



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE
HIDALGO**

Instituto de Ciencias Agropecuarias (ICAp)

**“Extracción y caracterización de licopeno mediante
ultrasonido de alta intensidad y tecnología verde, a
partir de desechos de tomate (*Solanum
lycopersicum*)”**

T E S I S

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA
EN CIENCIAS DE LOS ALIMENTOS**

P R E S E N T A:

GIERALDIN CAMPOS LOZADA

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Gabriel Aguirre Álvarez

CO-DIRECTORA:

M.C.A. Arely León López

ASESORES:

Dra. Alma Delia Hernández Fuentes

Dr. Rubén Jiménez Alvarado



Tulancingo de Bravo Hidalgo, Septiembre del 2020



COORDINACION DE INVESTIGACION Y POSGRADO DEL ICAP

Actas de la reunión del Comité de Tesis de Maestría en Ciencia de los Alimentos
Apertura:

La reunión ordinaria para evaluar los avances de la tesis intitulada: **“EXTRACCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LICOPENO MEDIANTE ULTRASONIDO DE ALTA INTENSIDAD Y TECNOLOGÍA VERDE, A PARTIR DE DESECHOS DE TOMATE (*Solanum Lycopersicum*)”**, que desarrolla el estudiante I.A Gieraldin Campos Lozada.

Asistentes:

Dr. Gabriel Aguirre Álvarez.

Mtra. Arely León López.

Dra. Alma Delia Hernández Fuentes.

Dr. Rubén Jiménez Alvarado.

A. Revisión de Trabajo de Tesis

Observaciones:

El comité revisó con antelación el trabajo de tesis en extenso propuesto por la estudiante, comunicándole a la estudiante, Gieraldin Campos Lozada., oportunamente las correcciones, adiciones y/o modificaciones que debería considerar para mejorar su trabajo y poder continuar con el proceso de obtención de grado la estudiante atendió de forma conveniente las sugerencias del comité.

B. Acuerdos

En esta fecha, se comunica atentamente que el comité conformado por los profesores firmantes, otorgamos nuestra autorización para que la estudiante imprima su trabajo final de tesis, y continúe con los trámites necesarios para la obtención del grado de maestría respectivo.

ATENTAMENTE

“AMOR, ORDEN Y PROGRESO”

Tulancingo de Bravo, Hidalgo a 17 de Septiembre del 2020.

Dr. Gabriel Aguirre Álvarez.

Mtra. Arely León López.

Dra. Alma Delia Hernández Fuentes.

Dr. Rubén Jiménez Alvarado.



Dedico mi trabajo principalmente a Dios quien me dio sabiduría y guio mis pasos para poder llegar a esta etapa y culminarla. Por enseñarme que si algo se quiere conseguir se debe luchar por ello.

A los mejores padres del mundo Gris y Tomi, quienes siempre a pesar de muchas caídas me han impulsado a crecer de manera espiritual, personal y laboral. Por su amor, apoyo y motivación, sin ustedes no sería quien soy. Los amo infinitamente...

A mis hermanas Karen, Jahtz y Kari, siempre han estado apoyándome en todo momento, echándome porras y motivándome cuando de pronto sentía que no podría. Las amo y admiro profundamente...

A mis sobrinos Diego, May, Sofi y Santi mis amores chiquitos que amo con el alma, quienes me han regalado tantos momentos de felicidad y me han sacado miles de sonrisas en momentos difíciles.

Agradecimientos

A Dios quién me permitió llegar a este punto de mi vida que tanto desee desde que era pequeña, por haberme dado salud y ayudarme a lograr mis objetivos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca otorgada para poder realizar este trabajo de investigación.

A mis padres Gris y Tomi a quienes amo infinitamente y siempre han estado apoyándome en cada momento de mi vida. No tengo como pagarles todo lo que han hecho por mí.

A mis hermanas y sobrinos que siempre me han motivado a seguir y a no rendirme, gracias por todo el apoyo. Los amo con el corazón...

Al Dr. Gabriel Aguirre Álvarez por toda la orientación y tiempo dedicado a mi formación profesional durante mis estudios de posgrado.

A mis compañeros de laboratorio, gracias por tantos momentos compartidos y por el apoyo que me brindaron.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	MARCO TEÓRICO	3
2.1	Antecedentes del tomate	3
2.1.1	Cultivo de tomate	5
2.2	Estructura morfológica del tomate.....	7
2.2.1	Características florales.....	8
2.2.2	Características del fruto	9
2.2.3	Factores de calidad	10
2.2.4	Color y maduración	10
2.3	Composición química	11
2.4	Licopeno	12
2.4.1	Biosíntesis de licopeno	17
2.4.2	Propiedades fisicoquímicas del licopeno.....	18
2.4.3	Propiedades funcionales del licopeno	19
2.4.4	Usos del licopeno	21
2.4.5	Biodisponibilidad	21
2.4.6	Ingesta de licopeno en la dieta.....	22
2.4.7	Tipos de extracción.....	22
2.5	Ultrasonido.....	24
2.5.1	Ultrasonido de alta intensidad	26
2.5.2	Efectos físicos y químicos del ultrasonido	27
2.5.3	Cavitación.....	27
2.6	Aplicación en la industria de alimentos	29
2.7	Parámetros del ultrasonido.....	30
2.7.1	Tiempo de sonicación.....	30
2.7.2	Temperatura.....	30
2.7.3	Tipo de solvente	30
2.8	Aceites vegetales.....	30
2.8.1	Ácidos grasos vegetales.....	32
2.8.2	Vitamina E.....	34

2.9	Aceite de Uva.....	34
2.10	Aceite de oliva extra virgen	35
2.11	Aceite de cacahuete	36
3	JUSTIFICACIÓN.....	38
4	OBJETIVOS.....	40
4.1	Objetivo general.....	40
4.2	Objetivos específicos	40
5	HIPÓTESIS	41
6	MATERIALES Y MÉTODOS.....	42
6.1	Materiales.....	42
6.2	Visualización microscópica de licopeno de Tomate.....	42
6.3	Liofilización de tomate	42
6.4	Proceso de extracción	42
6.4.1	Con aplicación de ultrasonido	42
6.4.2	Con aplicación de agitación.....	43
6.5	Determinación de capacidad antioxidante	43
6.6	Determinación de color.....	44
6.7	Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)	44
6.8	Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	44
6.9	Espectroscopia ultravioleta visible (UV-Vis)	44
7	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
7.1	Determinación de los parámetros óptimos de ultrasonido en la extracción de licopeno	45
7.2	Inhibición antioxidante por ABTS y DPPH	46
7.2.1	Efectos del ultrasonido	50
7.2.2	Efecto del movimiento mecánico de la agitación.....	51
7.2.3	Efectos del inhibidor utilizado.....	52
7.2.4	Interacción de los aceites nativos con el licopeno	53
7.3	Determinación de color.....	56
7.3.1	Estructura microscópica del licopeno de tomate	57
7.4	Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR)	58
7.5	Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	60
7.6	Espectroscopia ultravioleta visible (UV-Vis)	62

8	CONCLUSIONES.....	63
9	REFERENCIAS	64
10	ANEXOS	76

Índice de figuras

Figura 1. Forma del tomate <i>Solanum Lycopersicum</i>	3
Figura 2. Representación filogenética de tomate, clasificado por Linneo en el año 1753. Adaptado de (Bergougnoux, 2014).	4
Figura 3. Estructura física del tomate.....	8
Figura 4. Vibrador manual para polinizar la flor de tomate de forma manual.....	9
Figura 5. a) Anatomía de tomate de dos lóculos y b) multilocular vista transversal.	10
Figura 6. Estructura química del licopeno.....	15
Figura 7. Transformación de cloroplastos a cromoplastos. Obtenido y recuperado de (Egea et al., 2010).	17
Figura 8. Estructura del cloroplasto.....	18
Figura 9. Ondas de frecuencia generadas por el ultrasonido.....	25
Figura 10. Estructura de ácidos grasos en series n-3, n-6 y n-9. Retomado de (Serrano et al., 2006).	33
Figura 11. a) Uso de solventes como hexano, acetona, metanol, etanol y metanol-1-butanol en aceite de oliva para determinar DPPH.	47
Figura 12. Inhibición de radicales en aceites nativos y aceites con extracto de licopeno mediante la técnica de sonicación utilizando radical ABTS a) y el radical DPPH b).....	47
Figura 13. Inhibición de radicales en aceites nativos y aceites con extracto de licopeno mediante la técnica de agitación utilizando a) radical ABTS y b) radical DPPH.	49
Figura 14. Inhibición de radical ABTS en muestras sometidas a sonicación y agitación...	50
Figura 15. Inhibición de radical DPPH en muestras sometidas a sonicación y agitación. ..	50
Figura 16. Estructura básica de los flavonoides en donde se ilustran los anillos A y B los cuales con responsables de la actividad prooxidante. Fuente: (Pérez Trueba, 2003).....	55
Figura 17. Estructura química del tomate donde se encuentran los cromoplastos.....	58
Figura 18. Determinación de FTIR aceites nativos.....	58
Figura 19. Determinación de (FTIR) de aceites con extracto de licopeno.....	59
Figura 20. Determinación de propiedades térmicas en aceite de uva, oliva extra virgen y cacahuete. Estas muestras contienen licopeno y provienen del proceso de sonicación.	61
Figura 21. (a) Espectroscopia UV-Vis en aceites nativos y (b) espectroscopia en extractos con licopeno.....	62

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación estándar de acuerdo al grado de madurez del tomate. Retomado de (Balde negro, 2011).	11
Tabla 2. Cantidad de licopeno en frutas y vegetales (Herrera-Covarrubias et al., 2013)....	14
Tabla 3. Concentración de carotenoides en tomate y productos de tomate (mg/100g) obtenido de (Perveen et al., 2015).	16
Tabla 4. Propiedades físicas del licopeno. Retomado de (Shi & Maguer, 2000).	19
Tabla 5. Compuesto del aceite de oliva. Fuente: (Roca et al., 2017).	35
Tabla 6. Parámetros de sonicación a una frecuencia de 20 Khz aplicados en los tres aceites (uva, oliva extra virgen y cacahuete).	45
Tabla 7. Parámetros de color L, a y b en tres tipos de aceites nativos y extracto con aceites	57

ABTS	2,2'-azinobis-(3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfónico)
CO₂	Dióxido de carbono
DPPH	2,2-Difenil-1-picrilhidrazilo
DSC	Calorimetría diferencial de barrido
EAU	Ultrasonido de alta intensidad
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FTIR	Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier
ROS	Especies reactivas de oxígeno
SC-CO₂	Dióxido de carbono supercrítico
T_m	Temperatura de fusión
UMAE	Ultrasonido/microondas
UV-VIS	Espectroscopia ultravioleta visible
ΔH	Entalpía de desnaturalización

RESUMEN

En este trabajo se realizó la extracción de licopeno con tres tipos de aceites vegetales (uva, oliva extra virgen y cacahuete) mediante ultrasonido de alta intensidad con una frecuencia de 20 kHz a una amplitud de 80% con periodos de 40 segundos de sonicación y 20 segundos de descanso durante 20 minutos a una temperatura de 45 °C. La determinación antioxidante por inhibición de radicales ABTS y DPPH se determinó tomando en cuenta técnicas como sonicación y agitación esto con la finalidad de identificar con cuál de ellas se obtuvo mejor extracción de licopeno. Los datos obtenidos mediante un análisis de varianza, mostraron que para la inhibición del radical ABTS en aceites nativos y aceites con extracto no existen diferencias significativas ($p \leq 0.05$) obteniendo un rango de inhibición de 95-98%. El radical DPPH manifestó que los aceites nativos presentaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) comparados con las muestras con extracto presentando valores de inhibición de alrededor de 92% y 7% respectivamente. Los espectros de FTIR revelaron los grupos funcionales característicos del licopeno exhibiendo dos picos característicos en las regiones 2923 cm^{-1} y 2957 cm^{-1} . Estos picos pertenecen al estiramiento del grupo C-H de los ácidos grasos y licopeno. Los termogramas de DSC evidenciaron que existen diferencias significativas en la temperatura de fusión (T_m) de los diferentes tipos de aceite evaluados. La luminosidad de los diferentes aceites reveló que el extracto aceite de oliva extra virgen fue el más claro ($L^* = 41.08 \pm 0.45$) y el aceite de cacahuete con extracto el más oscuro ($L^* = 16.72 \pm 0.05$). Los aceites con extracto resultaron con valores positivos (color rojo) de la coordenada a^* debido a la presencia de licopeno, la coordenada valor (b^*) los aceites nativos tendieron a dirigirse hacia el color amarillo (+) mientras que los extractos con aceite se dirigieron hacia el color azul (-). Esta investigación permite aprovechar los desechos orgánicos de tal manera que se logre reducir del uso de solventes convencionales, así como el consumo de energía y sustituir técnicas que requieren mayor tiempo de extracción.

1 INTRODUCCIÓN

Las verduras y hortalizas contienen agua como componente mayoritario (80 y 90%), calorías, fibra, minerales y antioxidantes, estos fenoles los hacen indispensable en nuestra alimentación. El tomate es una especie de planta herbácea que pertenece al género *Solanum* de la familia de las solanáceas (Sañudo-Torres, 2013). Este fruto es indispensable en la canasta básica, se siembra en invernaderos o a campo abierto, las pérdidas pos cosecha están relacionadas con la manipulación desde la cosecha hasta que llega al consumidor debido a los daños mecánicos, mala manipulación, transporte incorrecto y por el tiempo de almacenamiento (Casierra-Posada & Avendaño, 2008). Se estima que se obtiene de un 10-15%, de desechos que usualmente utilizan para composta o alimento para animales. Este fruto/hortaliza uno de los productos alimenticios más trascendental a nivel mundial, este constituye una parte muy importante dentro de la dieta humana siendo su consumo de forma natural o cocida. Los tomates y productos obtenidos de este son ricos en antioxidantes y son considerados una fuente importante de carotenoides principalmente licopeno (Borguini & Ferraz Da Silva Torres, 2009).

El licopeno actúa como antioxidante hidrófobo que confiere el pigmento color rojo característico del tomate y que aumenta con la maduración (Phinney, Frelka, Cooperstone, Schwartz, & Heldman, 2017). Así mismo, protege las células humanas del estrés oxidativo producido por la acción de radicales libres que son los responsables del envejecimiento, enfermedades cardiovasculares y diversos tipos de cáncer (Herrera-Covarrubias, Fernandez-Pomares, Aranda-Abreu, Dominguez-Ortiz, & Hernandez-Aguilar, 2013). Este carotenoide se caracteriza por tener una estructura química de cadena abierta alifática formada por cuarenta átomos de carbono con trece enlaces dobles de los cuales 11 son conjugados, haciéndolo reactivo con el oxígeno y radicales libres (Cruz-Bojórquez, González Gallego, & Pilar, 2013).

Cuando el tomate se encuentra en estado natural, se dice tiene 90% de isómeros *trans*, pero cuando el tomate es procesado contiene mayor cantidad de isómeros *cis*, por esta razón se dice que el tratamiento térmico es responsable de la isomerización inducida. Debido a la estructura que presenta se determina que es un compuesto hidrofóbico, en el caso de los

isómeros *cis* se dice que pueden incorporarse de mejor manera a las lipoproteínas y transformarse fácilmente a los tejidos como la próstata, las formas isoméricas *cis* identificadas en el licopeno son 5-*cis*, 9 *cis*, 13 *cis* y 15 *cis*. Se sabe que el licopeno carece de actividad pro vitamina A (Ordóñez, Balanza, Martín, & Flores, 2009).

Diversos grupos de investigación están enfocados en la extracción de licopeno mediante diversas técnicas por ejemplo; con solventes convencionales y rota vapor (Arándiga-Martí & Díaz-Sánchez, 2008), mediante enzimas celulolíticas y pectinolíticas (Catalkaya & Kahveci, 2019), utilizando dióxido de carbono supercrítico (SC-CO₂) (Hatami, Meireles, & Ciftci, 2019); (Cadoni, Rita De Giorgi, Medda, & Poma, 1999) y (Baysal, Ersus, & Starmans, 2000). En la actualidad se buscan técnicas alternativas que sean ecológicas y fiables para extraer este carotenoide (Yi, Shi, Xue, Jiang, & Li, 2009).

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del tomate

Con la llegada de los españoles a América, el tomate era parte de los huertos de hortalizas, sin que su importancia económica fuera grande. En 1532, el vocablo fue introducido a la lengua castellana proviniendo del náhuatl tomatl, nombre que se aplicaba a las plantas con frutos redondos rojos con pulpa acuosa y gran cantidad de semillas tal como se muestra en la figura 1 (Sañudo-Torres, 2013).



Figura 1. Forma del tomate *Solanum Lycopersicum*.

El tomate es cultivado por sus frutos comestibles, esta hortaliza pertenece al género *Lycopersicum*, específicamente a *L. esculentum*. Considerado por algunos autores como fruta/hortaliza por su alta cantidad de azúcares simples comparado con otras verduras, lo que le confiere un ligero sabor dulce. Pertenece a la familia de las solanáceas, que contiene más de 3000 especies. Desde que se introdujo a Europa en el siglo 16, se supuso que el tomate estaba relacionado con el género *Solanum*. En el año 1753, Linneo clasificó por primera vez los tomates en el género *Solanum* y su designación durante mucho tiempo fue tema de debate, mediante datos moleculares se permite la revisión de la clasificación filogenética del género *Solanaceae* y el género *Lycopersicum* (Bergougoux, 2014). Esta clasificación se muestra en la Figura 2.

La clasificación botánica del tomate ha sido interesante ya que primero fue clasificada en el género *Solanum lycopersicum*, tiempo después se determinó que sería *Lycopersicon esculentum*. Esta especie es nativa de América del Sur, se cree que en México se cultivó el tomate y posteriormente de acuerdo al tamaño se seleccionaron las plantas (Jones, 1999). Los estudios sobre el tomate son muy amplios, puede haber tomates cultivados en distintas condiciones ambientales lo que hace que exista una variación genética (Peralta, Knapp, & Spooner, 2005).

