias purpurea* (Tabla 1). Lim *et al.* (2007) analizaron la capacidad antioxidante de nueve frutas (plátano, pitahaya, guayaba con semillas y sin semilla, jobo indio, lanzón, mangostán, papaya, carambola y manzana de agua) y reportan que la guayaba, la papaya (*Carica papaya L.*) y la carambola (*Averrhoa carambola L.*) mostraron el mayor potencial antioxidante en el ensayo de DPPH y de reducción de hierro (III). Mientras que el plátano, manzana de agua, lanzón y papaya tienen un mayor potencial antioxidante secundario, medido por el experimento de quelación del hierro (II).

En contraste, Septembre-Malaterre *et al.* (2016) analizaron las propiedades antioxidantes del plátano, litchi, mango, papaya, maracuyá y piña, los resultados indicaron que los polifenoles fueron los antioxidantes más abundantes encontrándose principalmente en el maracuyá. Uno de los frutos tropicales más analizado por sus características y por su nivel de consumo

mundial es el mango; diferentes variedades han sido reportadas con interesante capacidad antioxidante (Gregoris *et al.*, 2013; Wu *et al.*, 2004).

En el estudio de Wu *et al.* (2004), se incluyeron frutos de climas templados y según sus resultados éstos presentan mayor poder antioxidante que los frutos tropicales. A partir de ese reporte, son varios los autores que demuestran que esto no es absoluto y depende de la variedad de fruto que se analice. Los carotenoides son los principales responsables de la capacidad antioxidante en los frutos y a la fecha se han reportado algunos con capacidad antioxidante muy superior a los encontrados en frutos de climas templados (Gregoris *et al.*, 2013).

La maduración de los frutos juega un papel importante en la cantidad de contenido de antioxidantes, ya que, este proceso implica degradación o síntesis y acumulación de componentes bioactivos, como los compuestos fenólicos, la vitamina C y los carotenoides (Ibarra-Garza *et al.*, 2015). Siriamornpun y Kaewseejan (2017) evaluaron la capacidad antioxidante de las frutas verdes y maduras de plátano, mango y papaya, encontrando que la variedad y la madurez de la fruta influyen en la actividad antioxidante.

Los contenidos más altos de fenoles totales y vitamina C se encontraron en frutos verdes, así como la capacidad antioxidante, mientras que el  $\beta$ -caroteno se observó en la fase madura, los ácidos fenólicos totales y flavonoides totales en los frutos estudiados disminuyen durante la maduración. Esto puede utilizarse como un indicador relevante de la capacidad antioxidante de una matriz alimentaria, y como un marcador preliminar para cualquier producto vegetal que se espere seleccionar como fuente natural de antioxidantes para alimentos funcionales

(Viuda-Martos *et al.*, 2011). También, se ha demostrado que los antioxidantes de naturaleza lipofílica contribuyen en mayor medida a la

capacidad antioxidante de los vegetales (Tabla 1).

**Tabla 1**

Procedencia y tipo de inoculantes evaluados

Fruta o producto	Capacidad antioxidante	Método de análisis	Moléculas antioxidantes	Referencia
Mango Tommy Atkins ( <i>Mangifera indica</i> 'Tommy Atkins')	0.50 ± 0.07 mM EC	DPPH	Polifenoles totales, ácido hidroxicinámico (HCA)	Gregoris <i>et al.</i> (2013)
Pitahaya ( <i>Selenicereus undatus</i> )	1000 ± 100 ppm Cl <sub>50</sub>	Peroxidación lipídica	HCA	Gregoris <i>et al.</i> (2013)
Piña ( <i>Ananas comosus</i> L.)	7.93 μmol ET g <sup>-1</sup>	CAT	Antioxidantes hidrofílicos	Wu <i>et al.</i> (2004)
Mango ( <i>Mangifera indica</i> )	10.02 μmol ET g <sup>-1</sup>	CAT	Antioxidantes hidrofílicos	Wu <i>et al.</i> (2004)
Aguacate Hass ( <i>Persea americana</i> )	19.33 μmol ET g <sup>-1</sup>	CAT	Antioxidantes lipofílicos	Wu <i>et al.</i> (2004)
Jurubeba ( <i>Solanum panicatum</i> L.)	3242 ± 20 mg L <sup>-1</sup>	Contenido de HCA	HCA	Gregoris <i>et al.</i> (2013)
Papaya ( <i>Carica papaya</i> L.)	4.5 μmol ET g <sup>-1</sup>	CAT	Carotenoides	Wu <i>et al.</i> (2004)
Banano ( <i>Musa paradisiaca</i> )	8.79 μmol ET g <sup>-1</sup>	CAT	Carotenoides	Wu <i>et al.</i> (2004)

EAG = equivalentes de ácido gálico; ET = equivalentes de trolox; EC= equivalentes de catequina; CAT= capacidad antioxidante total

Nota. Wu *et al.* (2004)

### Coproductos o derivados de frutos tropicales

A pesar de ser una industria con demasiado auge y crecimiento, y que permite la obtención de alimentos; la agroindustria frutícola es generadora de grandes cantidades de coproductos, considerados en muchos casos como desechos agrícolas; no obstante, pueden ser un recurso abundante y renovable de biomasa. Estos “residuos” puedan ser fuente importante de compuestos biológicamente activos con alto valor comercial (Vázquez-Briones *et al.*, 2019). Las porciones no comestibles de la fruta (por ejemplo, la cáscara, la piel, las semillas, etc.) pueden tener un mayor contenido nutricional que su respectiva porción comestible (Lachowicz *et al.*, 2019). Por lo anterior, pueden ser valorizadas, con el fin de mejorar los beneficios económicos y disminuir los problemas ambientales negativos que se generan, como menciona Banerjee *et al.* (2017). La primera operación en la manipulación de

los coproductos es la eliminación del agua libre, lo cual permite reducir la biomasa, además de reducir las reacciones químicas y microbiológicas, haciendo su manipulación más segura, al tiempo que permite la concentración de compuestos bioactivos, fibra dietética y minerales (Can-Cauich *et al.*, 2017).