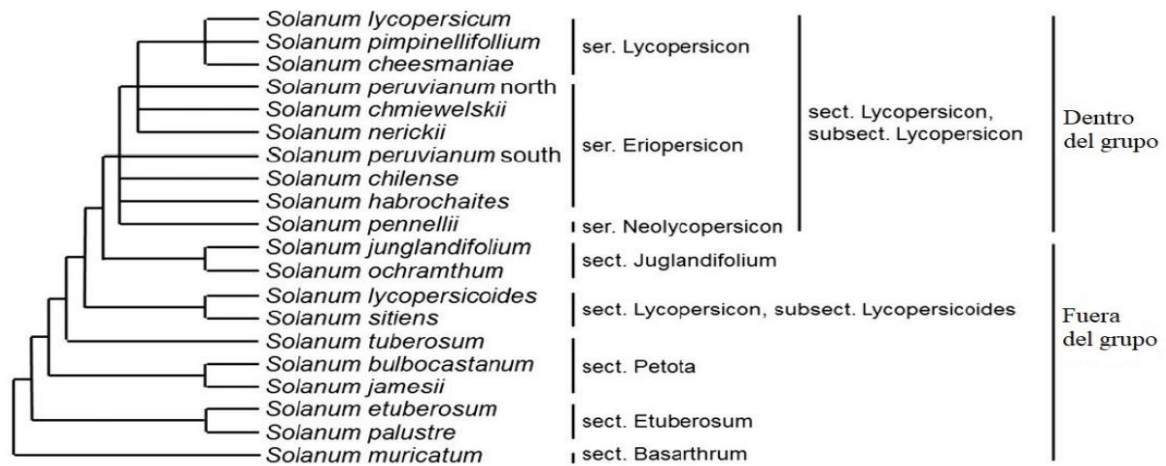


Figura 2. Representación filogenética de tomate, clasificado por Linneo en el año 1753. Adaptado de (Bergougoux, 2014).

Solanum tiene cerca de 13 taxones relacionados; el tomate cultivado, *Solanum Lycopersicum* existe solo de manera domesticada y de manera silvestre. En el siglo XX *Solanum* es el género más grande de esta familia, este género es económicamente más importante, se ha utilizado en los estudios sobre evolución y desarrollo de carácter frutal (Peralta et al., 2005). El cultivo de tomate es fuente importante de empleos, es una de las especies importantes en México debido al valor de producción y mano de obra, siendo el principal producto hortícola de exportación. Debido a sus características este puede adecuarse a la dieta alimentaria, consumiéndolo fresco o procesado (Sañudo-Torres, 2013).

El tomate es uno de los frutos más importantes consumidos en dietas occidentales en termino de fuente de vitaminas y minerales, se ha demostrado que el consumo de este reduce los riesgos de enfermedades cardiovasculares y de algunos tipos de cáncer como el de próstata,

pulmón y estómago (Henriques da Silva, Barbosa-Abreu, Brunele-Caliman Fabiano Ricardo., Castro-Antonio, & Patel, 2008).

2.1.1 Cultivo de tomate

El tomate es una de las hortalizas más importantes en el mundo después de la papa (*Solanum tuberosum L.*), es cultivado en diversos países, en 2008 la producción se concentró en china ocupando el 36%, Estados Unidos con el 14%, seguido de Turquía con 12% e India con el 11%. En México el tomate se considera la hortaliza más consumida después del chile (*Capsicum annum L.*), ocupando el doceavo lugar en producción con un 3% de la producción mundial y el segundo lugar en exportaciones con un 18%, estos datos identificados en el año 2008 (Sañudo-Torres, 2013). En el año 2011 se llegó a una producción de casi 160 millones de toneladas, siendo la séptima especie más producida después del maíz, arroz, trigo, soja, papa y mandioca (Bergougnoux, 2014).

Este fruto es uno de los principales de exportación que se cultiva en el Noroeste y Occidente de México, con rendimientos superiores a las 40 ton/ha. Se sabe que anualmente más de 52 mil hectáreas son sembradas y de ello se producen dos millones de toneladas. Los agroecosistemas tienen un papel importante en la conservación *in situ* de la agro-biodiversidad en las parcelas de huertos y cultivos caseros, esto es benéfico para los factores bióticos y abióticos sobre la producción, así como esto ayuda a satisfacer las necesidades de alimento para las familias (Ríos- Osorio, Cávez-Servia, & Carrillo-Rodríguez, 2014).

Para el año 2012, la siembra anual de tomate en el mismo país, fue de 55, 888.04 hectáreas (ha), de cosecha se obtuvo 55,237.38 ha y una producción de 2,838,369.87 ton, con un valor superior a los 13 billones de pesos (Sañudo-Torres, 2013). Desde hace 20 años, Europa y América son los productores más importantes debido a las condiciones (Bergougnoux, 2014). La demanda de tomate ha aumentado en todo el mundo, la producción y uso diario per cápita en países desarrollados y en desarrollo en el año 1992 de acuerdo al anuario de producción de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) son de 33.7×10^6 toneladas y 72.7 g día^{-1} para países desarrollados, mientras que para países en desarrollo es de $36,8 \times 10^6$ y $23,9 \text{ g día}^{-1}$ (Jones, 1999).

En tiempos actuales, los campesinos se han especializado en la producción de plántulas para cultivo en invernadero o a campo abierto que permita un control productivo mayor. Es importante para los productores tener plántulas con características que ayuden a obtener un desarrollo vegetativo adecuado para la producción (Berrospe-Ochoa, Saucedo-Veloz, Ramírez-Vallejo, & Ramírez- Guzmán, 2015).

El proceso de germinación es una de las fases de vital relevancia en el crecimiento y desarrollo de las plantas, este proceso es una de las fases de vital relevancia en el crecimiento y desarrollo de las plantas debido a que la absorción de agua desencadena una secuencia de cambios metabólicos, tales como: activación de la respiración, síntesis proteica y la movilización de reservas, que dan paso a procesos de división y elongación celular del embrión. Cuando la semilla absorbe agua, se produce un reblandecimiento en la capa protectora y con ello se inicia el proceso enzimático que activa el crecimiento de la raíz. Por lo tanto, el contenido adecuado de humedad en el medio de crecimiento de la semilla ayuda a que el proceso germinativo se lleve a cabo en menor tiempo (Deaquiz-Oyola & Burgos. Avila, 2013).

Respecto a la producción de tomate cultivada en invernaderos controlados ambientalmente y el cultivado en campo se ha convertido en una competencia, una de los puntos importantes entre estos tipos de cultivo es la calidad tomada en cuenta principalmente para las industrias. El cultivo en campo es cosechado antes de que la hortaliza esté completamente madura, para que haya tiempo de maduración natural durante el transporte, estando en el campo estas pueden ser recubiertas con partículas de tierra o polvo eliminándolos en el proceso de lavado antes de su colocación al mercado, otro punto es que mediante para este cultivo se requiere el uso de fungicidas y plaguicidas y los suelos suelen ser tratados con químicos para evitar plagas. En el caso del cultivo por invernadero, el tomate está más maduro y debe ser entregada al mercado local en un día o dos después de la cosecha, como se ha mencionado anteriormente, en este tipo de cultivo las condiciones pueden ser más controladas y si la producción de tomate puede realizarse sin pesticidas, este puede ser más aceptable en el mercado, ganando mayor valor para muchos consumidores (Jones, 1999).

La vida útil del fruto de invernadero es mejor que la cultivada en campo y la producción de invernadero es más baja que la de campo, hablando en términos de suministro, tomando en cuenta la madurez del tomate. Cuando el tomate es cultivado hidropónicamente, se toma en cuenta el sabor, factor importante asociado con la calidad, este factor se debe a la genética y el tiempo de permanencia del cultivo (Jones, 1999). El tomate se ha convertido en uno de los frutos más importantes dentro de la dieta moderna como comidas rápidas y pizzas. El consumo per cápita en fresco y procesado supera los 20 kg/año (Henriques da Silva et al., 2008).

2.2 Estructura morfológica del tomate

El tomate es una planta distinguida por ser perenne y ser sensible a los climas bajos, esto determina su cultivo anual según la región (Jones, 1999). Su crecimiento puede ser de forma erecta, semi erecta o rastrera de manera limitada e ilimitada, dependiendo de las latitudes, tipos de suelos, temperatura y técnicas de cultivo pudiendo terminar su vida después de la primera estación de crecimiento debido a la sequía o heladas (Sañudo-Torres, 2013). De acuerdo a algunos estudios, se ha determinado que existen dos tipos de crecimiento de tomate llamados determinado e indeterminado, el primero es un arbusto de baja estatura, pequeño y de producción temprana, se caracteriza por la formación de inflorescencias en el vértice extremo. El tomate indeterminado crece hasta 2 metros o más. Los procesos fisiológicos del crecimiento dependen de las condiciones meteorológicas, el suelo y características genéticas como lo menciona (Medina Saavedra, Arroyo Figueroa, & Dzul Cauih, 2017).

2.2.1 Características florales

La planta de tomate florece bajo condiciones de días cortos o largos, se adapta para la producción en la mayoría de las latitudes, los tomates primitivos tienen característica solanácea de cinco partes de flores, aunque las nuevas variedades tienen más de cinco pétalos amarillos y sépalos verdes como se ilustra en la figura 3 (Jones, 1999).

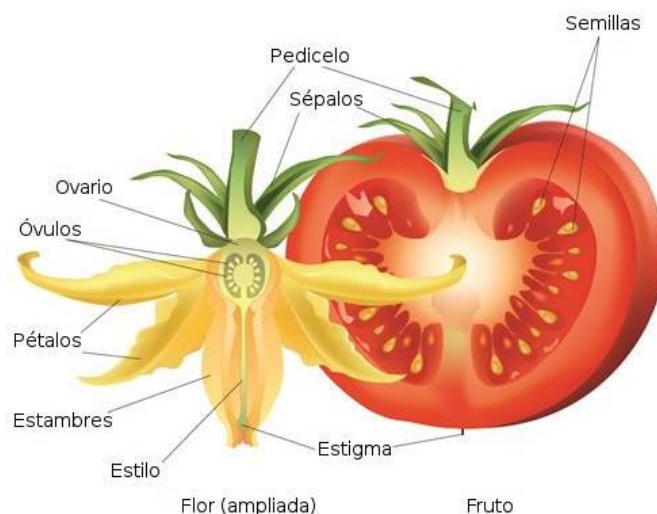


Figura 3. Estructura física del tomate.

Las especies silvestres son incompatibles y polinizadores cruzados, con su estilo más arriba del cono de la antera. Los tomates cultivados son auto infértiles y debido al tamaño de estilo que es similar al tamaño de la antera favorece la autopolinización. La temperatura óptima de polinización durante la noche es de 20 y 24 °C, esta temperatura es la ideal para la formación de licopeno (Henriques da Silva et al., 2008), durante el día la polinización es de 15.5 y 32°C. En ocasiones cuando las flores no están polinizadas ocurre un aborto, esto sucede cuando hay poca luz o la planta se encuentra bajo estrés. Otro factor que influye en el aborto y desarrollo de las flores es la densidad de las plantas; la pérdida de flores se da debido al aumento de la densidad, las flores abortan a una temperatura nocturna de 30°C, también se inhibe la formación de licopeno a temperaturas más altas o más bajas, especialmente por la noche, las flores caen y por lo tanto no se forman frutos. Existe una forma manual para polinizar con

un vibrador figura 4, se debe hacer una vez que la flor este abierta y debe ser vibrada varias veces durante varios días, esto asegura una polinización completa (Jones, 1999).

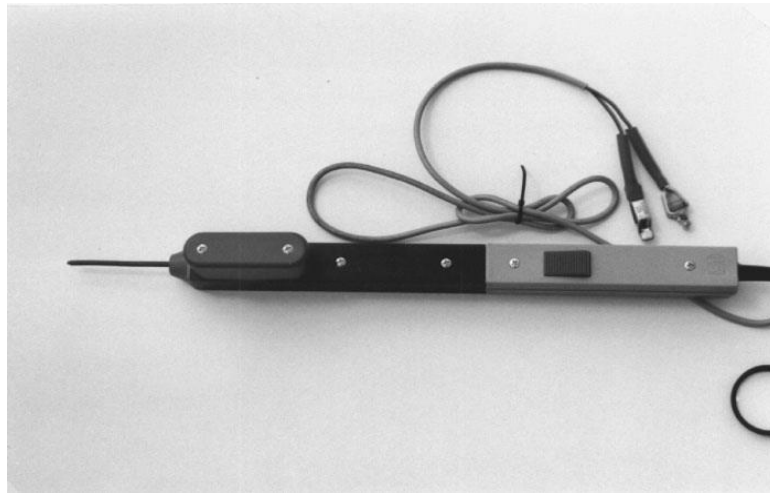


Figura 4. Vibrador manual para polinizar la flor de tomate de forma manual.

2.2.2 Características del fruto

El tomate es una baya que tiene de 2 a 12 lóculos, en ellos se encuentran las semillas ver figura 5. El tamaño y forma del fruto se deben al grado de polinización y con ello se determina la cantidad de semillas que hay en cada lóculo, el número de lóculos define el tipo de fruto. Existen diversas características del fruto debido a las diferentes variedades de tomate que hay en la actualidad. Con el transcurso del tiempo se han hecho mejoras a través de la reproducción con el desarrollo de híbridos que son resistentes a enfermedades como virus y se ha mejorado el rendimiento y logrado alargar la vida del fruto. La mayoría de variedades de tomate son de color rojo debido al licopeno que es un carotenoide rojo, algunas variedades presentan diferente coloración por ejemplo, el color rosado se debe a un solo gen (Y) que impide la formación del pigmento amarillo en la epidermis del fruto, el tamaño del fruto se debe a la radiación solar (Jones, 1999).

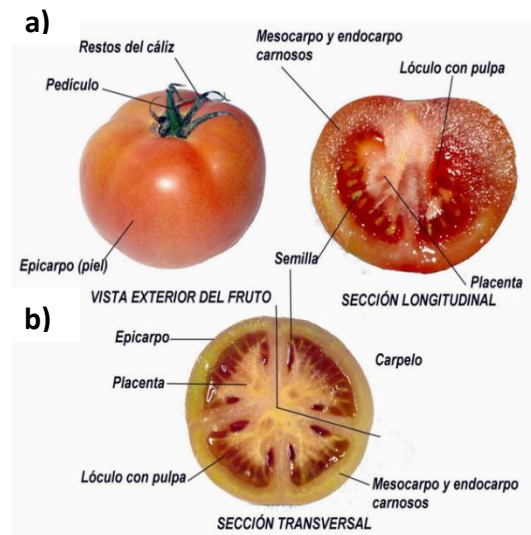


Figura 5. a) Anatomía de tomate de dos lóculos y b) multilocular vista transversal.

2.2.3 Factores de calidad

Los consumidores toman en cuenta tres factores de calidad del fruto de tomate como es; apariencia física (color, tamaño, forma, y maduración), sabor y firmeza. La calidad del tomate se puede ver afectada por variaciones genotípicas, condiciones climáticas y sistemas de producción. Para ello es importante evaluar la calidad por la apariencia del fruto como; color, textura, valor nutricional, sabor y aroma (San Martín-Hernández, Ordaz-Chaparro, Sánchez-García, Beryl Colinas-Leon, & Borges-Gómez, 2012).

2.2.4 Color y maduración

Existe una relación entre la evolución de los pigmentos, el color depende del estado de maduración de los tomates; maduros de una variedad de pulpa roja, el color puede variar de claro a oscuro, se les llama rompedores cuando presentan rotura definida en el color desde verde hasta amarillo, rosa o rojo en no más del 10% de la superficie. Otra tonalidad es puede ser rosa y se observa entre el 30 y 60% de la superficie, el rojo claro: entre el 60 y 90% de la superficie (Jones, 1999). El color natural de los alimentos se pierde por oxidación directa de carotenoides o co-oxidación de lípidos (Baldizón, Córdoba, & Valle, 2011).

La calidad de este tipo de frutos se basa en estándares como la frescura, color y madurez (Baldenegro, 2011). Las industrias que hacen productos a partir de tomate como ketchup y

otros tipos de salsas, se enfocan en el color del tomate ya que esto ayuda a incrementar la calidad de sus productos, el color está relacionado con la maduración del tomate (Padrón Pereira, León, Marié, Montes Hernández, & Oropeza González, 2012).

La coloración del tomate es una característica que muestra la madurez, existe una tabla de clasificación de tomates que consiste en seis etapas, la comparación de esta tabla con la madurez es estimada visualmente con la del color del tomate muestra el grado de madurez estimado, como se describe en la tabla 1 (Baldenegro, 2011).

Tabla 1. Clasificación estándar de acuerdo al grado de madurez del tomate. Retomado de (Baldenegro, 2011).

Grado de madurez	Color	Descripción
 1	Verde /Green	La piel del tomate está completamente verde. El color verde puede variar de claro a oscuro.
 2	Quebrando/ Breaker	Existe un rompimiento del color verde hacia colores amarillo, rosado o rojo en no más del 10% de la superficie del fruto.
 3	Rayado/ Turning	Entre el 10 y el 30% de la superficie del fruto muestra un cambio definido del color verde hasta amarillo, rosado o rojo, o una mezcla de ellos.
 4	Rosa/ Pink	Entre el 30 y el 60% de la superficie del tomate tiene color rosa o rojo.
 5	Rojo claro/ Light Red	Entre el 60 y el 90% de la superficie del tomate muestra colores rosados o rojo
 6	Rojo/ Red	Más del 90% de la superficie del tomate tiene color rojo.