La calidad final de los coproductos depende del uso de tecnología adecuada, ya sea que se transformen en nuevas materias primas para procedimientos secundarios o como insumos de explotación. Son interesantes desde el punto de vista nutricional y desde el punto de vista de la producción, pero sólo unos pocos se han desarrollado con éxito a partir de las enormes cantidades de coproductos vegetales producidos por la industria alimentaria (López-Vargas *et al.*, 2013; Murthy & Naidu, 2012). Los antioxidantes que se encuentran en los coproductos se utilizan con fines farmacéuticos, cosméticos y nutricionales (Selanni *et al.*, 2016).

Los trabajos de investigación se centran, por tanto, en la caracterización de los coproductos y en la valorización de sus compuestos funcionales, principalmente pero no exclusivamente fibra dietética y compuestos antioxidantes (Pfukwa *et al.*, 2020). Diversos trabajos se han enfocado en analizar diversos coproductos de frutas tropicales (Tabla 2) y se ha reportado en muchos casos valores más altos con respecto a las frutas frescas.

Santos-Silva *et al.* (2020) evaluaron el contenido de compuestos fenólicos, la capacidad antioxidante *in vitro* y el contenido total de carotenoides, antocianinas y vitamina C de cáscaras frescas y secadas al horno a 55 °C de piña (*Ananas comosus*), banano (*Musa sp.*), litchi (*Litchi chinensis*) y papaya (*Carica papaya*). Los compuestos fenólicos, carotenoides totales, antocianinas, el contenido de vitamina C y la capacidad antioxidante de las harinas fueron significativamente mayores, lo que indica que el proceso de secado promovió la concentración de estos componentes, por lo que son una alternativa para utilizar estos coproductos como fuente de nutrientes.

Martínez *et al.* (2012) estudiaron las propiedades químicas, tecnológicas y antioxidantes *in vitro* de los coproductos del cacao, como cáscara de la vaina, cáscara del grano y el mucílago obtenidos de la industrialización del cacao para determinar el uso potencial como fuente de fibra dietética antioxidante para el enriquecimiento de los alimentos, sus resultados indicaron que los coproductos del cacao pueden considerarse una buena fuente de compuestos naturales con una importante actividad antioxidante

Tabla 2

Capacidad antioxidante de productos o coproductos de frutas tropicales evaluados por diversos métodos

Producto o coproducto	Capacidad antioxidante	Método de análisis	Moléculas antioxidantes	Referencia
	54.2% de atrapamiento de radicales DPPH	DPPH		
	203 ± 10 µM Fe(II) g <sup>-1</sup>	FRAP	Acido gálico	Banerjee <i>et al.</i> (2020)

encontrando valores entre 206.67 y 365.33 mg equivalentes de ácido gálico equivalente 100 g<sup>-1</sup> en la cáscara de la vaina. López-Vargas *et al.* (2013) evaluaron las propiedades antioxidantes del polvo de fibra de maracuyá (*Passiflora edulis* var. *flavicarpa*) para uso como ingrediente alimentario, sus resultados indicaron encontrando valores considerables para ser candidato como ingrediente alimentario intermedio; bajo liofilización se pueden obtener coproductos de frutas con valor agregado. Moo-Huchin *et al.* (2015) realizaron ensayos DPPH y ABTS en cáscaras liofilizadas de caimito morado (*Chrysophyllum caimito* L.), anacardo amarillo y anacardo rojo (*Anacardium occidentale*), los valores encontrados indicaron que las cáscaras bajo ese proceso tecnológico son una fuente de compuestos antioxidantes, por lo que pueden servir como fuentes potenciales de antioxidantes para uso en las industrias alimentaria y farmacéutica.

El uso de otros procesos como la fermentación, también permite obtener productos fermentados con capacidad antioxidante elevada respecto a su materia prima y se vislumbra como una estrategia prometedora en la obtención de materias primas o alimentos y bebidas funcionales (Tabla 2, De Souza *et al.*, 2018).

En general, las pruebas de la actividad antioxidante *in vitro* de coproductos y derivados y su uso con fines benéficos a la salud apuntan a su potencial como fuente de compuestos bioactivos para la formulación de alimentos funcionales presentando oportunidades para aprovecharlos en cadenas de valor alimentarias innovadoras.