2.3 Composición química

Actualmente se ha mostrado un creciente interés de los consumidores en incorporar a la dieta alimentos que sean benéficos para la salud que contengan vitaminas, minerales y antioxidantes. El tomate se ha convertido en un fruto importante para el área de investigación ya que el licopeno (pigmento rojo) es un antioxidante. Por otra parte, se sabe que el fruto contiene cantidades importantes de vitamina A, ácido ascórbico y potasio. La mayoría de variedades de tomate tienen aproximadamente de 4.5- 7.0% de sólidos solubles como glucosa o fructosa. El ácido cítrico se encuentra en mayor cantidad en el zumo de tomate y el pH de la fruta es igual o inferior a 4.5 (Jones, 1999).

El tomate es un alimento poco energético, el 90% de su peso es agua y cerca de un 4% son carbohidratos. Es fuente de importante de sales minerales como potasio y magnesio principalmente, de acuerdo a su contenido de vitaminas, contiene Vitamina C, B1, B2, B3 y carotenoides como el licopeno (pigmento que da el color al tomate). Las solanáceas pueden contener sustancias agresivas provenientes de los alcaloides que la componen, en el caso del tomate el contenido de tomatina que es un alcaloide específico se encuentra en hojas y frutos verdes, esta sustancia es degradada durante la maduración o cocimiento haciéndola inofensiva. Hablando un poco más sobre la tomatina, tiene un efecto positivo sobre algunas afecciones de la piel causadas por hongos (Vergani, 2002).

Se ha comprobado que el tomate tiene distintos beneficios ya sea crudo o procesado, como las salsas de tomate consumido ya que contiene grandes cantidades de licopeno, esto puede constituir entre 80 y 90% del contenido total (Henriques da Silva et al., 2008).

2.4 Licopeno

Se sabe que el licopeno tiene una capacidad antioxidante mayor a la del b-caroteno debido a la capacidad de atrapar radicales peroxílicos (Blanch, Ruiz del Castillo, del Mar Caja, Pérez-Méndez, & Sánchez-Cortés, 2007). Phinney y colaboradores (2017) mencionan que el licopeno es un fitoquímico liposoluble responsable del color rojo en varias frutas y verduras. Schwab (2008) señala que el licopeno es el carotenoide de color rojo brillante que se encuentra en los tomates y otras frutas rojas. Este antioxidante está presente de forma natural en todos los isómeros *trans* en la mayoría de las plantas y microorganismos (Xu & Pan, 2013).

Es el antioxidante carotenoide más potente del cuerpo humano (Schwab, 2008). Herrera y cols., (2013) describen que el licopeno es uno de los carotenoides encontrados en los alimentos especialmente en los frutos rojos y es considerado el antioxidante más eficaz del grupo de los carotenoides, predomina en el plasma humano con una vida de 2 a 3 días, este antioxidante es consumido mayormente a partir del tomate pero también es encontrado en menor cantidad en melón, guayaba, toronja, papaya, sandía, entre otros (Jones, 1999).

En los frutos de tomate frescos se produce licopeno en la configuración *all-trans*, las principales causas de degradación del licopeno durante el procesamiento son la isomerización y oxidación, la degradación afecta la calidad sensorial de los productos terminados, así como el beneficio para la salud al consumir alimentos a base de tomate. La isomerización convierte los isómeros *trans* en isómeros *cis* debido a la entrada de energía adicional dando como resultado una inestabilidad (Shi & Maguer, 2000).

El licopeno tiene una estructura altamente insaturada, esto hace del compuesto una sustancia poco volátil y altamente inestable, sus dobles enlaces pasan con facilidad de *trans* que es una forma termodinámicamente más estable en tomates frescos. Esta inestabilidad implica dificultad a la hora de manipular las muestras, por eso es esencial proporcionar modelos rápidos y confiables para la determinación cuantitativa del licopeno en diferentes matrices (Aranda Alonso, 2013).

El licopeno y otros carotenoides de origen natural, existen en las formas isómeras *all-trans* y *cis*. Cuando el tomate está fresco en estado natural, se dice tiene 90% de isómeros *trans*, pero cuando el tomate es procesado contiene mayor cantidad de isómeros *cis*. Por lo tanto se dice que el tratamiento térmico es responsable de la isomerización inducida (Ordóñez et al., 2009). Los tomates deshidratados o en polvo tienen poca estabilidad al licopeno, una buena estabilidad se puede mantener al procesarlos cuidadosamente y colocándolos lo más pronto posible en una atmósfera herméticamente sellada e inerte para su almacenamiento (Shi & Maguer, 2000).

Los efectos biológicos del licopeno en humanos se atribuyen a mecanismos de la vitamina A. La ingesta de licopeno ha mostrado un incremento en los niveles y tejidos circulatorios debido a que actúa como antioxidante atrapando especies reactivas y reduciendo el estrés oxidativo (Waliszewski & Blasco, 2010). También se ha investigado que el consumo de este tipo de carotenos brindan un efecto saludable para el sistema inmunológico y protegen la piel contra la radiación ultravioleta (Candelas-Cadillo, Alanís-Guzmán, Bautista-Justo, Del Río-Olague, & García-Díaz, 2005).

El organismo humano está expuesto a distintas sustancias oxidantes o radicales libres que dañan las moléculas biológicamente importantes. Los radicales libres son átomos que poseen un electrón desapareado y tienden a robar un electrón de las moléculas que químicamente son estables con la finalidad de lograr una estabilidad química. Debido a esto, el cuerpo humano cuenta con enzimas que contrarrestan el efecto de compuestos oxidantes y actúan como antioxidantes que bloquean la reactividad de los radicales libres que en cantidades elevadas dañan y causan muerte celular, por lo tanto, el licopeno es uno de los carotenoides más importantes en usos comerciales y medicinales (Liao, 2016). El consumo de frutas, verduras, vinos tintos, zumos proporcionan protección contra enfermedades, por la capacidad antioxidante para eliminar los radicales libres (Espín, Soler-Rivas, & Wichers, 2000). La fuente más conocida de licopeno se encuentra en los tomates cocidos o en productos derivados de tomate ya que el fotoquímico se libera del tomate al cocinarlo. Sin embargo, el tomate crudo o cocido es la mejor fuente de este antioxidante (Jones, 1999). En la tabla 2 se muestra la cantidad de licopeno presente en vegetales y frutas.

Tabla 2. Cantidad de licopeno en frutas y vegetales (Herrera-Covarrubias et al., 2013).

Fruta/vegetal	Licopeno ($\mu\text{g/g}$ peso húmedo)
Tomate	8.8 - 42.0
Melón	23.0 – 72
Guayaba	54.0
Toronja	33.6
Papaya	20.0 - 53.0
Sandía	45.3

El licopeno está constituido por una forma termodinámicamente más estable llamado isómero *trans*, debido a la estructura que presenta se determina que es un compuesto hidrofóbico, en el caso de los isómeros *cis* se dice que pueden incorporarse de mejor manera a las lipoproteínas y transformar fácilmente a los tejidos como la próstata, las formas isoméricas *cis* identificadas en el licopeno son 5-*cis*, 9 *cis*, 13 *cis* y 15 *cis*. Se sabe que el licopeno carece de actividad pro vitamina A (Ordóñez et al., 2009), ya que no cuenta con el anillo de beta-ionona, es un compuesto liposoluble y se caracteriza por tener una estructura

química de cadena abierta alifática formada por cuarenta átomos de carbono con trece enlaces dobles de los cuales 11 son conjugados, haciéndolo reactivo con el oxígeno y radicales libres, mostrando su estructura en la figura 6 (Cruz-Bojórquez et al., 2013).

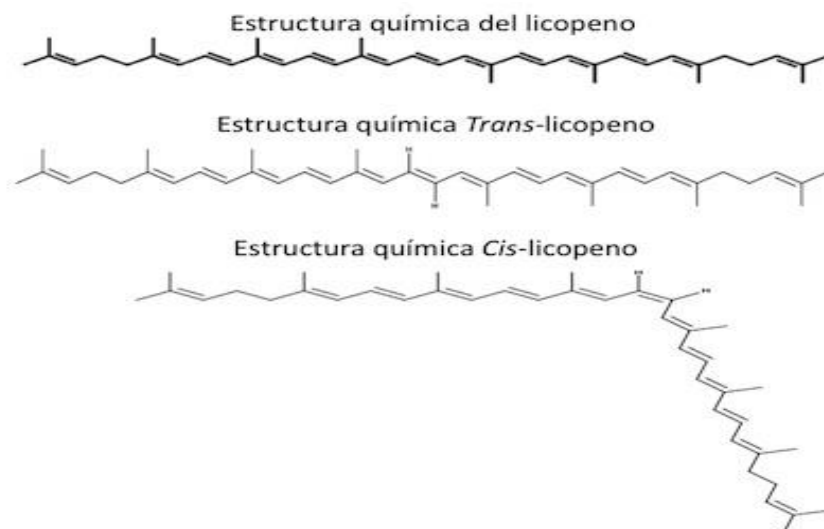


Figura 6. Estructura química del licopeno.

Años atrás, cuando no se había descubierto los beneficios saludables del licopeno, este era usado solamente como colorante ya que aportaba un intenso color rojo en los alimentos. Hoy en día se sabe que este carotenoide es capaz de combatir el estrés (Gámez-Losada, 2017). La mayor parte de las investigaciones sobre licopeno se han centrado en el tomate y productos derivados del mismo, el licopeno se encuentra en los cromoplastos del pericarpio exterior (Konwarh, Pramanik, Kalita, Mahanta, & Karak, 2012). Los productos a base de tomate son una fuente alta de licopeno en la dieta principalmente en Estados Unidos, en la tabla 3 se muestra la concentración de carotenoides en tomates y productos a base de este fruto (Perveen et al., 2015).

Tabla 3. Concentración de carotenoides en tomate y productos de tomate (mg/100g) obtenido de (Perveen et al., 2015).

Alimento	Licopeno	Neurosporeno	Fitoflueno	Fitoeno	Luteína	β -Caroteno	α -Caroteno
Tomate crudo	9.25	1.18	0.80	1.86	0.07	0.41	0.00
Pasta de tomate	55.43	6.94	3.63	8.36	0.34	1.27	9.95
Salsa de tomate	17.96	2.45	1.27	2.95	Trazas	0.45	3.37
Puré de tomate	16.60	2.60	1.07	2.38	0.08	0.58	3.03
Jugo de tomate	10.76	2.05	0.81	2.77	0.05	0.43	1.07

El licopeno tiene poca solubilidad en un medio acuoso, la formación de micelas, las microemulsiones y el uso de ciclodextrinas se han usado para aumentar la solubilidad y estabilidad del licopeno. Se sabe que la extracción de licopeno sin el uso de tratamientos enzimáticos o de ultrasonido produce alrededor de 80 $\mu\text{g/g}$. El contenido de licopeno en tomate fresco es de 8.8 a 42 $\mu\text{g/g}$ de peso húmedo (Konwarh et al., 2012). Candelas y colaboradores (2006) señalan que el contenido de licopeno en cepas muy rojas es de 50 mg/kg aproximadamente comparados con las variedades amarillas que contienen 5mg/kg, en variedades comunes de tomate, la concentración de licopeno es de 3 a 12.2 mg/100g de fruta madura.

El residuo sólido del tomate después de la industrialización se considera uno de los más importantes materiales que contienen alta cantidad de licopeno, esto es porque consiste principalmente en cascaras de tomate y semillas, constituyen entre el 3 y el 5% del peso total del tomate y el licopeno se acumula en la capa exterior de la piel durante la maduración, al final de la maduración, los niveles de licopeno en la piel son aproximadamente cinco veces más que en la pulpa (Zuorro, Fidaleo, & Lavecchia, 2011). El orujo de tomate húmedo contiene aproximadamente 33% de semillas, 27% de piel y 40% de pulpa, el orujo seco contiene 44% de semillas y 56% de piel y pulpa, normalmente estos han sido utilizados como forraje (Poojary & Passamonti, 2015).

2.4.1 Biosíntesis de licopeno

El licopeno se encuentra en el cromoplasto de tejidos vegetales, su biosíntesis aumenta durante el proceso de maduración debido a que el cloroplasto se transforma en cromoplasto que contiene principalmente B-caroteno que se encuentra en parte interior del pericarpio, y el cromoplasto se encuentra en la parte exterior del pericarpio (Choudhari & Ananthanarayan, 2007). Los cromoplastos acumulan carotenoides, confieren la coloración amarilla, naranja y rojo a los frutos y flores, así como a algunos tubérculos y raíces como las zanahorias. Estos cromoplastos proceden de plastidios preexistentes como cloroplastos. Los plástidos son organelos de las plantas que se originan a partir de la integración endosimbiótica de un procarotenoide fotosintético, los plástidos incluyendo cromoplastos, llevan a cabo funciones no fotosintéticas es decir no participan en el proceso de fotosíntesis. En la figura 7 se muestra la transformación de cloroplastos a cromoplastos (Egea et al., 2010).

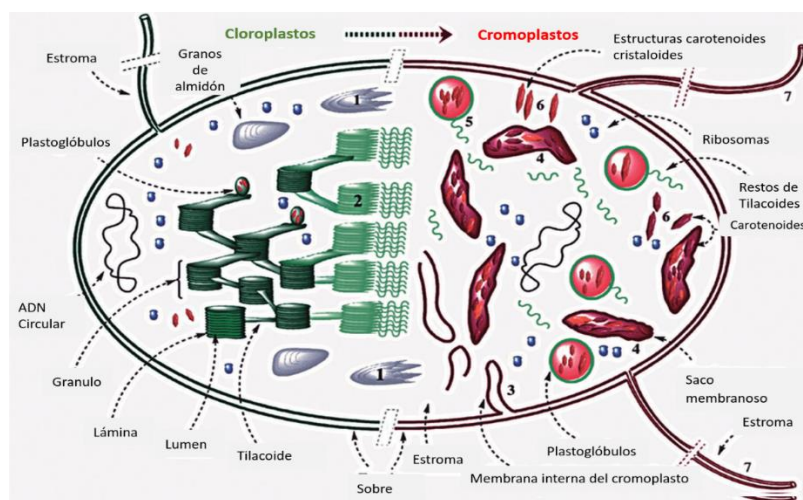


Figura 7. Transformación de cloroplastos a cromoplastos. Obtenido y recuperado de (Egea et al., 2010).

A nivel celular, el pigmento rojo característico del tomate generado por el licopeno está localizado en los cloroplastos y se encuentra en las membranas de los tilacoides. En la primera etapa de maduración del tomate el pigmento principal es el color verde dado por la clorofila, cuando esta se degrada surge un cambio de color verde a blanco, cuando la clorofila se reduce en el cloroplasto el licopeno es biosintetizado. En la parte final se forman microcristales de licopeno como pequeños glóbulos que ocupan gran parte del cromoplastos

que están suspendidos en la pulpa del fruto, cuando la luz es reflejada le da al tomate el color rojo brillante, en la figura 8 se muestra la estructura del cloroplastos (Shi & Maguer, 2000).

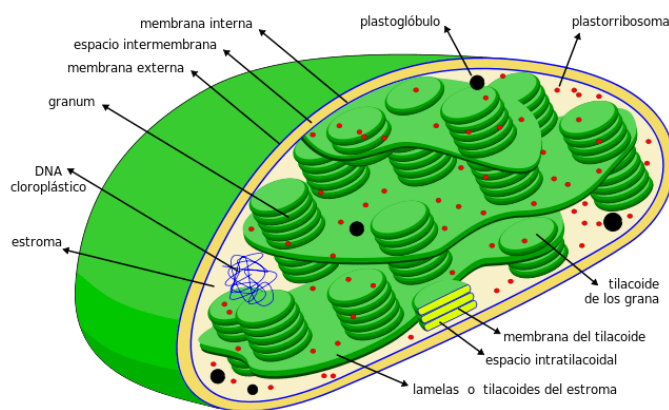


Figura 8. Estructura del cloroplasto

Xie y cols., (2019) mencionan que la luz es el principal estímulo ambiental que influye en la biosíntesis del licopeno; especialmente la luz roja que es la que induce un mayor contenido de licopeno en el tomate. Sin embargo, se piensa que la luz azul promueve la síntesis de licopeno, pero es una idea que aún sigue sin ser clara.

2.4.2 Propiedades fisicoquímicas del licopeno

Químicamente los carotenoides se dividen en dos clases, la primera es la más importante conformada por carotenoides de hidrocarburos insaturados tales como licopeno, α -caroteno, β -caroteno, γ -caroteno no contienen oxígeno y suelen ser color rojo o naranja, la segunda clase son las xantofilas como β -cryptoxanthin, luteína y zeaxantina esta clase si tienen oxígeno en los anillos terminales. Por otra parte, las dos clases tienen características estructurales comunes como la estructura poliisoprenoide y algunos dobles enlaces conjugados. En el tomate, el licopeno es el principal carotenoide hidrocarburo (Shi & Maguer, 2000).

En los tomates maduros, el licopeno toma forma alargada similar a una aguja, es más soluble en cloroformo, benceno y otros disolventes orgánicos que no sean agua, el licopeno es muy sensible a la luz, al calor, al oxígeno, y a los ácidos. Algunos iones metálicos como Cu^{2+} , Fe^{3+} catalizan su oxidación (Shi & Maguer, 2000). Las propiedades físicas del licopeno se describen en la tabla 4.

Tabla 4. Propiedades físicas del licopeno. Retomado de (Shi & Maguer, 2000).

Propiedades Físicas del Licopeno	
Formula molecular	C ₄₀ H ₅₆
Peso molecular	536.85 Da (Dalton)
Punto de fusión	172–175°C
Forma de cristal	Agujas rojas alargadas de mezcla de carbono, disulfuro y etanol
Forma de polvo	Marrón rojizo oscuro
Solubilidad	Soluble en cloroformo, hexano, benceno, carbono disulfuro, acetona, éter de petróleo insoluble en agua, etanol y metanol
Sensibilidad	Luz, oxígeno, alta temperatura, ácidos

En la tabla anterior se muestran las propiedades físicas del licopeno como fórmula molecular, peso molecular, punto de fusión entre otros, estas características permiten estudiar de mejor forma este carotenoide.

2.4.3 Propiedades funcionales del licopeno

La demanda actual del licopeno lo ha convertido en un caroteno esencial en diversas industrias y es importante tomar en cuenta sus características químicas y su absorción humana así como su transporte y distribución en tejidos y su metabolismo (Roldán-Gutiérrez & Dolores Luque de Castro, 2007). En la actualidad se sabe que se han realizado estudios *in vivo* e *in vitro* para determinar la capacidad antioxidante del licopeno, siendo los resultados *in vivo* los menos concluyentes. En los dos casos se sabe que el licopeno tiene funciones de inhibición de la proliferación celular y su gran potencial antioxidante (Cruz-Bojórquez et al., 2013).

Los antioxidantes son importantes en la prevención de enfermedades, tanto en plantas como en animales y humanos propagando las reacciones en cadena de oxidación, algunos antioxidantes que catalizan la oxidación de lípidos son capaces de quelatar iones metálicos como hierro y cobre (Borguini & Ferraz Da Silva Torres, 2009). Los tomates son una parte integral en la dieta alrededor del mundo, los estudios han establecido que el consumo de estos con alto contenido de carotenoides y licopeno reduce el riesgo de diversas enfermedades cardiovasculares (Perveen et al., 2015).

2.4.3.1 Estudios *in vivo*

Yin y colaboradores (2019) realizaron un estudio para ver la influencia del licopeno sobre el metabolismo de glicolípidos en diabetes tipo 2, induciendo este modelo en ratas Sprague Dawley albinas adultas que eran alimentadas por una dieta alta en grasas administraron de manera oral aceite de licopeno (10mg/kg o 20 mg/kg de peso corporal) y se observó que el licopeno tiene un efecto potencial sobre la diabetes y puede regular el metabolismo de glicolípidos en ratas diabéticas.

El daño hepático ocasionado por el consumo de alcohol da como resultado la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), en pequeñas dosis estas son benéficas para el hígado. Sin embargo, cuando están presentes en concentraciones altas reaccionan como macromoléculas celulares que inducen a proteínas desnaturalizadas, inactivación de enzimas, peroxidación de lípidos, así como el daño en el ácido desoxirribonucleico (ADN). Stice y cols., (2018) demostraron que la alimentación con tomate en polvo reduce la gravedad de la esteatosis inducida por el alcohol y los focos inflamatorios en un modelo de ratón alimentado con alcohol.

El licopeno puede tener efectos neuroprotectores en el sistema nervioso central, por ejemplo, se han hecho estudios en ratones transgénicos Tau que expresan una mutación y al ser suplementados con licopeno pueden mejorar el rendimiento cognitivo así como inhibe la anomalía de la enfermedad de Huntington (Chen, Huang, & Chen, 2019).

La administración de licopeno en ratas (25 o 50 mg/kg/día diluido en aceite de girasol) mostró propiedades antioxidantes y antiinflamatorias que previenen la inflamación pulmonar aguda y enfisema inducidos por la exposición al humo de cigarro (Campos et al., 2019).

El decanoato de nandrolona es un esteroide usado por atletas y culturistas y el consumo excesivo genera trastornos renales. En trabajos previos (2019) para evaluar el efecto protector del licopeno contra la nandrolona decanoato inducido por daño cortical renal, al alimentar a cuarenta ratas macho adultas con nandrolona y licopeno en dosis similares, mostraron alteraciones histopatológicas y pérdida casi completa de capilares glomerulares. Los resultados mostraron que el decanoato indujo efectos tóxicos en el riñón de las ratas y el licopeno tubo efectos protectores en dicho daño renal.

2.4.3.2 Estudios *in vitro*

La ingeniería de microorganismos se considera una alternativa para la producción de licopeno, estudios previos realizaron una optimización de la ruta de biosíntesis del licopeno y el metabolito del chasis, los resultados verificaron que *S. cerevisiae* CEN.PK2-1C fue más adecuado para la producción de licopeno debido a su capacidad para sintetizar precursores terpenoides (X. Li, Wang, Zhang, & Yi, 2019).

2.4.4 Usos del licopeno

Se han realizado estudios donde se demuestra que el consumir alimentos ricos en licopeno disminuye el riesgo de padecer cáncer de próstata ya que el licopeno se encuentra en altas concentraciones en la próstata, por otra parte también se sabe que se han hecho estudios donde se han encontrado niveles acumulables en diferentes concentraciones en órganos como testículos, glándulas suprarrenales, pulmón, riñón, colon, ovarios y estómago (Herrera-Covarrubias et al., 2013).

2.4.5 Biodisponibilidad

El licopeno se encuentra ligado al isómero *trans*, impidiendo la liberación completa y haciéndolo menos susceptible para la digestión y absorción del aparato digestivo humano, por ello se recomienda consumir el tomate procesado para obtener un mayor aprovechamiento. Al someter este fruto al calor, hace que se rompan las paredes celulares para debilitar las fuerzas existentes entre el licopeno y la matriz del tejido, aumentando el área superficial para la digestión debido a que durante la cocción se transforma la forma isométrica *trans* a *cis* mejorando su biodisponibilidad. También se demostró que es mejor consumir el jugo de tomate procesado que crudo ya que si el jugo se calienta durante 7 minutos a 90°C y 100°C, se pierde una pequeña cantidad de licopeno y esto confirma su estabilidad (Cruz-Bojórquez et al., 2013).

Existe un problema desde el punto de vista nutricional y es la ingesta del licopeno dado que el consumo de este es más biodisponible cuando se somete a cocción por ejemplo en la elaboración de una pasta de tomate y con esta cocción surge un mejor efecto cumpliendo con las propiedades antioxidantes (Fernández, Pitre, LLobregat, & Rondón, 2007).

El licopeno es liposoluble y para mejorar su absorción, se recomienda el uso de aceite de girasol, oliva o canola. Para el caso de la salsa de tomate cocinada con aceite, se incrementa la concentración de licopeno siendo entre dos y tres veces mayor la cantidad comparándolo con el jugo de tomate fresco. Respecto a la digestión, se sabe que después de treinta minutos, el licopeno se incorpora dentro de las micelas de los lípidos y se absorbe en la mucosa intestinal. Posteriormente es incorporado a los quilomicrones y es liberado para ser transportado por las lipoproteínas de baja y muy baja densidad a través del sistema linfático hacia el hígado y otros órganos. Del total del licopeno consumido, solo entre el 10% y el 30% es absorbido (Cruz-Bojórquez et al., 2013).

El cuerpo humano no es capaz de sintetizar carotenoides, es por ello que estos se obtienen a través de la dieta. Estudios han demostrado que existe una relación inversa entre el consumo de licopeno y el riesgo de cáncer, enfermedades cardiovasculares y enfermedades crónicas, estas investigaciones sugieren que los efectos de las dietas con alto contenido de licopeno contribuyen en la reducción de estas enfermedades (Moritz & Cardoso Tramonte, 2006).

2.4.6 Ingesta de licopeno en la dieta

Estudios han demostrado que el licopeno tiene diversas actividades biológicas entre ellas la reducción de cáncer de próstata, inhibición de la proliferación, migración e invasión de células de cáncer de mama, endometrio e hígado, es por ello que varios grupos de investigación han indicado el consumo elevado de alimentos con licopeno principalmente productos con tomate (Richelle et al., 2011). Existe desacuerdo en cuanto a las recomendaciones nutricionales para la ingesta y esto sugiere un estudio más a fondo para determinar estas cantidades de manera específica (Moritz & Cardoso Tramonte, 2006). Las investigaciones sobre la ingesta de licopeno varían en cada país en Holanda 1.0 mg en hombres y 1.3 mg en mujeres, en Finlandia se cuantificó la ingesta diaria para mujeres es de .09 mg y .07 mg hombres, Estados Unidos los valores varían entre 2.07 mg/día y 3.7 mg/día (Periago, Martínez-Valverde, Ros, Martínez, & López, 2001).

2.4.7 Tipos de extracción

En la actualidad ha aumentado el interés en diversas técnicas de extracción, se busca que sean ecológicas y fiables (Yi et al., 2009). La extracción verde tiene un impacto medioambiental muy elevado, ya que esto permite la intensificación de los procesos y una

mejor producción con productos de calidad aplicando la química y reduciendo el uso y generación de sustancias peligrosas. Los extractos mediante esta técnica, se basan en el descubrimiento y diseño de procesos que reduzcan energía de consumo y permite el uso de disolventes naturales renovables (Chemat, Vian, & Cravotto, 2012).

El licopeno es extraído de plantas con solventes no polares, pero el suministro inestable de materia prima causada por el clima y estación afecta significativamente la calidad del licopeno (X. Li et al., 2019).

Existen diversos métodos de extracción de tomate. Arándiga y Díaz (2008), extrajeron licopeno de tomate mediante agitación magnética usando acetona, posteriormente realizaron filtración a vacío para separar la fase cetónica y se llevó la muestra a un rota vapor controlando temperatura de 40°C conectándola al vacío para ser destilado el solvente con mayor rapidez. En el balón del rotavapor se quedan pegados a la pared los residuos de carotenoides. Para despegar los carotenoides de la pared, se agrega una muestra de diclorometano con éter de petróleo y se aplican unas cuantas gotas para después colocarlo en un vial de topacio evitando el contacto con la luz, una vez realizado este proceso, se seca con nitrógeno para conservarlo y evitar que el oxígeno afecte.

Catalkaya y Kahveci (2019) realizaron una selección del tipo de disolvente adecuado para la extracción del licopeno a partir de desechos de tomates industriales, aplicando un tratamiento previo con enzimas celulolíticas y pectinolíticas seguidas de la extracción con acetato de etilo para mejorar la recuperación de licopeno. El pretratamiento enzimático para la recuperación de licopeno ha sido evaluado por grupos de investigación y mencionan que la recuperación es diez veces mayor comparado con la extracción con surfactantes (Papaioannou & Karabelas, 2012).

Por otra parte, Lin y Chen (2005) estudiaron la estabilidad de los carotenoides provenientes del jugo de tomate, sus resultados mostraron que las cantidades de *all-trans*-luteína y sus isómeros *cis* disminuyeron con el aumento del tiempo de almacenamiento. El licopeno predomina en el zumo de tomate fresco, el *cis*-licopeno tiene más biodisponibilidad que el *trans*-licopeno posiblemente porque los isómeros *cis* son más solubles en micelas de ácido biliar. Egydio y Rosa (2010) donde extrajeron licopeno del jugo de tomate usando CO₂ indican es una técnica amigable y mejora la calidad del licopeno.

La extracción del licopeno con dióxido de carbono supercrítico (SC-CO₂) derivado de subproductos del procesamiento de tomate. El trabajo realizado por Hitami y colaboradores (2019) utilizaron la ley de conservación de masas y obtuvieron un rendimiento de licopeno con una relación directa con el coeficiente de transferencia de masa externa, la cantidad de oleoresina era una función de la fracción de masa inicial de soluto extraíble en fase de masa sólida y masa de alimentación. El dióxido de carbono (CO₂) no es tóxico ni inflamable, es de bajo costo (Cadoni et al., 1999), este compuesto puede ser utilizado para extraer compuestos térmicamente lábiles, sus características lo convierten en un disolvente en alimentos, tintes, productos farmacéuticos y cosméticos (Sabio et al., 2003). Los factores que se evalúan en la extracción son; temperatura, presión del fluido, tiempo de extracción y caudal de CO₂ (Baysal et al., 2000).

Arede y otros autores, (2019) se han enfocado en estudiar la formación de partículas de colágeno hidrolizado (LLHC) cargadas con licopeno usando CO₂, tomando en cuenta variables como tiempo, temperatura y presiones observando que la estructura física de las partículas se conservó en la impregnación supercrítica y estas partículas formadas evidencian las interacciones físicas entre el colágeno hidrolizado y el licopeno. Perretti y colaboradores (2013) investigaron el fraccionamiento de ésteres etílicos de ácidos grasos oleosos para obtener una fracción lipídica enriquecida con ácidos grasos.

2.5 Ultrasonido

Ultrasonido se refiere a las ondas que se encuentran en una frecuencia por encima de 20 Hz a 20 kHz, este es el rango de audición humana, el tipo de onda de sonido está dado por su frecuencia. Este espectro ultrasónico puede dividirse en dos zonas. El ultrasonido de potencia se refiere al rango de 20 kHz hasta alrededor de 1 MHz y el ultrasonido diagnóstico que tiene una frecuencia superior a 1 MHz mostrados en la figura 9 (Feng, V. Barbosa-Canovas, & Weiss, 2011a). Ultrasonido es una técnica emergente que se aplica en el procesamiento de alimentos aportando efectos positivos mejorando la transferencia de masa, asistencia de tratamientos térmicos, conservación de alimentos y análisis de los mismos. El ultrasonido de alta intensidad induce a efectos físicos, químicos, biológicos (Clarke & Hill, 1970) y bioquímicos y mecánicos de los alimentos, usándose como alternativa en operaciones

convencionales en laboratorios de alimentos (Awad, Moharram, Shaltout, Asker, & Youssef, 2012).

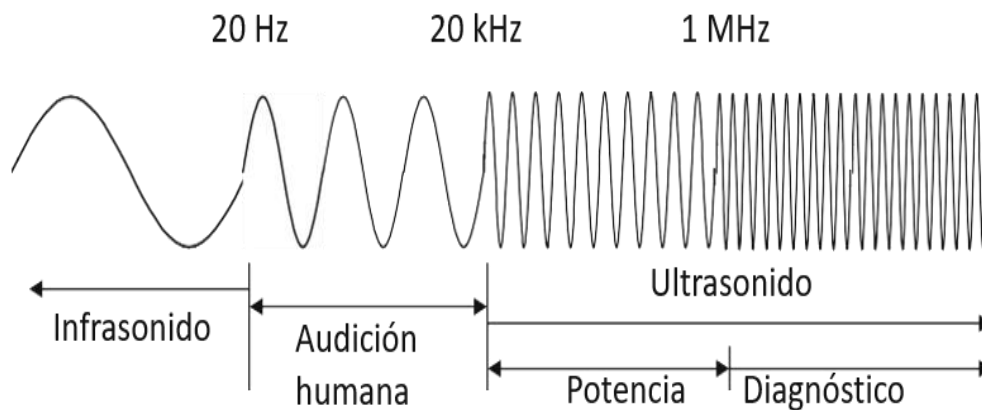


Figura 9. Ondas de frecuencia generadas por el ultrasonido.

El uso del ultrasonido en el proceso de alimentos ha sido de gran importancia en los últimos años, destacando el aprovechamiento de las fuerzas físicas generadas por el ultrasonido en ausencia y presencia de cavitación, varias investigaciones sugieren que el procesamiento ultrasónico de ingredientes de alimentos y lácteos es una tecnología viable que será utilizada por muchas industrias en un futuro cercano (Chandrapala, Oliver, Kentish, & Ashokkumar, 2012).

Actualmente se han desarrollado nuevas tecnologías para extraer componentes biológicamente activos, obteniendo buen rendimiento y una pureza elevada. Tal es el caso de la extracción asistida por ultrasonido que su aplicación es adecuada cuando la estabilidad del componente activo a extraer se ve afectado por temperaturas elevadas de procesos convencionales (Rodríguez Riera, Robaina Mesa, & Jauregui Haza, 2014). Otros puntos importantes que destaca el uso de esta técnica es que al compararlo con métodos tradicionales de extracción como la destilación a vapor, esta es menos costosa, requiere menos cantidad de disolvente y menos gasto de energía y es reconocida como una tecnología que asiste, ayuda a la modificación y mejora de procesos (Robles-Ozuna & Ochoa-Martínez, 2012).

Esta técnica es usada en una variedad de líquidos y bebidas, esto por que proporciona una mejor emulsificación con homogeneización mejorada y reduce el tamaño de los glóbulos de grasa, en los lácteos se observa mayor tasa de crecimiento en la sonicación este proceso es

llamado fraccionamiento y en los zumos de fruta muestran retención y mejora en los parámetros de calidad y aumentan los niveles de compuestos bioactivos (Paniwnyk, 2017). Al ajustar la frecuencia el ultrasonido se puede usar en diversas aplicaciones industriales, que induce a cambios físicos y químicos /bioquímicos mediante la cavitación que soporta diversos procesos como extracción, congelación, secado, emulsificación e inactivación de bacterias patógenas (Awad et al., 2012).

El uso del ultrasonido es de gran importancia en la industria alimentaria debido a que tiene diversas ventajas ya que las ondas sonoras se consideran seguras, no tóxicas y amigables con el medio ambiente. El impacto de esta técnica se clasifica generalmente en dos categorías, siendo estos efectos físicos y químicos (Feng et al., 2011a). El ultrasonido se encuentra dentro de las técnicas usadas en la química verde, existen dos herramientas importantes, la sonicación y la biocatálisis, la primera ayuda a la liberación de diversas sustancias bioactivas de compartimentos celulares, incluida la extracción de licopeno (Konwarh et al., 2012).