Producto o coproducto	Capacidad antioxidante	Método de análisis	Moléculas antioxidantes	Referencia
Cáscaras de rambután	38.24 µg mL <sup>-1</sup> 0.203 EAG mL <sup>-1</sup>	ABTS FRAP	Elagitaninos (geraniina, corilagina y ácido elágico)	Hernández <i>et al.</i> (2017)
Pulpa residual de mango	29.16 ± 0.76 µmol ET g <sup>-1</sup>	DPPH y ABTS	Equivalentes de ácido gálico, ácido cumárico, mangiferina	Selani <i>et al.</i> (2016)
Coproducto de mango	35.81 ± 1.01 µmol ET g <sup>-1</sup>			
Co-productos de maracuyá (piel, albedo y semilla)	6.28 - 13.65 µmol ET g <sup>-1</sup>	DPPH y ABTS	Ácido cumárico, epicatequina.	Selani <i>et al.</i> (2016)
Cáscara y pulpa residual de piña	5.76 ± 0.12 µmol ET g <sup>-1</sup>	DPPH y ABTS	Ácido cumárico, ácidos hidroxicinámicos	Selani <i>et al.</i> (2016)
Coproducto de piña	13.46 ± 0.62 µmol ET g <sup>-1</sup>			
Vino de <i>Eugenia dysenterica</i> DC.	0.51 mg L <sup>-1</sup> EC <sub>50</sub> 775.33 mM de sulfato ferroso	DPPH FRAP	β- caroteno, vitamina C	de Souza <i>et al.</i> (2018)
Vino de <i>Myrciaria jaboticaba</i>	5.21 mg L <sup>-1</sup> EC <sub>50</sub> 315.45 mM de sulfato ferroso	DPPH FRAP	Antocianinas, flavonoides, taninos, polifenoles	de Souza <i>et al.</i> (2018)
Vino de pitahaya	46.6 mg L <sup>-1</sup> EC <sub>50</sub> 15.35 mM de sulfato ferroso	DPPH FRAP	Compuestos fenólicos	de Souza <i>et al.</i> (2018)
Semillas de mango variedad Ataulfo	5375.9 mg ET g <sup>-1</sup>	FRAP	Etil-galato, penta-O-galoil-glucosido, ramnetina.	Torres-León <i>et al.</i> (2017)
	1738.2 mg ET g <sup>-1</sup>	DPPH		
	3658 mg ET g <sup>-1</sup>	ABTS		
Extracto de cáscara de mango Ataulfo	96.5% de inhibición	Lipoperoxidación	Compuestos fenólicos	Ordoñez-Torres <i>et al.</i> (2021)
	8.52 ± 2.05 % de inhibición	ABTS		
	94.00 ± 3.08% de inhibición	DPPH		
Semilla de aguacate Hass fermentado en estado sólido	91.74 ± 3.12% de inhibición	Lipoperoxidación	catequina y epicatequina	Yepes-Betancur <i>et al.</i> (2021)
	1815.13 ± 318.76 mg ET g <sup>-1</sup>	ABTS		
	13019.04 ± 850.73 mg ET g <sup>-1</sup>	DPPH		

EAG = equivalentes de ácido gálico; ET = equivalentes de trolox; EC = equivalentes de catequina EC<sub>50</sub> = concentración de antioxidante requerido para reducir los radicales al 50%

Nota. Elaboración propia.

## Conclusiones

En conclusión, el interés por alimentos o materias primas que posean diversas sustancias antioxidantes está aún en aumento. Estas se pueden administrar como componentes alimentarios o incluso como productos farmacéuticos específicos. Es importante enfatizar en los métodos analíticos que se utilizan para determinar la actividad antioxidante, ya que, a pesar de que se dispone de diversos

métodos, estos difieren entre sí en diversos aspectos tanto fundamental como metodológico y como consecuencia el resultado diferido; por lo que se debe considerar diferentes variables como las fuentes de oxidación, concentraciones, interacciones con otras especies oxidantes y matrices biológicas.

La elección del método adecuado o la combinación de métodos es importante para la evaluación válida de la actividad antioxidante.

Los frutos tropicales son una fuente importante de compuestos antioxidantes, superando en algunos casos a los frutos boreales como el caso del cacao. Además, los coproductos que se pueden obtener de estos frutos, en caso todos los casos superan la actividad antioxidante de los frutos frescos, por lo que se convierten en una fuente rica de metabolitos antioxidantes.

## Referencias

- Abdel-Aal, E.S.M. y Rabalski, I. (2015). Composition of lutein ester regioisomers in marigold flower, dietary supplement, and herbal tea. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(44): 9740-9746. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b04430>
- Abuajah, C.I., Ogbonna, A.C. y Osuji, C.M. (2015). Functional components and medicinal properties of food: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 52: 2522-2529. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25892752/>
- Akar, Z. y Burnaz, N.A. (2019). A new colorimetric method for CUPRAC assay with using of TLC plate. *LWT-Food Science and Technology*, 112: 108212. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.05.110>
- Apak, R., Ozyurek, M., Güçlü, K. y Capanoğlu, E. (2016). Antioxidant activity/capacity measurement. 1. Classification, physicochemical principles, mechanisms, and electron transfer (ET)-based assays. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(5): 997-1027. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b04739>
- Arús, B.A., Souza, D.G., Bellaver, B., Souza, D.O., Gonçalves, C.A., Quincozes-Santos, A. y Bobermin, L.D. (2017). Resveratrol modulates GSH system in C6 astroglial cells through heme oxygenase 1 pathway. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 428(1-2): 67-77. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28070834/>
- Banerjee, J., Singh, R., Vijayaraghavan, R., MacFarlane, D., Patti, A.F. y Arora, A. (2017). Bioactives from fruit processing wastes: Green approaches to valuable chemicals. *Food Chemistry*, 225: 10-22. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.12.093>
- Banerjee, P., Jana, S., Mukherjee, S., Bera, K., Majee, S.K., Ali, I., Pal, S., Ray, B. y Ray, S. (2020). The heteropolysaccharide of *Mangifera indica* fruit: Isolation, chemical profile, complexation with  $\beta$ -lactoglobulin and antioxidant activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 165: 93-99. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32980416/>
- Benítez-Estrada, A., Villanueva-Sánchez, J., González-Rosendo, G., Alcántar-Rodríguez, V.E., Puga-Díaz, R. y Quintero-Gutiérrez, A.G. (2020). Determinación de la capacidad antioxidante total de alimentos y plasma humano por fotoquimioluminiscencia: Correlación con ensayos fluorométricos (ORAC) y espectrofotométricos (FRAP). *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 23: 1-9. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2020.0.244>
- Benzie, I.F. y Devaki, M. (2017). The ferric reducing/antioxidant power (FRAP) assay for non-enzymatic antioxidant capacity: Concepts, procedures, limitations, and applications. *Measurement of Antioxidant Activity & Capacity* (eds R. Apak, E. Capanoglu and F. Shahidi). <https://doi.org/10.1002/9781119135388.ch5>
- Bjørklund, G. y Chirumbolo, S. (2017). Role of oxidative stress and antioxidants in daily nutrition and human health. *Nutrition*, 33: 311-321. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2016.07.018>
- Bustamante-Rangel, M., Delgado-Zamarreño, M.M., Pérez-Martín, L., Rodríguez-Gonzalo, E. y Domínguez-Alvarez, J. (2018). Analysis of isoflavones in foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(2): 391-411. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12325>
- Camarena-Tello, J., Martínez-Flores, H., Garnica-Romo, M., Padilla-Ramírez, J., Saavedra-Molina, A., Alvarez-Cortes, O., Bartolomé-Camacho, M.C. y Rodiles-López, J.O. (2018). Quantification of phenolic compounds and *in vitro* radical scavenging abilities with leaf extracts from two varieties of *Psidium quajava* L. *Antioxidants*, 7(3): 34. <http://dx.doi.org/10.3390/antiox7030034>
- Can-Cauich, C.A., Sauri-Duch, E., Betancur-Ancona, D., Chel-Guerrero, L., González-Aguilar, G.A., Cuevas-Glory, L.F., Pérez-Pacheco, E. y Moo-Huchin, V.M. (2017). Tropical fruit peel powders as functional ingredients: Evaluation of their bioactive compounds and antioxidant activity. *Journal of Functional Foods*, 37: 501-506. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.08.028>
- Courtois, A., Jourdes, M., Dupin, A., Lapèze, C., Renouf, E., Biais, B., Teissedre, P.L., Mérillon, J.M., Richard, T. y Krisa, S. (2017). *In vitro* glucuronidation and sulfation of  $\epsilon$ -viniferin, a resveratrol dimer, in humans and rats. *Molecules*, 22(5): 1-12. <https://doi.org/10.3390/molecules22050733>
- Cui, Q., Du, R., Liu, M. y Rong, L. (2020). Lignans and their derivatives from plants as antivirals. *Molecules*, 25(1): 183. <https://dx.doi.org/10.3390/molecules25010183>
- De Souza, A.C., Fernandes, A.C.F., Silva, M.S., Schwan, R.F. y Dias, D.R. (2018). Antioxidant activities of tropical fruit wines. *Journal of the Institute of*

- Brewing, 124 (4): 492-497.  
<https://doi.org/10.1002/jib.511>
- Dröge, W. (2002). Free radicals in the physiological control of cell function. *Physiological Reviews*, 82(1): 47-95.  
<https://doi.org/10.1152/physrev.00018.2001>
- Ellong, E.N., Billard, C., Adenet, S. y Rochefort, K. (2015). Polyphenols, carotenoids, vitamin c content in tropical fruits and vegetables and impact of processing methods. *Food and Nutrition Sciences*, 6: 299-313.  
<http://dx.doi.org/10.4236/fns.2015.63030>
- FAO (2020). Análisis del mercado de las principales frutas tropicales. Panorama general de febrero de 2020. Roma.  
<http://www.fao.org/3/ca9213es/ca9213es.pdf>
- Fenech, M., Amaya, I., Valpuesta, V. y Botella, M.A. (2018). Vitamin C content in fruits: Biosynthesis and regulation. *Frontiers in Plant Science*, 9: 2006.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2018.02006>
- Fernando, I.P., Kim, M., Son, K.T., Jeong, Y., y Jeon, Y.J. (2016). Antioxidant activity of marine algal polyphenolic compounds: A mechanistic approach. *Journal of Medicinal Food*, 19(7): 615-628. <https://doi.org/10.1089/jmf.2016.3706>
- Galli, F., Azzi, A., Birringer, M., Cook-Mills, J.M., Eggersdorfer, M., Frank, J., Cruciani, G., Lorkowski, S. y Özer, N.K. (2017). Vitamin E: Emerging aspects and new directions. *Free Radical Biology and Medicine*, 102: 16-36.  
<https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2016.09.017>
- García-Argáez, A.N., González-Lugo, N.M., Márquez, C. y Martínez-Vázquez, M. (2003). Cumarinas presentes en especies del género Casimiroa. *Revista de la Sociedad Química de México*, 47(2): 151-154.  
[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0583-76932003000200013&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0583-76932003000200013&lng=es&tlng=es)
- Goodarzi, S., Rafiei, S., Javadi, M., Haghghian, H.K. y Noroozi, S. (2018). A review on antioxidants and their health effects. *Journal of Nutrition and Food Security*, 3(2): 106-112.  
<http://jnfs.ssu.ac.ir/article-1-158-en.pdf>
- Gordo, D.A.M. (2018). Los compuestos fenólicos, un acercamiento a su biosíntesis, síntesis y actividad biológica. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9(1): 81-104.  
<https://doi.org/10.22490/21456453.1968>
- Gregoris, E., Pereira, L.G.P., Fabris, S., Bertelle, M., Sicari, M. y Stevanato, R. (2013). Antioxidant properties of brazilian tropical fruits by correlation between different assays. *BioMed Research International*, 2013: 132759.  
<https://doi.org/10.1155/2013/132759>
- Guija-Poma, E., Inocente-Camones, M. Ángel, Ponce-Pardo, J. y Zarzosa-Norabuena, E. (2015). Evaluación de la técnica 2,2-Difenil-1-Picrilhidrazilo (DPPH) para determinar capacidad antioxidante. *Horizonte Médico (Lima)*, 15(1), 57-60. <https://www.horizontemedico.usmp.edu.pe/index.php/horizontemed/article/view/148>
- Gulcin, I. (2020). Antioxidants and antioxidant methods: an updated overview. *Archives of Toxicology*, 94: 651-715.  
<https://doi.org/10.1007/s00204-020-02689-3>
- Gupta, D. (2015). Methods for determination of antioxidant capacity: a review. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 6(2): 546-566. <https://ijpsr.com/wp-content/uploads/2015/01/6-Vol.-6-Issue-2-Feb-2015-IJPSR-RE-1434-Paper-6.pdf>
- Hashem, R.M., Hassanin, K.M., Rashed, L.A., Mahmoud, M.O. y Hassan, M.G. (2016). Effect of silibinin and vitamin E on the ASK1-p38 MAPK pathway in d-galactosamine/ lipopolysaccharide induced hepatotoxicity. *Experimental Biology and Medicine (Maywood)*, 241(11): 1250-1257.  
<https://doi.org/10.1177/1535370216636719>
- Hedayati, N., Naeini, M.B., Nezami, A., Hosseinzadeh, H., Wallace-Hayes, A., Hosseini, S., Imenshahidi, M. y Karimi, G. (2019). Protective effect of lycopene against chemical and natural toxins: A review. *BioFactors*, 45: 5-23.  
<https://doi.org/10.1002/biof.1458>
- Hernández, C., Ascacio-Valdés, J., De la Garza, H., Wong-Paz, J., Aguilar, C.N., Martínez-Ávila, G.C., Castro-López, C. y Aguilera-Carbó, A. (2017). Polyphenolic content, *in vitro* antioxidant activity and chemical composition of extract from *Nephelium lappaceum* L. (Mexican rambutan) husk. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 10(12): 1201-1205.  
<https://doi.org/10.1016/j.apjtm.2017.10.030>
- Hostetler, G.L., Ralston, R.A. y Schwartz, S.J. (2017). Flavones: Food Sources, bioavailability metabolism, and bioactivity. *Advances in Nutrition*, 8(3):423-435.  
<https://doi.org/10.3945/an.116.012948>
- Ibarra-Garza, I., Ramos-Parra, P.A., Hernández-Brenes, C. y Jacobo-Velázquez, D.A. (2015). Effects of postharvest ripening on the nutraceutical and physicochemical properties of mango (*Mangifera indica* L. cv Keitt). *Postharvest Biology and Technology*, 103: 45-54.  
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.02.014>
- Imran, M., Ghorat, F., Ul-Haq, I., Ur-Rehman, H., Aslam, F., Heydari, M., Shariati, M.A., Okuskhanova, E., Yessimbekov, Z.,