2.5.1 Ultrasonido de alta intensidad

El ultrasonido de alta intensidad puede ser usado aplicando baños de sonicación o mediante sondas de inmersión ultrasónicas con diferentes diámetros, longitudes y geometrías de las puntas. La energía, la intensidad, la velocidad y temperatura son los principales parámetros que afectan a los ultrasonidos de potencia. Las intensidades más altas inducen a que exista una cavitación acústica debido a la formación, crecimiento y colapso de burbujas, ocasionando una liberación de energías superiores. Esta técnica tiene efectos químicos, bioquímicos y mecánicos que permiten modificar las propiedades y mejorar la calidad de los alimentos. El efecto mecánico permite realizar diversas aplicaciones como emulsificación, desgasificación, mejora de la cristalización, respecto a los efectos químicos y físicos, se utilizan como herramientas para esterilizar equipos evitando que las superficies se contaminen con bacterias patógenas (Awad et al., 2012). Estudios han demostrado que el uso de ultrasonido no afecta tanto las características sensoriales de los alimentos (Alighourchi, Barzegar, Sahari, & Abbasi, 2013).

2.5.2 Efectos físicos y químicos del ultrasonido

El ultrasonido representa una onda de presión de alta frecuencia. A medida que la onda de presión pasa por el medio, crea regiones de alta y baja presión, el tamaño de las variaciones de presión conocidas como amplitud de onda o presión acústica son directamente proporcional a la cantidad de energía aplicada al sistema. A medida que la onda pasa a través de un medio viscoso, ya sea aire o agua, disipará esta energía en forma de flujo viscoso o también llamado flujo continuo. El patrón de flujo resultante depende de la forma de onda acústica original y de si la onda de presión se refleja desde superficies duras o si se interactúa con el sistema (Feng et al., 2011a).

El ultrasonido con mayor frecuencia, conduce a una mayor absorción de energía y a su vez genera mayor flujo de corriente acústica que en el caso de las frecuencias más bajas para la misma intensidad de energía. En el caso de los gases como el aire que son fluidos compresibles, el movimiento del fluido en los patrones de flujo siempre es suficiente para acomodar estas variaciones de presión. En el caso de los líquidos que son incompresibles e inelásticos, no responden fácilmente de la misma manera. Cuando los cambios de presión son muy grandes, el líquido puede ser desgarrado, las micro burbujas generadas de gas y vapor alivian las tensiones de tracción creadas por la onda de presión (Feng et al., 2011a).

El efecto de cavitación gaseosa explica la generación de micro burbujas así como su evolución en un medio líquido (Robles-Ozuna & Ochoa-Martínez, 2012). Estas existen entre el agua y una superficie hidrofóbica y se forman a presiones acústicas relativamente suaves, esto debido a que cualquier líquido ya contiene cavidades de gas o nano burbujas y estos núcleos ayudan en la formación de micro burbujas. Al proceso de formación de burbujas se le conoce como cavitación (Feng et al., 2011a).

2.5.3 Cavitación

La cavitación incluye una forma transitoria y otra estable, esta última hace referencia al proceso de desarrollo de núcleos preexistentes ocasionado por la simulación acústica (Clarke & Hill, 1970). En pocas palabras, la cavitación a la presión acústica más baja, esto se refiere formalmente a la creación de una micro burbuja, esto abarca toda la gama de comportamientos de la burbuja una vez que se ha formado (Feng et al., 2011a). La fuerza del ultrasonido puede acelerar sucesivamente para lograr una transferencia de masa y calor y

alterar las paredes celulares de las plantas y facilitar la liberación de compuestos (Y. Li, Fabiano-Tixier, Tomao, Cravotto, & Chemat, 2013). Adekunle y otros autores (2010) atribuyen que el efecto biocida del ultrasonido se debe principalmente a la cavitación, por otro lado mencionan que el efecto químico del ultrasonido genera la formación de radicales libres debido a la energía provocada por las ondas sonoras.

Cuando las ondas ultrasónicas se propagan en un medio líquido se producen burbujas debido a los cambios de presión, la energía liberada provoca una esterilización localizada (Cheng, Soh, Liew, & Teh, 2007). La cavitación se refiere formalmente a la creación de una micro burbuja, este término es usado en el campo ultrasónico y abarca el comportamiento de la burbuja una vez que se ha formado (Feng et al., 2011a). Este suceso ocurre durante la sonicación causando ruptura en las paredes celulares logrando un mejor contacto entre el disolvente y el material celular extraíble (Pingret, Fabiano-Tixier, Bourvellec, Renard, & Chemat, 2012). Este fenómeno de nucleación, crecimiento y colapso de micro burbujas da como resultado la generación de altas temperaturas de 1000-15.000 K y presiones de 500-5000 bar, además de la generación de altas temperaturas, la cavitación tiene un fuerte flujo de circulación de líquidos, alto esfuerzo de cizallamiento cerca de la pared de la burbuja generando radicales libres altamente reactivos y turbulencias (Sutkar & Gogate, 2009).

Las ondas acuosas de alta amplitud (alta presión acústica) se pueden generar más fácilmente a bajas frecuencias. A frecuencias más altas (> 1 MHz), las presiones acústicas son más bajas y esta amplitud es disipada con mayor facilidad dentro del fluido (Feng et al., 2011a). El ultrasonido de alta intensidad genera micro burbujas de cavitación debido a los cambios de presión, estas burbujas se expanden y colapsan, este ciclo de expansión/colapso surge mediante la onda acústica, la energía y presión elevadas provocan un efecto de esterilización, los efectos letales de ultrasonidos depende del material, medio y parámetros de procesamiento (Juárez Trujillo, Jiménez Fernández, Guerrero Analco, Monribot Villanueva, & Jiménez Fernandez, 2017). Diversos tamaños de burbuja y presiones acústicas hacen que la fase de expansión de la burbuja se extienda y por un colapso violento convierta la burbuja en un tamaño más pequeño este proceso es llamando cavitación inercial. Este modo de oscilación persiste durante cientos de ciclos acústicos es llamado cavitación transitoria, puede ser estable y repetitiva (Feng et al., 2011a).

2.6 Aplicación en la industria de alimentos

El ultrasonido es usado en la industria alimentaria principalmente como auxiliar de procesamiento para limpieza y desinfección de superficies. La mayor parte de literatura sobre el procesamiento de alimentos por ultrasonido es específica para cada aplicación, tomando en cuenta parámetros del proceso y resultados (Feng, V. Barbosa-Canovas, & Weiss, 2011b).

Este equipo es utilizado en diversos procesos de la industria de alimentos y química, por ser una técnica rápida, consume menos energía y permite la reducción de disolventes lo que hace que el producto sea más puro y se obtenga un mayor rendimiento. Este método ha sido utilizado para extraer componentes alimentarios como aromas, antioxidantes y pigmentos (Pingret et al., 2012). Aadil y colaboradores (2013) determinan que el uso de ultrasonido mejora el sabor y el color de los zumos de fruta. Las ventajas del uso de esta técnica son el corto tiempo, es de alta reproducibilidad, reduce costos, fácil manipulación, poco consumo de energía y proporciona principalmente mayor pureza al producto final. Otras ventajas del uso de ultrasonido en la industria de alimentos son transferencia de masa y energía, reducción de gradientes térmicos, extracción selectiva, aumento de producción y eliminación de pasos del proceso. Se piensa que los procesos realizados mediante el uso de este equipo pueden ser afectados por los fenómenos de cavitación (Chemat, Zill e, & Khan, 2011).

La extracción de licopeno ha sido muy importante en la investigación, combinando dos herramientas de la llamada química verde que hace énfasis en los atributos de la biocatálisis y la ultrasonicación para facilitar la extracción. Para la extracción de licopeno se han usado extractos puros como diclorometano, así como mezclas de extractos polares y no polares como el acetato de etileno, benceno, éter etílico y éter de petróleo (Konwarh et al., 2012). En general el uso de ultrasonidos se ha convertido en una tecnología innovadora dentro de la industria de alimentos ya que se han demostrado muchas expectativas en la extracción de productos naturales como son los antioxidantes (Liao, 2016). Estudios anteriores han hecho comparaciones de extracciones con ultrasonido/microondas (UMAE) y con ultrasonido (EAU) y han determinado que las condiciones del UMAE es más eficiente que el uso de EAU (Lianfu & Liu, 2008).

2.7 Parámetros del ultrasonido

Para obtener una mayor extracción deben tomarse en cuenta diversos parámetros (Rodríguez Riera et al., 2014).

2.7.1 Tiempo de sonicación

El tiempo de sonicación depende del tipo y estructura de la pared celular del material vegetal que se emplee, también depende de la resistencia de los constituyentes solubles a ser transferidos por difusión de la parte interna del material al disolvente, el intervalo de tiempo de sonicación está entre los 120 y 3600s (Rodríguez Riera et al., 2014).

2.7.2 Temperatura

En la extracción por ultrasonido se emplean temperaturas inferiores a otros métodos tradicionales y también se considera el tipo de material a extraer usando temperaturas menores a las que originan degradación de la muestra (Rodríguez Riera et al., 2014).

2.7.3 Tipo de solvente

El tipo de disolvente es importante ya que deben emplearse disolventes de baja toxicidad, el disolvente debe tener la capacidad de absorber y transmitir la energía de la onda ultrasónica y penetrar al interior del material para extraer los compuestos bioactivos. La polaridad del disolvente también influye en la mejora de la extracción (Rodríguez Riera et al., 2014).

2.8 Aceites vegetales

Algunos aceites han sido utilizados en productos farmacéuticos debido a sus características físicas y químicas. Su estabilidad es muy importante ya que de esta depende su frescura, sabor y color para su posterior uso y almacenamiento, esta estabilidad se debe a los lípidos y presencia o ausencia de antioxidantes naturales. Los aceites vegetales tienden a ser más estables que las grasas animales debido a la presencia de estos últimos. Otro cambio importante que ocurre en los aceites es la rancidez, esta es acelerada por la exposición a la luz, calor, humedad y por la presencia de trazas de metales de transición como cobre, níquel y hierro. La oxidación de los aceites es lenta y se conoce como periodo de inducción, al final de este periodo los niveles de peróxido aumentan provocando una mayor oxidación y provocando un olor y sabor rancios (M. Jiménez, M. Aguilar, M. Zambrano, & E. Kolar, 2001).

Estudios muestran que el aceite vegetal comestible tiene alto potencial para ser usado como disolvente en la extracción de compuestos deseados debido a su verdor y conveniencia y capacidad de enriquecimiento con carotenoides extraídos al aplicar el uso de ultrasonido (Y. Li et al., 2013). La extracción de licopeno usando CO₂ en presencia de aceite vegetal como co-disolvente mejora el rendimiento del extracto y tiene una estabilidad en el pigmento para lograr esto depende de presión y temperatura usadas durante el proceso (Vasapollo, Longo, Rescio, & Ciurlia, 2004). Los ácidos grasos desempeñan funciones importantes como energéticos o sustratos en la biogénesis de las membranas celulares, diversos estudios mencionan que algunos ácidos grasos intervienen en la transmisión de señales actuando como segundos mensajeros. Las acciones de estos mediadores biológicos contribuyen a una función complementaria como la modulación de funciones del sistema inmune (Puertollano, Puertollano, Álvarez de Cienfuegos, & Pablo, 2010).

La estabilidad de un aceite está relacionada con la capacidad para mantener su color, sabor y frescura durante su almacenamiento y uso, esto también depende de su composición, naturaleza y presencia o ausencia de antioxidantes y de inhibidores naturales o artificiales, en el caso de los aceites vegetales tienden a ser más estables comparados con las grasas animales debido a sus antioxidantes naturales. Durante el almacenamiento los aceites presentan cambios en el sabor y olor, la rancidez se acelera por la exposición al calor, luz, humedad y por la presencia de trazas de metales como cobre, níquel, fierro. En el caso de la oxidación de grasas y aceites es lenta a esto se le conoce como periodo de inducción, cuando este periodo termina, la cantidad de peróxido es alta que provoca un aumento en la velocidad oxidativa y el aceite produce un olor y sabor rancios (M. E. Jiménez, M. d. R. Aguilar, M. d. I. L. Zambrano, & E. Kolar, 2001).

Las grasas y aceites son importantes para nuestra alimentación, son necesarias como las proteínas y carbohidratos ya que aportan grandes beneficios para la salud, se deben consumir cantidades adecuadas de grasas alimentarias. Un consumo adecuado de grasas es importante antes y durante el embarazo y la lactancia, es necesario algunas veces aumentar la disponibilidad y consumo de grasas para superar los problemas de nutrición proteica y energética, los rangos de consumo varían de acuerdo a las condiciones de alimentación y el predominio de enfermedades no transmisibles relacionadas con ella (Martínez-Sánchez et al.,

2013). La composición de los aceites vegetales varía debido al aporte de ácidos grasos saturados, monoinsaturados y poliinsaturados que están asociados con la fuente de origen como: especie, planta, fruto o semillas (Durán Agüero, Torres García, & Sanhueza Catalán, 2015). Los componentes de los aceites vegetales se han clasificado en dos fracciones, la primera es la fracción saponificable como; ácidos grasos libres, triglicéridos, ceras, ester de esteroides, alcoholes terpénicos, mono y diglicéridos y fosfolípidos. La segunda es la fracción insaponificable que incluye hidrocarburos, esteroides, tocoferoles, terpenos, pigmentos, polifenoles, alcoholes y compuestos volátiles (Roca, Gallardo-Guerrero, & Gandul-Rojas, 2017).

2.8.1 Ácidos grasos vegetales

Los lípidos forman parte de los tejidos de plantas y animales, se clasifican en esteroides, fosfolípidos, esfingomielinas, ceras y grasas (Rodríguez-Cruz, Tovar, del Prado, & Torres, 2005). Están agrupados de acuerdo a sus características químicas, así como a solubilidad en solventes orgánicos. Las grasas cumplen diversos roles en la dieta humana y son fuente importante de energía, son fuentes de ácidos grasos esenciales, ayudan al transporte de vitaminas liposolubles y aportan componentes como carotenoides, esteroides, entre otros (Masson Salaué & Mella Rojas, 1985). Los ácidos grasos pueden ser saturados e insaturados, dentro de los primeros todos los átomos de carbono excepto el terminal, están unidos a dos átomos de hidrógeno y estos son de origen animal. En el caso de los ácidos grasos insaturados se encuentran, los ácidos grasos monoinsaturados y ácidos grasos poliinsaturados, estos provienen de vegetales y su consumo se asocia con colesterol bueno (Medina, 2010).

Los ácidos grasos se clasifican de acuerdo a sus dobles enlaces presentes en su molécula como ácidos grasos sin dobles enlaces o insaturados siendo ácidos grasos monoinsaturados (Carrillo, Serra, Álvarez, i Alberich, & Jiménez, 2011) o ácidos grasos poliinsaturados (Jiménez, Masson, & Quitral, 2013). Los ácidos grasos monoinsaturados tienen dos átomos de carbono situados en forma contigua unidos a un átomo de hidrógeno, al ser insaturados los hace capaces de fijar hidrógeno. El principal ácido graso de esta clasificación es el ácido graso oleico presente principalmente en el aceite de oliva (54-80%) (Medina, 2010), otros aceites en los que se encuentra el ácido oleico son; girasol alto oleico y de colza. Estos ayudan a disminuir la fracción transportadora en las LDL sin incrementar el colesterol (Carrillo et

al., 2011). Respecto a los ácidos grasos poliinsaturados, tienen dos o más pares de átomos de carbono insaturados y se sabe estos disminuyen el colesterol malo (LDL) a diferencia de los ácidos grasos mono insaturados, estos se oxidan con facilidad. El ácido graso poliinsaturado más común es el ácido linoleico presente en concentraciones altas en aceite de uva y girasol (Medina, 2010).

Trabajos previos (2006) mencionan que las posiciones de la primera ligadura del carbono 3, 6 o 9 de los ácidos grasos están indicadas por el termino n-3 o n-6 considerando al carbono 1 al del grupo metilo terminal tal como se muestra en la figura 10. Por otra parte, mencionan que los ácidos grasos esenciales no son sintetizados en el organismo, por eso importante consumirlos de fuente exógena.

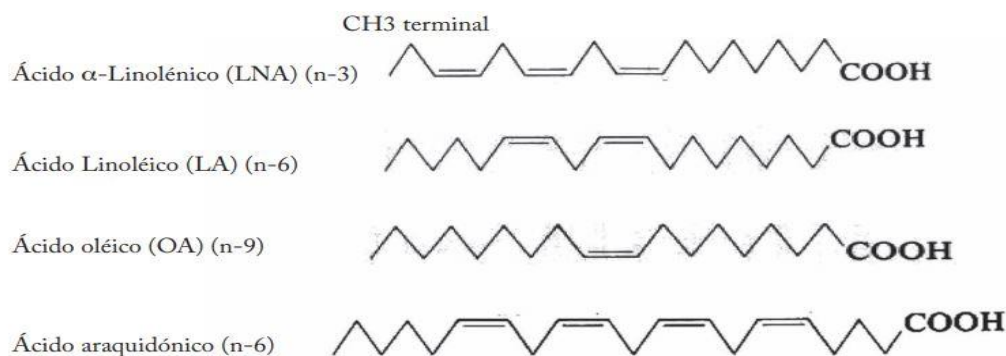


Figura 10. Estructura de ácidos grasos en series n-3, n-6 y n-9. Retomado de (Serrano et al., 2006).

Los ácidos grasos tienen enlaces en posición *cis* que al someterlos a proceso térmico elevado se isomerizan a la forma *trans*. Los isómeros *cis* tienen átomos de hidrógeno al mismo lado de la cadena formando una estructura doblada. En los isómeros *trans*, los átomos de hidrógeno se encuentran en lados opuestos a la cadena formando una estructura derecha (Medina, 2010). El consumo de ácidos grasos monoinsaturados y poliinsaturados están relacionados con la prevención de enfermedades crónicas como es el caso de problemas cardiovasculares (Carrillo et al., 2011).

2.8.2 Vitamina E

La vitamina E es un potente antioxidante pertenece al grupo de vitaminas liposolubles que pertenece al grupo de tocoferoles, es un compuesto esencial que se obtiene principalmente de aceites vegetales. Su estructura consta de dos partes primarias: un anillo complejo cromo y una cadena larga lateral, tiene 8 vitámeros, 4 de ellos son tocoferoles que tienen una cadena saturada y los otros 4 son tocotrienoles son de cadena insaturada con 3 dobles enlaces en los carbonos 3, 7 y 11 (Sayago, Marín, Aparicio, & Morales, 2007).