- Thiruvengadam, M., Hashempur, M.H. y Rebezov, M. (2020). Lycopene as a natural antioxidant used to prevent human health disorders. *Antioxidants*, 9(8): 706.  
<https://doi.org/10.3390/antiox9080706>
- Jiang, N., Doseff, A. y Grotewold, E. (2016). Flavones: From biosynthesis to health benefits. *Plants*, 5(2): 27. <https://dx.doi.org/10.3390%2Fplants5020027>
- Kamal-Eldin, A. y Budilarto, E. (2015). 6 - Tocopherols and tocotrienols as antioxidants for food preservation. Handbook of Antioxidants for Food Preservation. Woodhead Publishing Series in Food Science, *Technology and Nutrition*, 2015: 141-159.  
<https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-089-7.00006-3>
- Kaya, B., Kaya, K., Koca, A. y Ülküseven, B. (2019). Thiosemicarbazide-based iron (III) and manganese (III) complexes. Structural, electrochemical characterization and antioxidant activity. *Polyhedron*, 173: 114130.  
<https://doi.org/10.1016/j.poly.2019.114130>
- Křížová, L., Dadáková, K., Kašparovská, J. y Kašparovský, T. (2019). Isoflavones. *Molecules*, 24(6): 1076.  
<https://doi.org/10.3390/molecules24061076>
- Kumar, V., Mohan, S., Singh, D.K., Verma, D.K., Singh, V.K. y Hasan SH. (2017). Photo-mediated optimized synthesis of silver nanoparticles for the selective detection of Iron (III), antibacterial and antioxidant activity. *Materials Science and Engineering: C*. 71: 1004-1019.  
<https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.11.013>
- Kwatra, B. (2020). A review on potential properties and therapeutic applications of lycopene. *International Journal of Medical and Biomedical Studies*, 4(4): 33-44. <http://dx.doi.org/10.32553/ijmbs.v4i4.1081>
- Lachowicz, S., Oszmiański, J., Wiśniewski, R., Seliga, Ł. y Pluta, S. (2019). Chemical parameters profile analysis by liquid chromatography and antioxidative activity of the Saskatoon berry fruits and their components. *European Food Research and Technology*, 245(9): 2007-2015.  
<https://doi.org/10.1007/s00217-019-03311-2>
- Lee, G. y Han, S. (2018). The role of vitamin e in immunity. *Nutrients*, 10(11): 1614.  
<https://doi.org/10.3390/nu10111614>
- Li, C. y Schluesener, H. (2015). Health-promoting effects of the citrus flavanone hesperidin. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(3): 613-631. <http://dx.doi.org/10.1080/10408398.2014.906382>
- Lim, Y.Y., Lim, T.T. y Tee, J.J. (2007). Antioxidant properties of several tropical fruits: A comparative study. *Food Chemistry*, 103(3): 1003-1008.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.08.038>
- Londoño, J.L. (2012). Antioxidantes: importancia biológica y métodos para medir su actividad. *Desarrollo y transversalidad serie Lasallista Investigación y Ciencia* (pp. 130-162). Corporación Universitaria Lasallista.  
<http://repository.lasallista.edu.co/dspace/handle/10567/133>.
- López-Romero, J.C., Ansorena, R., Gonzalez-Aguilar, G.A., Gonzalez-Rios, H., Ayala-Zavala, J.F. y Siddiqui, M.W. (2016). Chapter 5 Applications of plant secondary metabolites in food systems. *Plant Secondary Metabolites* (Vol. 3, pp. 195-232). Set. <http://dx.doi.org/10.1201/9781315207506-16>
- López-Vargas, J.H., Fernández-López, J., Pérez-Alvarez, J.A. y Viuda-Martos, M. (2013). Chemical, physico-chemical, technological, antibacterial and antioxidant properties of dietary fiber powder obtained from yellow passion fruit (*Passiflora edulis* var. *flavicarpa*) co-products. *Food Research International*, 51(2): 756-763.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.01.055>
- Maharramova, G., Taslimi, P., Sujayev, A., Farzaliyev, V., Durmaz, L. y Gülçin, I. (2018). Synthesis, characterization, antioxidant, antidiabetic, anticholinergic, and antiepileptic properties of novel N-substituted tetrahydropyrimidines based on phenylthiourea. *Journal of Biochemical and Molecular Toxicology*, 32(12): e22221.  
<https://doi.org/10.1002/jbt.22221>
- Martínez, R., Torres, P., Meneses, M.A., Figueroa, J.G., Pérez-Alvarez, J.A. y Viuda-Martos, M. (2012). Chemical, technological and *in vitro* antioxidant properties of cocoa (*Theobroma cacao* L.) co-products. *Food Research International*, 49(1): 39-45. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.08.005>
- Mercado-Ruiz, J.N., Tortoledo-Ortiz, O., García-Robles, J.M., Báez-Sañudo, R., García-Moreno, B.Y., Ávila-Prado, J., Corella-Salazar, D.A., Cruz-Félix, M.C., Velásquez-Jiménez, D. y Zuñiga-Martínez, B.S. (2019). Calidad comercial de piña MD2 (*Ananas comosus* L.) tratada en postcosecha con ácido 2-hidroxibenzoico. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 20(2): 140-154.  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81361553004>
- Mittler, Ron. (2017). ROS are Good. *Trends in Plant Science*, 22 (1), 11 - 19.  
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.08.002>
- Moo-Huchin, V.M., Moo-Huchin, M.I., Estrada-León, R.J., Cuevas-Glory, L., Estrada-Mota, I.A., Ortiz-Vázquez, E., Betancur-Ancona, D. y Sauri-Duch, E. (2015). Antioxidant compounds, antioxidant activity and phenolic content in peel from three tropical fruits from Yucatan, Mexico. *Food Chemistry*, 166: 17-22.