2.9 Aceite de Uva

Las uvas son usadas como materia prima para fabricar diversos productos, en su forma fresca se usa para hacer vinagre y bebidas alcohólicas. La semilla normalmente era eliminada como residuo, hasta que se encontró que contiene gran cantidad de aceite que puede ser extraído para consumo humano (Campomanes & Chamorro, 2009). La semilla de uva contiene fenoles, polifenoles y otros compuestos bioactivos que son de gran importancia para la industria farmacéutica y de alimentos debido a sus propiedades antioxidantes. El aceite aporta diversos beneficios a la salud debido a su alto contenido de ácido linoleico (72-76%), de esta forma puede usado para aderezos, salsas o para freír alimentos, debido a sus propiedades humectantes también es usado en el área de cosméticos (Juárez Trujillo et al., 2017). Otros compuestos presentes en el aceite de uva son ácido oleico (17,2%), palmítico (6,6%) y esteárico (4,3).

La semilla de este fruto contiene Vitamina E (Navas, 2009), polifenoles como flavonoides, catequinas, estilbenos y taninos, estos tienen gran valor antioxidante también son cardioprotectores, antibacterianos y antivirales (Franco-Mora, Salomon-Castaño, Morales, Castañeda-Vildózola, & Rubí-Arriaga, 2015). Estudios previos (2009) mencionan que las concentraciones altas de vitamina E combinado con los niveles bajos de colesterol favorecen la reducción de desarrollar problemas circulatorios y cardiovasculares.

2.10 Aceite de oliva extra virgen

El aceite de oliva se clasifica en distintas categorías: refinado, virgen, virgen extra, puro, entre otros (Piné & Corona, 2009). Este aceite es obtenido de la molienda de la aceituna, la aceituna está compuesta por mesocarpio o pulpa (70-90%), endocarpio o comúnmente llamado hueso (9-27%) este está compuesto por agua (60%), lípidos (20%), carbohidratos (4%), proteínas (3%) y en menor cantidad fibra y minerales. La semilla (2-3%) contiene principalmente agua (30%), lípidos (27%) carbohidratos (27%) y proteínas (10%). Otros componentes minoritarios del aceite de oliva los cuales determinan sus propiedades organolépticas como polifenoles (sabor), pigmentos clorofílicos y carotenoides (color) (Krebesová, Castro, & Alche, 2015). El aceite de oliva extra virgen se obtiene mediante prensado en frío. La composición química del aceite de oliva se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Compuesto del aceite de oliva. Fuente: (Roca et al., 2017).

Componentes	Contenido
Fracción saponificable (98.5%)	g/kg
Ácido sgrasos monoinsaturados	775
Ácidos grasos poliinsaturados	63
Ácidos grasos saturados	163
Fracción insaponificable (1.5%)	mg/kg
Terpenos	3000-7000
Hidrocarburos (principalmente escualeno)	1500-7000
Esteroles (principalmente β -sitosterol)	800-2500
Fenoles	50-500
Tocoferoles (principalmente α -tocoferol)	30-150
Clorofilas	1-40
Carotenoides	2-20
Otros compuestos aromáticos (cetonas, ésteres, éteres)	250

La fracción saponificable de este aceite está constituida por triglicéridos y en menor proporción por diglicéridos, monoglicéridos y ácidos grasos libres, la composición de los ácidos grasos depende de la variedad de aceituna, suelo y clima, se sabe que tiene una elevada capacidad antioxidante para la prevención del proceso de oxidación. Las principales características nutricionales del aceite de oliva es su alto contenido de ácidos grasos

monoinsaturados como el ácido oleico con una concentración de 69-82% (Piné & Corona, 2009) y la relación entre el ácido linoleico y el alfatocoferol es más equilibrada que en el caso de los aceites de semillas (Carretto, Cuerdo, Dirienzo, & di Vito, 2002). Este aceite es calificado como un alimento importante en la dieta con alto valor biológico debido a sus efectos benéficos sobre la salud desde el punto de vista inmunológico (Puertollano et al., 2010). El aceite de oliva también contiene antioxidantes tal es el caso de la vitamina E, carotenos y compuestos fenólicos como: hidroxitirosol y oleuropeína, se sabe que estos últimos son los antioxidantes más eficaces en el aceite de oliva teniendo mayor actividad antioxidante que la vitamina E (Durán Agüero et al., 2015).

Sánchez y otros autores (2018) menciona que los efectos beneficiosos del aceite de oliva virgen se atribuyen a los ácidos grasos monoinsaturados y a compuestos antioxidantes, antiinflamatorios y antiproliferales, estos últimos han mostrado el efecto en la prevención de tratamiento de cáncer (Sánchez-Rodríguez & Mesa, 2018). También se sabe que el aceite de oliva ozonizado puede ser empleado para nuevas alternativas, por ejemplo como agente antimicrobiano de origen vegetal contra organismos patógenos como *Listeria monocytogenes* (Godínez- Oviedo et al., 2017). Se sabe que la principal fuente de grasa se obtiene del aceite de oliva, se ha informado que su consumo es eficaz para prevenir enfermedades coronarias y algunos tipos de cáncer, los antioxidantes en aceites son importantes en la estabilización de los ácidos grasos libres (Espín et al., 2000).

2.11 Aceite de cacahuete

El fruto de cacahuete se usa para el consumo humano, como fruto seco, tostado en confitería, etc. también se usa para la elaboración de productos industrializados como la fabricación de aceites, crema de cacahuete, lápiz labial, jabón, entre otros. Se ha estudiado el uso del aceite de cacahuete como fuente de energía renovable (biodiesel), también se ha recomendado el uso de este aceite para el control del ácaro *Acaris woodi* en colonias de abejas *Apis mellifera* L (Martínez-Sánchez et al., 2013). La mayor cantidad de producción de cacahuates a nivel mundial se usa para la producción de aceite. El aceite proveniente de este fruto seco se obtiene mediante diferentes tipos de extracción. El cacahuete contiene alrededor del 50% de ácidos grasos monoinsaturados y 14% de ácidos grasos saturados, la combinación de estos

ácidos grasos son benéficos para el corazón. Otros compuestos que contiene este fruto y son beneficios para la salud son su contenido de fibra, Vitaminas del grupo B, Vitamina E, minerales, antioxidantes como flavonoides y resveratrol. Estos compuestos son reconocidos por prevenir enfermedades como cáncer o Alzheimer y por retardar el envejecimiento (Arya, Salve, & Chauhan, 2016). Las regiones de crecimiento del cacahuete y los métodos de estudio pueden llegar a afectar algunos compuestos como el tocoferol, la sequía puede reducir los niveles de a-tocoferol (Derbyshire, 2014).

El cacahuete contiene 6% de humedad, 30% de proteína, 45% de aceite, 3% fibra cruda, 13% extracto libre de nitrógeno y 3% de cenizas. Esta composición puede variar de acuerdo a la variedad, condiciones ecológicas y prácticas del cultivo. Este fruto contiene grandes componentes para la nutrición humana, su valor nutricional se debe a la presencia de tocoferoles, flavonoides, fitoesteroles, así como la presencia de ácidos grasos digeribles y su alto contenido de proteína (Martínez-Sánchez et al., 2013). El alto valor nutricional y comercial del aceite de cacahuete además de ser utilizado como un producto para el consumo humano, permite que sea utilizado en diversos productos como cosméticos, fármacos y tensoactivos (Sebei, Gnouma, Herchi, Sakouhi, & Boukhchina, 2013).

3 JUSTIFICACIÓN

Actualmente muchos grupos de investigación están enfocados en el diseño de nuevas técnicas que puedan usarse para la extracción de diferentes materiales biológicos (Rodríguez Riera et al., 2014). El tomate es uno de los productos más importantes a nivel mundial ya que es indispensable en la canasta básica y constituye una parte importante dentro de la dieta humana, este es consumido de forma natural o procesada. Estudios han demostrado que los tomates son ricos en antioxidantes y son considerados una fuente importante de carotenoides principalmente licopeno (Borguini & Ferraz Da Silva Torres, 2009). Este carotenoide se ha convertido en una parte importante para la investigación debido a que actúa como antioxidante hidrófobo (Phinney et al., 2017). Diversos grupos de investigación han demostrado que el consumo de este carotenoide protege las células humanas del estrés oxidativo producido por la acción de radicales libres que son los responsables del envejecimiento, enfermedades cardiovasculares y diversos tipos de cáncer (Herrera-Covarrubias et al., 2013). Por lo anterior se ha seguido estudiando el licopeno obtenido principalmente del tomate, se han realizado estudios con tomate en perfecto estado, pero actualmente se ha pensado en hacer uso de los desechos de tomate que han sufrido daños mecánicos por mala manipulación exceso en tiempo de almacenamiento, entre otros (Casierra-Posada & Avendaño, 2008). Se estima que se obtiene de un 10-15%, de desechos que usualmente utilizan para composta o alimento para animales. Estos desechos son una parte importante en la industria de alimentos ya que representa una pérdida económica muy importante.

Otro factor importante que se busca actualmente es el uso de equipos que generen menos daño al medio ambiente, esto ha dado razones para realizar investigaciones usando tecnologías emergentes. Los tratamientos térmicos son muy usados para producir alimentos seguros y actualmente existen este tipo de tecnologías que aparte de ser amigables con el medio ambiente, ayudan a mantener las propiedades de los productos alimenticios y ayudar a prolongar su vida de almacenamiento (Feng et al., 2011b).

Diversos grupos de investigación están enfocados en la extracción de licopeno mediante diversas técnicas por ejemplo; con solventes convencionales y rota vapor (Arándiga-Martí & Díaz-Sánchez, 2008), mediante enzimas celulolíticas y pectinolíticas (Catalkaya & Kahveci, 2019), utilizando dióxido de carbono supercrítico (SC-CO₂) (Hatami et al., 2019); (Cadoni et al., 1999) y (Baysal et al., 2000). Actualmente se está buscando extraer este carotenoide mediante técnicas ecológicas y fiables (Yi et al., 2009) tal es el uso de ultrasonido de alta intensidad debido a que tiene diversas ventajas ya que las ondas sonoras se consideran seguras, no tóxicas y amigables con el medio ambiente. El impacto de esta técnica se clasifica generalmente en dos categorías, siendo estos efectos físicos y químicos (Feng et al., 2011a). El ultrasonido se encuentra dentro de las técnicas usadas en la química verde, existen dos herramientas importantes, la sonicación y la biocatálisis, la primera ayuda a la liberación de diversas sustancias bioactivas de compartimentos celulares, incluida la extracción de licopeno (Konwarh et al., 2012).

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Extracción y caracterización de licopeno a partir de tomate (*Solanum Lycopersicum*) mediante la aplicación de ultrasonido de alta intensidad.

4.2 Objetivos específicos

- ❖ Establecer los parámetros óptimos de ultrasonido de alta intensidad para la extracción de licopeno considerando relación solvente/material, temperatura, tiempo de exposición y pulsaciones.
- ❖ Evaluar las propiedades antioxidantes del licopeno por inhibición de radicales ABTS y DPPH.
- ❖ Caracterizar las propiedades fisicoquímicas del extracto de licopeno mediante las técnicas; colorimetría, FTIR, DSC y UV-VIS.

5 HIPÓTESIS

El uso de tecnologías emergentes como es el uso del ultrasonido de alta intensidad, genera mayor rendimiento en la extracción de licopeno de residuos de tomate ayudando a mantener la calidad del mismo, esto comparado con otros métodos de extracción convencionales.

6 MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Materiales

Se utilizó desechos de tomate (*Solanum lycopersicum*) en su mayor estado de maduración provenientes de la central de abastos perteneciente al municipio de Tulancingo de Bravo, estado de Hidalgo. Como sustancia extractora se usaron tres tipos de aceites; oliva extra virgen marca San Miguel, uva y cacahuete marca enature. Los reactivos utilizados para capacidad antioxidante como 1-Butanol y metanol fueron de grado analítico.

6.2 Visualización microscópica de licopeno de Tomate

El tomate en estado natural fue cortado por la mitad para poder obtener un pequeño fragmento de pulpa. Esta fue colocada en un portaobjetos, se agregó aceite de inmersión para poder visualizar las células, posteriormente se cubrió con un porta objetos y finalmente la muestra se colocó en un microscopio (Olympus c31) se observó con un objetivo de 100x.

6.3 Liofilización de tomate

El tomate maduro previamente rebanado se depositó en un ultra congelador a -80°C . Una vez alcanzada esa temperatura, el tomate se depositó en un equipo liofilizador Labconco a -40°C y 2 mBar (Labconco Corp., Kansas City, USA). Posterior a ello, el tomate se trituró en un molino de aspas marca Retsch GM 200 durante 10 segundos a 10,000rpm para obtener el tomate en polvo y finalmente se conservó en un ambiente oscuro y a -4°C .

6.4 Proceso de extracción

6.4.1 Con aplicación de ultrasonido

Para la extracción de licopeno, se midió 50 ml de aceite y se colocó en un vaso de precipitado de 100 ml cubierto con papel aluminio, se pesó 10g de tomate liofilizado y se incorporó poco a poco al vaso que ya contenía el aceite teniendo una concentración material/solvente de 5:1 (p/v), esto para que lograr una fácil homogeneización. La muestra homogeneizada se sonicó en un ultrasonido de alta intensidad marca SONICS Vibra-cell de 130 watts con la siguiente configuración: frecuencia de 20 kHz, 80% de amplitud, durante 20 minutos con pulsaciones de 40 segundos por cada 20 segundos de descanso, la temperatura de sonicación fue a 40°C . Para evitar el sobrecalentamiento, el ultrasonido, al ultrasonido se le adaptó un recipiente con hielos que se mantenían a (10°C). Al terminar el tiempo de sonicación, la muestra se centrifugó durante 10 minutos a 4°C para logra la separación de los aceites. En último lugar

el sobrenadante (extracto con aceite) se colocó en frascos ámbar y se mantuvo a temperatura ambiente. Este método se realizó con cada uno de los aceites.

6.4.2 Con aplicación de agitación

Para esta técnica, se pesó 10g de tomate liofilizado y 50 ml de cada uno de los aceites. El tomate y el aceite fueron colocados en un vaso de precipitado de 100 ml cubierto con papel aluminio, dentro del vaso se coloca un agitador magnético. El vaso se colocó en una parrilla de agitación de la marca Corning, se dejó en agitación durante 17 horas a temperatura ambiente.

6.5 Determinación de capacidad antioxidante

En este proceso se utilizaron varios solventes para evaluar cuál o cuáles de ellos no generaban turbidez en la muestra oleosa. Los solventes usados fueron hexano, acetona, etanol, metanol y 1 butanol. Para esta determinación, se ocuparon 5 tubos de ensayo para cada uno de los solventes, a cada uno se agregó 1ml de muestra oleosa y 5 ml de solvente. Por otra parte, se mezcló metanol y butanol en relación 1:4 y de igual manera, en un tubo de ensayo se colocó 1ml de muestra oleosa y 5 ml de dicha mezcla de solventes. Una vez diluidas las muestras con cada uno de los solventes se llevó a cabo la determinación antioxidante. Para la determinación de inhibición de radicales se utilizó la técnica (Re et al., 1999) para ABTS (20-azino-bis [3-etilbenzotiazolina]-6-ácido sulfónico). Se tomó 200 µl de muestra diluida y se colocaron en tubos de ensayo previamente cubiertos con aluminio para evitar el paso de luz, posteriormente se agregó 2ml de radical estabilizado y se dejó actuar durante 7 minutos. Finalmente se tomó lectura en un espectrofotómetro de Luz Visible y UV, VELAB (VE-5100UV) a 734nm. Para la determinación de inhibición del radical DPPH (2,2-Difenil-1-picrilhidrazilo), se usó la técnica (Brand-Williams, Cuvelier, & Berset, 1995), de igual manera se protegieron los tubos de ensayo y en este caso se agregó 500 µl de muestra diluida y se agregó 2.5 ml de radical DPPH estabilizado dejándolo actuar durante 30 minutos para después tomar lectura en el espectrofotómetro a una longitud de 515 nm. Debido al uso de diversos solventes a estas dos técnicas se les realizó algunas modificaciones que permitieron adecuarlas al tipo de muestra utilizada en este trabajo.

6.6 Determinación de color

La determinación de color se llevó a cabo con un colorímetro marca MINOLTA, 5 ml de cada una de las muestras fue colocada en un recipiente blanco para no afectar el color y se analizó por triplicado obtener mejores resultados.

6.7 Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)

Los espectros de absorción por la técnica de FT-IR a partir de las muestras liofilizadas, fueron obtenidos por el equipo Frontier FT-MIR (Perkin Elmer) equipado con reflectancia total atenuada (ATR por sus siglas en inglés). Se trabajó en un intervalo de medición de 400 a 4,000 cm^{-1} y a temperatura ambiente.

6.8 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

La estabilidad térmica se analizó mediante el equipo de calorimetría diferencial de barrido (DSC) serie Q 2000 instrumentos TA, equipado con un sistema de enfriamiento refrigerado RCS90 y el software de análisis universal TA 2000. Mediante esta técnica se calculó la temperatura de fusión (T_m) y la entalpía de desnaturalización (ΔH), estos parámetros permiten la evolución de la estabilidad térmica de los aceites vegetales y los extractos con aceites. El equipo se calibró usando una charola de aluminio (instrumentos TA) estándar. Las muestras fueron se pesadas y colocadas en las charolas de aluminio selladas herméticamente y escaneadas en un intervalo de 25°C a 150°C con una velocidad de calentamiento de 10°C. Los valores de (T_m) y (ΔH) se evaluaron con el software en base cambios endotérmicos registrados en el termograma.

6.9 Espectroscopia ultravioleta visible (UV-Vis)

Los espectros fueron obtenidos con la técnica de espectroscopia ultravioleta visible con el espectrómetro de barrido Varian Cary 50 equipado con una célula de cuarzo (longitud de la trayectoria óptica: 1 cm a temperatura ambiente).

7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Determinación de los parámetros óptimos de ultrasonido en la extracción de licopeno

Tabla 6. Parámetros de sonicación a una frecuencia de 20 Khz aplicados en los tres aceites (uva, oliva extra virgen y cacahuate).

Tratamiento	Condiciones de sonicación			
	Pulsaciones (sonicación: descanso en seg)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Aceite/tomate (g/ml)
T1	30:30	20	25	1:1
T2	40:20	25	30	1:5
T3	50:10	30	35	1:10
T4	40:20	20	40	1:5
T5	50:10	20	40	1:5

En la tabla 6, se muestran los parámetros de sonicación a una frecuencia de 20 Khz aplicados en los tres aceites (uva, oliva extra virgen y cacahuate). De acuerdo con los parámetros analizados en cada uno de los seis tratamientos se observó que en el tratamiento T1 la muestra se sometió a una menor cantidad de pulsación, menor tiempo de sonicación y temperatura, así como la relación solvente/material, para el T2 se aumentó los segundos de pulsación, la temperatura, tiempo y relación solvente material. El T3 se aumentó diez segundos más de sonicación; el tiempo y temperatura también se aumentaron, así como la relación solvente material, este tratamiento tuvo mejor extracción de acuerdo a estos parámetros, para el T4 se mantuvo los mismos segundos de pulsación y relación solvente material que el T2, el mismo tiempo que el T1 y el T5 y la misma temperatura de sonicación que el T5. Este último tratamiento se sometió a mayor tiempo de pulsación. El tiempo, temperatura y relación solvente/material fue el mismo que el T4. Los resultados se valoraron mediante las técnicas de capacidad antioxidante que permitieron ver con qué tratamiento existía mayor inhibición de radicales, indicando que con el tratamiento que mayor inhibió es el que tiene mayor extracción de licopeno. Estos resultados mostraron que el T1, T2, T3 y T5 extrajeron una cantidad menor de licopeno comparados con el T4, este último mostró un mayor resultado para la extracción de licopeno en los tres tipos de aceites.

Rawson y otros autores (2011) mencionan que la determinación del tiempo, temperatura, pulsaciones y relación solvente/material es importante ya que de estos depende obtener una buena extracción o también puede existir una degradación de licopeno debido a que estos parámetros modifican procesos químicos, físicos y biológicos que pueden afectar el producto.

La temperatura es otro parámetro importante ya que de este también depende la degradación del licopeno. Hernández y colaboradores (2014) estudiaron el efecto de la temperatura sobre la acumulación del carotenoides de tomate en diferentes etapas y determinaron que el estrés causado por altas temperaturas provoca una alteración en la composición del fruto, el someter al tomate a 32°C provoca una degradación de licopeno y otros carotenoides y se forma β -caroteno debido a los mecanismos de control y canalización metabólica de isoprenoides que determinan la concentración final de cada compuesto. Cardona y Restrepo (2006) mencionan que el licopeno debe someterse a una temperatura menor a 60°C para evitar su degradación. Otros estudios mencionan que el procesamiento de tomate puede aumentar la cantidad de licopeno, la temperatura óptima durante el calentamiento de licopeno es 70°C cuidando que la temperatura no sea alta para evitar la pérdida de licopeno, también mencionan que la temperatura y operación mecánica debilita la fuerza de unión entre el licopeno y la matriz del tejido facilitando la rotura de paredes celulares y logrando la liberación del licopeno (Novelina, Nazir, & Adrian, 2016).

7.2 Inhibición antioxidante por ABTS y DPPH

Para la determinación antioxidante se utilizaron distintos solventes esto para identificar el que no generara turbidez en la muestra. Al analizar las diluciones de las muestras disueltas con hexano, acetona, metanol y etanol se observó que, al hacerlas reaccionar con cada uno de los radicales, se pusieron turbias generando problema para poder hacer una buena determinación antioxidante. Respecto a la mezcla que se realizó utilizando metanol-1-butanol en relación 1:4 se observó que la muestra se mantenía traslúcida lo que permitió poder realizar la lectura en el espectrofotómetro y analizar la actividad antioxidante. Esta diferencia se muestra en la figura 11.



Figura 11. a) Uso de solventes como hexano, acetona, metanol, etanol y metanol-1-butanol en aceite de oliva para determinar DPPH.

Una vez identificado el solvente que mejor se adecuó a las muestras se realizó la determinación de inhibición antioxidante. La inhibición antioxidante de los aceites nativos y aceites con extracto de licopeno se realizó con el tratamiento T4 (pulsaciones/sonicación: descanso: 40:20; tiempo: 20 minutos; temperatura: 40°C y relación aceite/tomate: 1:5) el cual mostró una mayor extracción de licopeno. La figura 12 muestra el porcentaje de inhibición del radical ABTS y DPPH en muestras sometidas a sonicación con los parámetros descritos anteriormente.

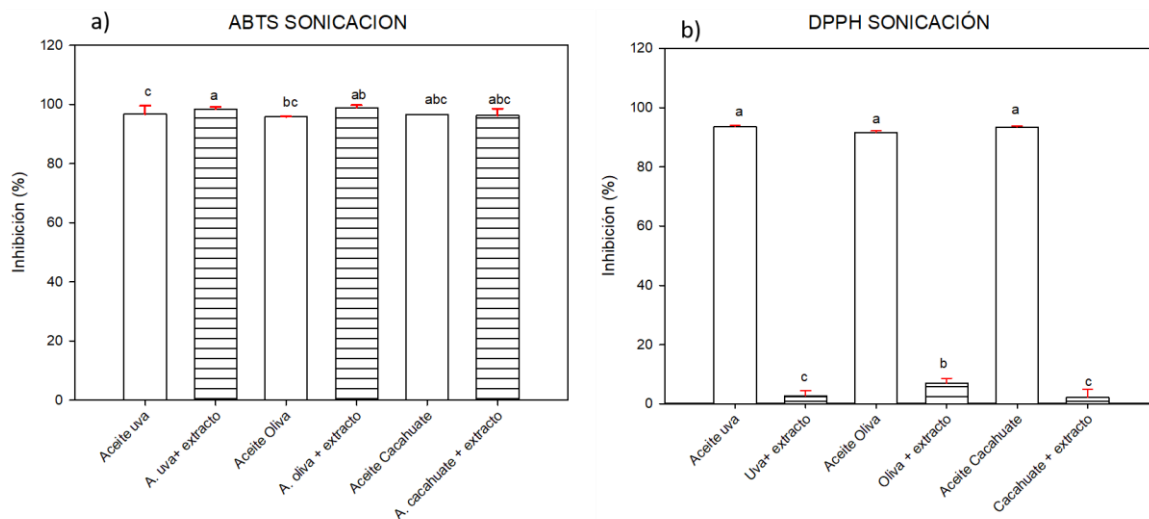


Figura 12. Inhibición de radicales en aceites nativos y aceites con extracto de licopeno mediante la técnica de sonicación utilizando radical ABTS a) y el radical DPPH b).

De acuerdo a los datos obtenidos mediante un análisis de varianza, mostraron que para la inhibición del radical ABTS en aceites nativos y aceites con extracto no existen diferencias significativas ($p \leq 0.05$) obteniendo un rango de inhibición de 95-98%. Estudios previos donde realizaron una extracción de aceite de linaza extraído mediante prensado en frío y extracto de licopeno de tomate extraído con CO₂ supercrítico determinaron que la capacidad antioxidante para el radical ABTS de las muestras tuvo valores de 2.48 ± 0.08 y 3.39 ± 0.01 $\mu\text{mol TE/g}$ respectivamente (Varas Condori, 2019).

La oxidación en los lípidos durante el periodo de inducción forma radicales libres que generan sabores y olores indeseables, una de las técnicas para medir la oxidación de un lípido es mediante la inhibición del radical DPPH (2,2-Difenil-1-picrilhidrazilo). La reducción de este radical se determina monitoreando la disminución de su absorbancia, esta se absorbe a 515 nm que al reducirse por un antioxidante la absorbancia disminuye o desaparece (Brand-Williams et al., 1995). Los resultados para la inhibición del radical DPPH mostrados en la figura 12 b) manifiestan que los aceites nativos presentaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) comparados con las muestras con extracto presentando valores de inhibición de alrededor de 92% y 7% respectivamente. El grupo de investigación Rahimi y Mikani (2019) identificaron en su estudio de extracción de licopeno a partir de desechos de tomate asistida con ultrasonido y aceite de girasol como solvente, que con este tratamiento, existe una inhibición del radical DPPH de 50%. En otro estudio de análisis de actividad antioxidante en bebidas de jalea de tomate, se logró la inhibición de radicales libres DPPH de un valor de 50%. Este estudio lo realizaron extrayendo los carotenos con solventes orgánicos (Novelina et al., 2016).

Debido a los resultados obtenidos en las muestras sometidas a sonicación se realizó una comparación con muestras sometidas a agitación sin sonicación. Lo anterior para poder evaluar la capacidad antioxidante mediante otra técnica y con ello poder tener un panorama más amplio que permita estudiar el comportamiento antioxidante de los aceites y extractos con aceite.

En la figura 13 se observan los resultados obtenidos en la extracción de licopeno sin sonicación y sometidas solo a agitación. Para el radical ABTS en aceites nativos y aceites con extracto no existen diferencias significativas ($p \leq 0.05$) obteniendo un rango de

inhibición de 92-98% para ambos tratamientos. En lo que respecta al radical DPPH, se obtuvieron mejores rendimientos en aceites nativos que en aceites con extracto de licopeno. Los aceites nativos reportaron un promedio de 91-94% mientras que los aceites con extracto arrojaron porcentaje de inhibición de 54-63%.

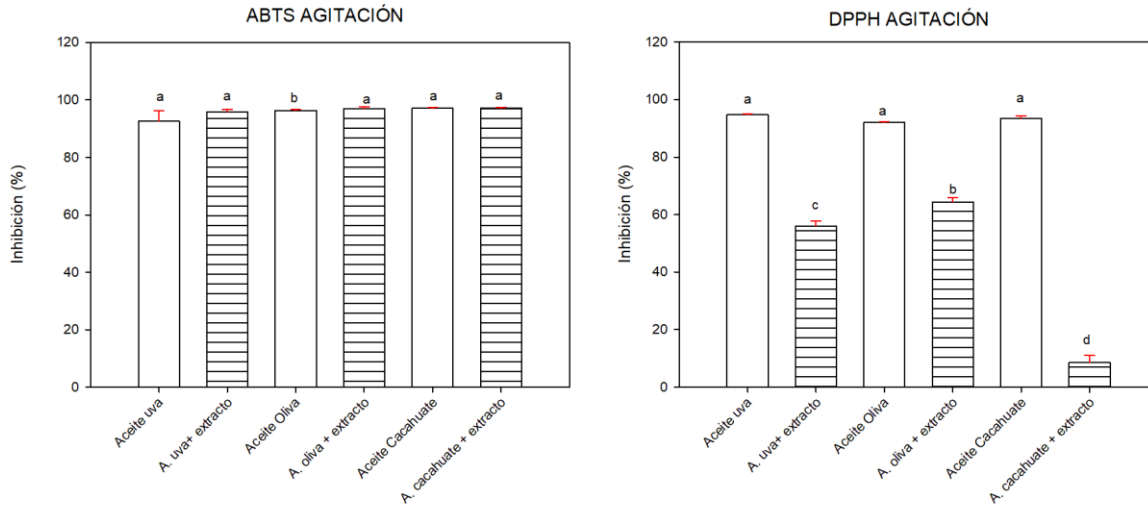


Figura 13. Inhibición de radicales en aceites nativos y aceites con extracto de licopeno mediante la técnica de agitación utilizando a) radical ABTS y b) radical DPPH.

Comparando las dos técnicas empleadas para la extracción, se pudo observar que para el radical ABTS no se encontraron diferencias entre cada una de las técnicas en virtud de que ambas metodologías arrojaron valores en un rango de 95-98%. Sin embargo, el radical DPPH demostró que la técnica de agitación sin el uso de ultrasonido presentó mayor porcentaje de inhibición sugiriendo que se extrajeron mayor cantidad de antioxidantes solo agitando la muestra. De manera particular, se puede mencionar que la muestra de aceite de oliva con extracto de licopeno presentó mayor inhibición de DPPH mediante la técnica de agitación con un valor de 63%. Estos resultados sugieren que pudieron haber influido diferentes factores que afectaron la extracción de licopeno en medio oleoso.

Con la finalidad de analizar los datos desde otra perspectiva, se prepararon las figuras 14 y 15 para ilustrar los mismos resultados, pero ahora desde un punto de vista del inhibidor utilizado. Esto podría ser analizado tomando en cuenta diferentes factores entre los cuales podemos mencionar:

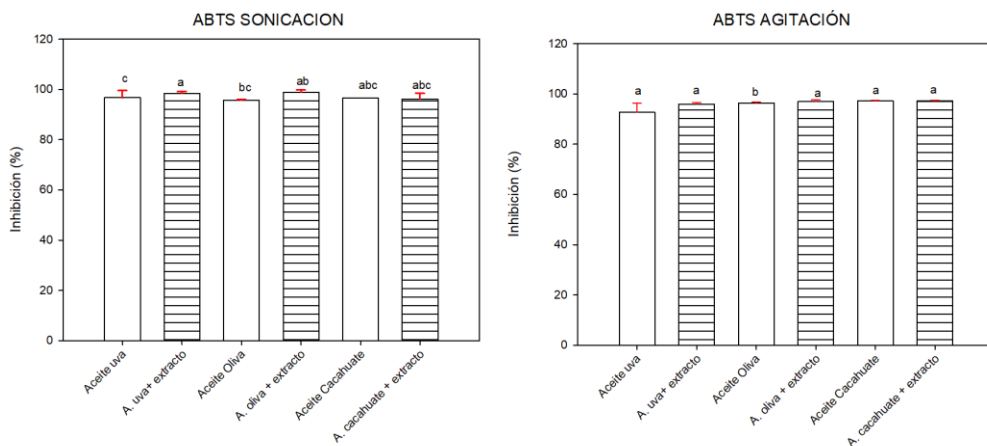


Figura 14. Inhibición de radical ABTS en muestras sometidas a sonicación y agitación.

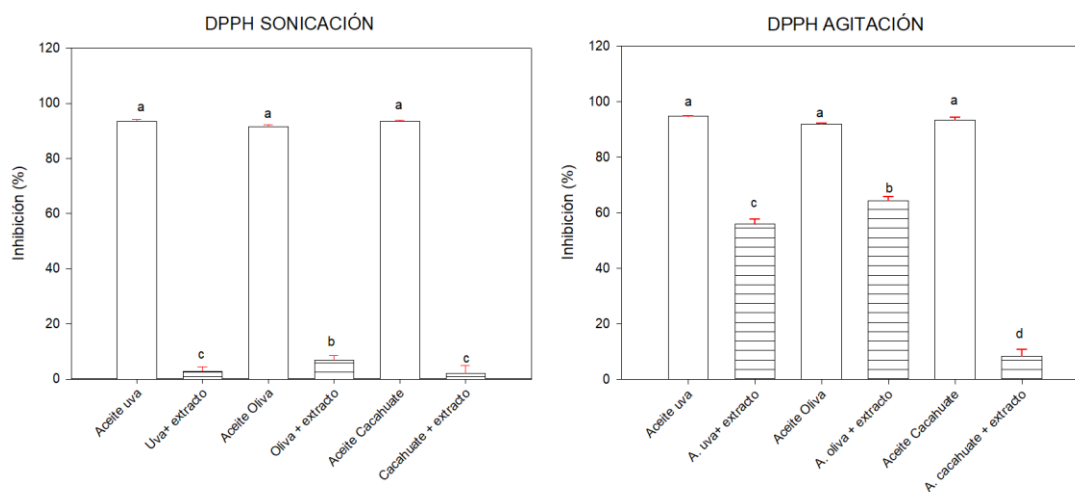


Figura 15. Inhibición de radical DPPH en muestras sometidas a sonicación y agitación.

7.2.1 Efectos del ultrasonido

La extracción mediante ultrasonido puede verse afectado por la sonicación ya que rompe las membranas del tomate mediante cavitación para lograr la liberación de licopeno que se encuentra presente en los cromoplastos de la célula. En algunos compuestos, la cavitación genera formación de radicales libres debido a las temperaturas elevadas y a la gran energía liberada por la sonda. Los resultados obtenidos y mostrados en la figura 14 permitieron observar que para el radical ABTS; las muestras de aceites nativos y aceites con extracto presentaron una mayor inhibición con diferencias significativas ($p \leq 0.05$) tanto en las

muestras sonicadas como las muestras a las que se les aplicó solo agitación. En la figura 15 se muestran los resultados obtenidos con el radical DPPH; los aceites nativos de ambas técnicas también tuvieron diferencias significativas ($p \leq 0.05$). Sin embargo, en el caso de los aceites con extracto presentaron mayor inhibición en las muestras sometidas a agitación que las sometidas a sonicación. Hablando específicamente del aceite de oliva con extracto sometidos a sonicación y agitación, se observó que al reaccionar con el radical DPPH existió una mayor inhibición en un rango de 6% y 63% respectivamente. Si comparamos estos resultados con los obtenidos en el aceite de uva con extracto, que se observó que hubo una menor inhibición en un rango de 2 y 56% respectivamente. Así mismo, el aceite de cacahuate con extracto demostró que inhibió aún en menor cantidad el radical presentando 2 y 13% respectivamente. Esta disminución significativa de inhibición pudo deberse a la formación de radicales libres por factores como cavitación o liberación de metales de la sonda metálica que generó el ultrasonido. Azuola y Vargas (2007) mencionan que al reducir el tamaño de partícula se aumenta el área de exposición al solvente y a la cavitación producida. Los fuertes colapsos que ocurren durante la cavitación transitoria y repetitiva pueden generar altas temperaturas a nivel localizado (mayores a 5,000 K). Esto causa cambios químicos en la fase de vapor dentro de la burbuja de cavitación y en el fluido inmediato que la rodea. La cavitación genera burbujas microscópicas que colapsan y pueden formar radicales libres, el aumento de estas moléculas que contienen un electrón desapareado pudo haber generado la disminución en la concentración de licopeno (Anaya-Esparza et al., 2017). Esto permite determinar que posiblemente el licopeno de tomate se puede estar oxidando por la formación de radicales libres generados por la cavitación y liberación de metales debido a la presencia de dobles enlaces conjugados del licopeno que son los que lo hacen inestable (Varas Condori, 2019).