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.05.127>

- Morales, A., Vicente-Sánchez, C., Sandoval, J.M., Tagarro, M., Lopez-Novoa, J. y Pérez-Barriocanal, F. (2004). Efecto de la quercetina sobre la nefrotoxicidad producida por cadmio. *Revista de Toxicología* 21: 23-30. <https://rev.aetox.es/wp/index.php/21-14/>
- Murthy, P.S. y Naidu, M.M. (2012). Recovery of phenolic antioxidants and functional compounds from coffee industry by-products. *Food and Bioprocess Technology*, 5(3): 897-903. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0363-z>
- Musa, K.H., Abdullah, A., Kuswandi, B. y Hidayat, M.A. (2013). A novel high throughput method based on the DPPH dry reagent array for determination of antioxidant activity. *Food Chemistry*, 141(4): 4102-4106. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.06.112>
- Nichols, A.W., Chatterjee, S., Sabat, M. y Machan, C.W. (2018). Electrocatalytic reduction of CO<sub>2</sub> to formate by an iron Schiff base complex. *Inorganic Chemistry*, 57(4): 2111-2121. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.7b02955>
- Nimse, S.B. y Pal, D. (2015). Free radicals, natural antioxidants, and their reaction mechanisms. *RSC Advances*, 5(35): 27986-28006. <https://doi.org/10.1039/C4RA13315C>
- Ochoa-Becerra, M., Mojica-Contreras, L., Hsieh-Lo, M., Mateos-Díaz, J. y Castillo-Herrera, G. (2020). Lutein as a functional food ingredient: Stability and bioavailability. *Journal of Functional Foods*, 66: 103771. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103771>
- Ordoñez-Torres, A., Torres-León, C., Hernández-Almanza, A., Flores-Guía, T., Luque-Contreras, D., Aguilar, C.N. y Ascacio-Valdés, J. (2021). Ultrasound-microwave-assisted extraction of polyphenolic compounds from Mexican "Ataulfo" mango peels: Antioxidant potential and identification by HPLC/ESI/MS. *Phytochemical Analysis*, 32(4): 495-502. <https://doi.org/10.1002/pca.2997>
- Pehlivan, F.E. (2017). Vitamin C: An Antioxidant agent. En Hamza AH. (ed.) *Vitamin C*. IntechOpen. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.69660>
- Peña-Torres, E.F., González-Ríos, H., Avendaño-Reyes, L., Valenzuela-Grijalva, N.V., Pinelli-Saavedra, A., Muhlia-Almazán, A. y Peña-Ramos, E.A. (2019). Ácidos hidroxibenzoicos en producción animal: farmacocinética, farmacodinamia y sus efectos como promotor de crecimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 10(2): 391-415. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v10i2.4526>
- Pereira-Caro, G., Kay, C.D., Clifford, M.N. y Crozier, A. (2020). Flavanonas. En Tomás-Barberán F.A., González-Sarrias A., García-Villalba R. (eds). *Dietary polyphenols: Metabolism and health effects*. (First Edition, pp. 439-495). John Wiley & Sons. <https://www.wiley.com/ens/>
- Pereira-Netto, A.B. (2018). Tropical fruits as natural, exceptionally rich, sources of bioactive compounds. *International Journal of Fruit Science*, 18(3): 231-242. <https://doi.org/10.1080/15538362.2018.1444532>
- Pfukwa, T.M., Chikwanh, O.C., Katiyatiya, C.L.F., Fawole, O.A., Manley, M. y Mapiye, C. (2020). Southern African indigenous fruits and their byproducts: Prospects as food antioxidants. *Journal of Functional Foods*, 75: 104220. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.104220>
- Philipov, S. y Doncheva, T. (2013) Alkaloids Derived from Ornithine: Tropane Alkaloids. En Ramawat K., Mérillon JM. (eds) *Natural Products*. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-22144-6\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-22144-6_8)
- Prior, R.L.; Wu, X. y Schaich, K. (2005). Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(10): 4290-4302. <https://doi.org/10.1021/jf0502698>
- Priyadarshini, A. y Priyadarshini, A. (2018). Market dimensions of the fruit juice industry. En Rajauria G, Tiwari BK. (eds). *Fruit Juices. Extraction, Composition, Quality and Analysis*, pp. 15-32. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802230-6.00002-3>
- Psomas, G. (2020). Copper (II) and zinc (II) coordination compounds of non-steroidal anti-inflammatory drugs: Structural features and antioxidant activity. *Coordination Chemistry Reviews*, 412: 213259. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2020.213259>
- Ribeiro, D., Freitas, M., Silva, A.M.S., Carvalho, F. y Fernandes, E. (2020). Antioxidant and pro-oxidant activities of carotenoids. *Food and Chemical Toxicology*, 120: 681-699. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.07.060>
- Ribeiro, D., Freitas, M., Silva, A.M.S., Carvalho, F. y Fernandes, E. (2018). Antioxidant and pro-oxidant activities of carotenoids and their oxidation products. *Food and Chemical Toxicology*, 120: 681-699. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.07.060>
- Rodríguez-Amaya, D.B. (2016). Natural food pigments and colorants. *Current Opinion in Food Science*, 7: 20-26. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2015.08.004>
- Saini, R.K. y Keum, Y.S. (2018). Carotenoid extraction methods: A review of recent developments. *Food Chemistry*, 240: 90-103. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.099>

- Santos-Silva, J., Ortiz, D.W., Garcia, L.G.C., Asquiere, E.R., Becker, F.S. y Damiani, C. (2020). Effect of drying on nutritional composition, antioxidant capacity and bioactive compounds of fruits co-products. *Food Science and Technology*, 40(4): 810-816. <http://dx.doi.org/10.1590/fst.21419>
- Schomburg, L. (2017). Dietary selenium and human health. *Nutrients*, 9: 22. <https://dx.doi.org/10.3390%2Fnu9010022>
- Selani, M.M., Bianchini, A., Ratnayake, W.S., Flores, R.A., Massarioli, A.P., de Alencar, S.M. y Canniatti-Brazaca, S.G. (2016). Physicochemical, functional and antioxidant properties of tropical fruits co-products. *Plant Foods for Human Nutrition*, 71(2), 137-144. <https://doi.org/10.1007/s11130-016-0531-z>
- Septembre-Malaterre, A., Stanislas, G., Douraguia, E. y Gonthier, M.P. (2016). Evaluation of nutritional and antioxidant properties of the tropical fruits banana, litchi, mango, papaya, passion fruit and pineapple cultivated in Réunion French Island. *Food Chemistry*, 212: 225-233. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.05.147>
- Shahidi, F. y Zhong, Y. (2015). Measurement of the antioxidant activity. *Journal of Functional Foods*, 18: 757-781. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.01.047>
- Sies, H. (2020). Oxidative stress: concept and some practical aspects. *Antioxidants*, 9(9): 852. <https://doi.org/10.3390/antiox9090852>
- Sies, H. y Jones, D.P. (2020). Reactive oxygen species (ROS) as pleiotropic physiological signalling agents. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 21(7), 363-383. <https://doi.org/10.1038/s41580-020-0230-3>
- Singh, A., Singh, N.B., Hussain, I. y Singh, H. (2017). Effect of biologically synthesized copper oxide nanoparticles on metabolism and antioxidant activity to the crop plants *Solanum lycopersicum* and *Brassica oleracea* var. *Botrytis*. *Journal of Biotechnology*, 262: 11-27. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2017.09.016>
- Sirerol, J.A., Rodríguez, M.L., Mena, S., Asensi, M.A., Estrela, J.M. y Ortega, A.L. (2016). Role of natural stilbenes in the prevention of cancer. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, Vol. 2016: 3128951. <https://doi.org/10.1155/2016/3128951>
- Siriamornpun, S. y Kaewseejan, N. (2017). Quality, bioactive compounds and antioxidant capacity of selected climacteric fruits with relation to their maturity. *Scientia Horticulturae*, 221: 33-42. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.04.020>
- Soto Leiva, C. (2015). *Determinación de la capacidad antioxidante de las espigas de la planta de chíá*. (Tesis de pregrado). Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/137522>
- Stevanovic, T., Diouf, P.N. y Garcia-Perez, M. (2009). Bioactive polyphenols from healthy diets and forest biomass. *Current Nutrition & Food Science*, 5(4): 264-295. <https://doi.org/10.2174/157340109790218067>
- Sueishi, Y., Sue, M. y Masamoto, H. (2018). Seasonal variations of oxygen radical scavenging ability in rosemary leaf extract. *Food Chemistry* 245: 270-274. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.10.085>
- Sy, C., Dangles, O., Borel, P. y Caris-Veyrat, C. (2015). Interactions between carotenoids from marine bacteria and other micronutrients: impact on stability and antioxidant activity. *Marine Drugs*, 13(11): 7020-7039. <https://doi.org/10.3390/md13117020>
- Tarushi, A., Kakoulidou, C., Raptopoulou, C.P., Psycharis, V., Kessissoglou, D.P., Zoi, I., Papadopoulou, A.N. y Psomas, G. (2017). Zinc complexes of diflunisal: Synthesis, characterization, structure, antioxidant activity, and *in vitro* and *in silico* study of the interaction with DNA and albumins. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 170: 85-97. <https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2017.02.010>
- Tian, X. y Schaich, K.M. (2013). Effects of molecular structure on kinetics and dynamics of the trolox equivalent antioxidant capacity assay with ABTS<sup>•+</sup>. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(23): 5511-5519. <https://doi.org/10.1021/jf4010725>
- Torres-León, C., Rojas, R., Serna-Cock, L., Belmares-Cerda, R. y Aguilar, C.N. (2017). Extraction of antioxidants from mango seed kernel: Optimization assisted by microwave. *Food and Bioproducts Processing*, 105: 188-196. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.07.005>
- Traber, M. y Atkinson, J. (2007). Vitamin E, antioxidant and nothing more. *Free Radical Biology and Medicine*, 43(1): 4-15. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2007.03.024>
- Valencia-Avilés, E., Ignacio-Figueroa, I., Sosa-Martínez, E., Bartolomé-Camacho, M.C., Martínez-Flores, H.E. y García-Pérez, M.E. (2017). Polifenoles: propiedades antioxidantes y toxicológicas. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, 16: 15-29. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/29781/1/2.%201583-4794-2-PB.pdf>
- Vázquez-Briones, M.C., Chavez-Reyes, Y. y Mata-García, M. (2019). Frutas tropicales como fuentes de antioxidantes y sus perspectivas en la industria de bebidas. *Proceedings-©ECORFAN-México*. pp. 68-81.

[https://www.ecorfan.org/proceedings/Proceedings\\_Biologia\\_y\\_Quimica\\_TI/Proceedings\\_Biologia\\_y\\_Quimica\\_TI\\_7.pdf](https://www.ecorfan.org/proceedings/Proceedings_Biologia_y_Quimica_TI/Proceedings_Biologia_y_Quimica_TI_7.pdf)

Vázquez-Ovando, A., Ovando-Medina, I., Adriano-Anaya, L., Betancur-Ancona, D. y Salvador-Figueroa, M. (2016). Alcaloides y polifenoles del cacao, mecanismos que regulan su biosíntesis y sus implicaciones en el sabor y aroma. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 66(3): 239-254. <http://www.alanrevista.org/ediciones/2016/3/art-10>

Viglianisi, C. y Menichetti S. (2019). Chain breaking antioxidant activity of heavy (S, Se, Te) chalcogens substituted polyphenols. *Antioxidants*, 8(10): 487. <https://dx.doi.org/10.3390%2F antioxidants8100487>

Viuda-Martos, M., Ruiz-Navajas, Y., Fernández-López, J., Sendra, E., Sayas-Barberá, E. y Pérez-Álvarez, J.A. (2011). Antioxidant properties of pomegranate (*Punica granatum* L.) bagasses obtained as co-product in the juice extraction. *Food Research International*, 44(5): 1217-1223. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.10.057>

Wang, L., Xu, X., Su, G., Shi, B. y Shan, A. (2017). High concentration of vitamin E supplementation in sow diet during the last week of gestation and lactation affects the immunological variables and antioxidative parameters in piglets. *Journal of Dairy Research*, 84(1), 8-13. <https://doi.org/10.1017/s0022029916000650>

Wilson, D.W., Nash, P., Buttar, H.S., Griffiths, K., Singh, R., De Meester, F., Horiuchi, R. y Takahashi, T. (2017). The role of food antioxidants, benefits of functional foods, and influence of feeding habits on the health of the older person: An Overview. *Antioxidants*, 6(4): 81. <https://doi.org/10.3390/antiox6040081>

Wu, X., Beecher, G.R., Holden, J.M., Haytowitz, D.B., Gebhardt, S.E. y Prior, R.L. (2004). Lipophilic and hydrophilic antioxidant capacities of common foods in the United States. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(12), 4026-4037. <https://doi.org/10.1021/jf049696w>

Xu, C., Qiao, L., Guo, Y., Ma, L. y Cheng, Y. (2018). Preparation, characteristics and antioxidant activity of polysaccharides and proteins-capped selenium nanoparticles synthesized by *Lactobacillus casei* ATCC 393. *Carbohydrate Polymers*, 195, 576-585. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.04.110>

Yang, C., Fischer, M., Kirby, C., Liu, R., Zhu, H., Zhang, H., Chen, Y., Sun, Y., Zhang, L. y Tsao, R. (2018). Bioaccessibility, cellular uptake and transport of luteins and assessment of their antioxidant activities. *Food Chemistry*, 249, 66-76. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.12.055>

Yepes-Betancur, D.P., Márquez-Cardozo, C.J., Cadena-Chamorro, E.M., Martínez-Saldarriaga, J., Torres-León, C., Ascacio-Valdes, A. y Aguilar, C.N. (2021). Solid-state fermentation-assisted extraction of bioactive compounds from hass avocado seeds. *Food and Bioprocess Processing*, 126: 155-163. <https://dx.doi.org/10.1016/j.fbp.2020.10.012>

Yin, Y., Zheng, Z. y Jiang, Z. (2019). Effects of lycopene on metabolism of glycolipid in type 2 diabetic rats. *Biomedicine and Pharmacotherapy*, 109: 2070-2077. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biopha.2018.07.100>

Young, A. y Lowe, G. (2018). Carotenoids—Antioxidant Properties. *Antioxidants*, 7(2): 28. <https://dx.doi.org/10.3390%2F antioxidants7020028>

Yu J, Bi X, Yu B, Chen D. 2016. Isoflavones: anti-inflammatory benefit and possible warnings. *Nutrients*, 8(6): 361. <https://dx.doi.org/10.3390%2F nutrients8060361>

Yunping, Y., Di, Z., Ruiting, L., Hang, Z., Wentao, L., Changmo, L. y Shuo, W. (2020). Zeaxanthin in soybean oil: impact of oxidative stability, degradation pattern, and product analysis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(17): 4981-4990. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b07480>

Zhang, B., Cai, J., Duan, C.Q., Reeves, M.J. y He, F. (2015). A review of polyphenolics in oak woods. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(4): 6978-7014. <https://doi.org/10.3390/ijms16046978>

Zhao, L., Yuan, X., Wang, J., Feng, Y., Ji, F., Li, Z. y Bian, J. (2019). A review on flavones targeting serine/threonine protein kinases for potential anticancer drugs. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 27: 667-685. <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2019.01.027>