7.2.2 Efecto del movimiento mecánico de la agitación

Para que la reacción de dos o más compuestos se lleve a cabo deben estar en contacto y preferentemente en agitación, esta técnica es muy usada debido a que es de las más económicas. En este trabajo de investigación se buscó extraer el licopeno de tomate usando solventes convencionales como aceites vegetales. La agitación genera un medio homogéneo en fase líquida mediante una dilución que facilita su contacto. Una de las técnicas de agitación más usadas es la magnética, basándose en la rotación de un campo magnético

externo que hace girar un imán introducido en una solución generando campos magnéticos que provocan corrientes en forma de remolino (Martínez, 2007). La figura 15 mostró la determinación antioxidante para el radical DPPH de las muestras sometidas a sonicación y agitación. El aceite de oliva con extracto de licopeno presentó la mayor inhibición de radical con un valor de 63% cuando fue sometida a agitación. Sin embargo, esta misma muestra solo presentó una inhibición del 6% cuando se aplicó la técnica de sonicación. Se considera que estos resultados pudieron deberse a que la técnica de agitación es menos agresiva que la técnica de sonicación. Además, no existe presencia de radicales adicionales generados por la sonda ultrasónica.

7.2.3 Efectos del inhibidor utilizado

Los radicales más frecuentes usados para evaluar la capacidad antioxidante son ABTS (20-azino-bis [3-etilbenzotiazolina]-6-ácido sulfónico) y DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo). El ABTS es un método utilizado para detectar la actividad antioxidante, este radical es aplicable para medios hidrofílicos y lipofílicos (Foh, Amadou, Foh, Kamara, & Xia, 2010), mientras que el radical DPPH es de los más estables y utilizado en medios lipofílicos (León-López, Fuentes-Jiménez, Hernández-Fuentes, Campos-Montiel, & Aguirre-Álvarez, 2019). Los antioxidantes se han clasificado por su mecanismo de acción ya sea como primarios o secundarios. Los antioxidantes primarios también conocidos como “interruptor de cadena”, son principalmente fenoles, carotenoides, flavonoides, tocoferoles y tocotrienoles los cuales están presentes en vegetales. Inhiben o retardan la oxidación de lípidos donando átomos de hidrógeno a los radicales. Los interruptores de cadena tienen mayor afinidad con los radicales peroxilo que por los lípidos. Los antioxidantes secundarios conocidos como “preventivos” actúan inhibiendo la iniciación mediante la quelación de los iones metálicos principalmente cobre y hierro. También se sabe que reducen la velocidad de oxidación de lípidos mediante desactivación de oxígeno singlete, mecanismos de transición, regeneración, absorción UV y eliminación de oxígeno (Varas Condori, 2019).

El licopeno de tomate es considerado un antioxidante secundario que previene la oxidación de radicales libres generados por diversos factores tal como se mencionó en apartados anteriores y es conocido por prevenir la oxidación de lípidos. En este trabajo, se tomó en cuenta la determinación de la actividad antioxidante utilizando radicales ABTS y DPPH en

muestras sometidas a sonicación y a agitación. La figura 12 se muestra los resultados obtenidos mediante la técnica de sonicación donde se encontró que entre los radicales ABTS y DPPH existen diferencias significativas para los tres aceites con extracto específicamente. Respecto al radical ABTS, estos tres aceites con extracto inhibieron el radical en un rango de 96% a 98%. Mientras que las mismas muestras inhibieron el radical DPPH en un rango de 2 a 6%. Por otra parte, estos resultados fueron comparados con otra técnica realizada en este trabajo que consistió en extraer el licopeno mediante agitación. En la figura 13 se muestra que los aceites con extracto inhibieron el radical ABTS en un rango de 95 a 96%. Sin embargo, al hacer la determinación con el radical DPPH se observó que estas mismas muestras lo inhibieron entre 13 y 63%. Estos resultados pueden atribuirse a que el radical ABTS tiene un principio de función menos específico que el radical DPPH ya que este último es el más usado para analizar muestras lipofílicas. El radical DPPH fue el más efectivo para determinar que entre la agitación y sonicación existieron diferencias significativas ($p \leq 0.05$). Lo anterior probablemente obedece a que la sonicación puede estar generando oxidación de licopeno. Es importante mencionar que para obtener estos resultados, se tuvieron que probar diversos solventes que no afectaran la muestra tal es el caso de la turbidez.

7.2.4 Interacción de los aceites nativos con el licopeno

Para poder explicar la interacción de los aceites nativos con el licopeno es importante establecer que los carotenoides podrían reaccionar con los radicales libres en tres formas; transfiriendo electrones, mediante abstracción de hidrógeno y por la adición de radicales. El licopeno es uno de los carotenoides más estudiados por su alto contenido presente en el tomate. Este es muy estable en su ambiente natural pero cuando se calienta, purifica o extrae con aceites o disolventes orgánicos se vuelve inestable debido a que algunas sustancias que lo conforman pueden hacer modificaciones estructurales e incluso destruir pigmentos. Estos pigmentos pueden disminuir su coloración debido a la pérdida de conjugación de la molécula en la región de los dobles enlaces, pero no al grado de la rotura del esqueleto hidrocarbonado (Meléndez-Martínez, Vicario-Romero, & Heredia-Mira, 2007).

El licopeno como carotenoide es conocido por presentar una mayor capacidad de inactivación de sensibilizadores fotoactivos que forman el oxígeno singlete ya que es un material que contiene 13 dobles enlaces, 11 de ellos son conjugados. Estos dobles enlaces pueden ser

fácilmente atacados por reactivos electrófilos que dan como resultado una gran reactividad hacia el oxígeno y radicales libres. La naturaleza altamente lipofílica del licopeno tiene una mayor actividad antioxidante a nivel de membranas celulares interactuando con componentes lipídicos (Rendón-Marín, 2016). A este fenómeno de inactivación se le conoce como estado excitado del oxígeno y cuando se logra su inactivación se previene el inicio de oxidación de lípidos (Varas Condori, 2019). La insaturación de los carotenoides es sensible al oxígeno, al calor, luz, ácidos, peróxidos y metales (Carranco Jáuregui, Calvo Carrillo, & Pérez-Gil Romo, 2011; Kong et al., 2010). Respecto a los ácidos grasos poliinsaturados presentes en los aceites vegetales, se oxidan con mayor facilidad debido a la presencia de sus dos o más dobles enlaces tal es el caso del aceite de uva y cacahuete. Sin embargo, el aceite de oliva extra virgen solo tiene un solo doble enlace en su estructura haciéndolo menos susceptible a la oxidación por radicales. Estos resultados coinciden con los encontrados por Faine et al., (2006) en donde encontraron que el aceite de oliva se oxidó en menor cantidad comparado con aquellos aceites que tenían más de dos insaturaciones. La figura 14 muestra los resultados obtenidos en la inhibición del radical ABTS en muestras sometidas a las técnicas de sonicación y agitación. Se observó que en ambas técnicas existen diferencias significativas ($p \leq 0.05$) y los aceites nativos inhibieron este radical en un rango de 92 a 97%, mientras que los aceites con extracto lo inhibieron en un rango de 95 a 98%. Respecto al radical DPPH, la figura 15 mostró que los aceites nativos lograron una inhibición de 91 a 94% en ambas técnicas. Sin embargo, los tres aceites con extracto mostraron una inhibición de 2-6% en las muestras sonicadas y una inhibición de 13 - 63% en las muestras sometidas a agitación. Se demostró que los aceites con extractos provenientes del proceso de agitación inhiben más el radical DPPH. Estos resultados sugieren que la poca inhibición que tienen los aceites con extracto puede deberse a que las moléculas antioxidantes tales como fenoles, flavonoides, carotenos presentes en los aceites nativos podrían tener una interacción nucleofílica con el licopeno y que genera una prooxidación debido a que los aceites nativos podrían contener metales en su composición que los convierte en prooxidantes tal como lo menciona Olivares y otros autores (2005). Las antocianidinas son flavonoides presentes en las uvas, estas pueden tener función de prooxidantes posiblemente debido a la conjugación entre los anillos A y B que influye en la acción prooxidante de un flavonoide iniciada por Cu, mientras que la O-metilación inactiva la prooxidación. En la figura 16 se puede observar la conformación de la

estructura de los flavonoides y en qué posición se encuentran los anillos A y B que tienen la actividad prooxidante. También es importante mencionar que la prooxidación puede deberse a la generación de especies reactivas del oxígeno (ERO) o a la neutralización de los efectos antioxidantes (Pérez Trueba, 2003). Esto significa que cuando ocurre un desequilibrio entre antioxidantes (licopeno) y pro-oxidantes (flavonoides de los aceites nativos) surge un estrés oxidativo, generando un efecto de bloqueo de electrones reduciendo la capacidad antioxidante del licopeno. Existen dos mecanismos por el cual las moléculas antioxidantes como el licopeno desactivan los radicales libres de los flavonoides presentes en los aceites vegetales: transferencia de átomos de hidrógeno y transferencia de un electro simple. Ambos mecanismos pueden ocurrir en paralelo pero solo uno puede dominar dependiendo de la estructura del antioxidante. El licopeno puede actuar principalmente mediante el mecanismo de transferencia de electrón en virtud de que posee once dobles enlaces conjugados los cuales pueden interactuar transfiriendo electrones (Aguirre-Cruz, León-López, Cruz-Gómez, Jiménez-Alvarado, & Aguirre-Álvarez, 2020).

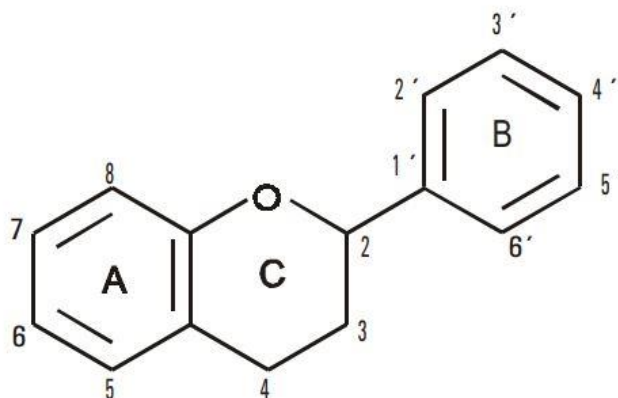


Figura 16. Estructura básica de los flavonoides en donde se ilustran los anillos A y B los cuales son responsables de la actividad prooxidante. Fuente: (Pérez Trueba, 2003).

7.3 Determinación de color

Los parámetros de color L^* , a^* y b^* se analizan como: L^* = Luminosidad (0=negro y 100=blanco); a^* = color rojo (valor +) o verde (valor -) y por último la letra b^* = color amarillo (valor +) o azul (valor-). La luminosidad de los diferentes aceites nativos reveló que el aceite de oliva es más claro (L^* = 41.08) que el aceite de cacahuete (L^* = 39.84) y el más oscuro es el aceite de uva (39.41), En el caso de los aceites con extracto se encontró que el aceite de oliva con extracto fue el más claro (L^* = 19.16), el extracto con aceite de uva tubo una luminosidad de (L^* = 17.05) y el extracto con aceite de cacahuete (L^* = 16.72). Para este parámetro se determina que los extractos con aceites presentan mayor oscurecimiento debido al pigmento rojo cedido por el licopeno. El aceite de cacahuete con extracto tendió a ser el más oscuro y el aceite de oliva con extracto a ser el más claro.

Los valores de (a^*) mostraron el grado de coloración de la muestra de los aceites nativos, el aceite de uva presento un valor negativo (a^* = -1.73), aceite de cacahuete (a^* = 0.52) y aceite de oliva extra virgen (a^* =3.52). Los extractos con aceites tendieron más hacia el lado positivo; aceite de cacahuete con un valor mayor (a^* = 27.10), seguido del extracto con aceite de uva (a^* = 27.08) y extracto con aceite de oliva con valor menor (a^* = 26.98). Lo que muestra que los aceites nativos presentan una coloración mínima, mientras que los aceites con extracto resultaron con una tendencia hacia el color rojo (valores positivos) debido a la presencia de licopeno. Respecto al valor (b^*) los aceites nativos tendieron a dirigirse hacia el color amarillo.

El aceite de oliva extra virgen con valor (b^* = 26.89) siendo este aceite el de mayor valor, el aceite de cacahuete con (b^* = 19.12) y por último el aceite de uva (b^* = 17.36). En los aceites con extracto los valores fueron entre (b^* = 12.739) para el extracto con aceite de oliva extra virgen, (b^* = 11.38) extracto con aceite de uva y finalmente (b^* = 11.16) para el extracto con aceite de cacahuete. En esta coordenada (b^*) los resultados fueron mayores en los aceites debido a la tendencia de color amarillo presente en los aceites nativos sin extracto, tal como se muestra en la tabla 7.

Varas Condori (2019) realizó un su estudio para determinar el efecto antioxidante del extracto de licopeno de tomate (*Solanum lycopersicum*) sobre la vida útil del aceite de linaza reportando que los parámetros del espacio de color CIELab muestran diferencias

significativas en el aceite de linaza y linaza con licopeno siendo el aceite de linaza con licopeno el que muestra menor luminosidad, mayor tendencia al color rojo y menor tendencia al color amarillo debido a los siguientes resultados, para L* en aceite de linaza fue de 36.23 y disminuyó a 20.97 al agregar el extracto de licopeno al aceite. El valor para la coordenada a* fue de -1.40, a adición del extracto de licopeno al aceite de linaza incremento a 5.21 que evidencian por el color rojo que tomó el aceite, para la coordenada b* hubo una disminución de 23.43 a 4.70. Mostrando un resultado similar al que se obtuvo en la técnica realizada en este proyecto. Para la determinación de color es importante tomar en cuenta las condiciones ambientales y del manejo de las variedades ya que se puede modificar los resultados obtenidos en color (Bonfiglio Caprile & Hernández Pineyrúa, 2013).

Tabla 7. Parámetros de color L, a y b en tres tipos de aceites nativos y extracto con aceites

Muestra	(100) L (0)	- a +	- b +
Uva	39.41 ± .22	-1.73 ± 0.04	17.36 ± 0.19
Uva + Extracto	17.05 ± 0.27	27.08 ± 0.33	11.38 ± 0.18
Oliva extra virgen	41.08 ± 0.45	3.52 ± 1.03	26.89 ± 0.12
Olive + Extracto	19.16 ± 0.05	26.98 ± 0.01	12.79 ± 0.03
Cacahuete	39.84 ± 0.20	0.52 ± 0.02	19.12 ± 0.06
Cacahuete + Extracto	16.72 ± 0.05	27.10 ± 0.38	11.16 ± 0.03

7.3.1 Estructura microscópica del licopeno de tomate

En la figura 17 se muestra la estructura de un tomate maduro, al visualizarlo con un objetivo de 100x, se identificaron tejidos celulares. Dentro de estos tejidos, se observaron zonas con coloración roja que pertenecen a los cromoplastos. Los cromoplastos son plastidios donde se lleva a cabo la fotosíntesis (Egea et al., 2010). Estos son los almacenadores de pigmentos tal es el caso del licopeno. Este carotenoide es el encargado de brindar la coloración roja al tomate. Por otra parte, se pudieron observar manchas negras las cuales son relacionadas con el aceite de inmersión que se agregó para poder visualizar las células.

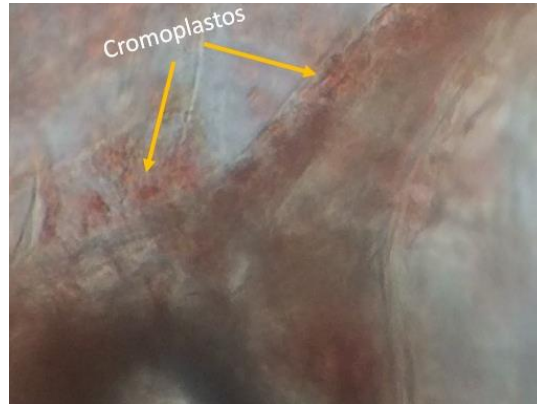


Figura 17. Estructura química del tomate donde se encuentran los cromoplastos.

7.4 Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR)

En las figuras 18 y 19 se identifican tres picos que pertenecen a las longitudes de onda de 2850 cm^{-1} , 2920 cm^{-1} y 2960 cm^{-1} . El primer gráfico representa los estudios realizados a los aceites vegetales de cacahuete, uva y oliva extra virgen. El segundo gráfico muestra los picos pertenecientes a los extractos con cada uno de los aceites. En ambos gráficos se observan los mismo picos, de izquierda a derecha se observa el primero a 2850 cm^{-1} , el segundo pico 2920 cm^{-1} asignados al estiramiento de C-H en forma asimétrica y simétrica (Nyuk & Mohamad Isa, 2013), el ultimo pico 2960 cm^{-1} .

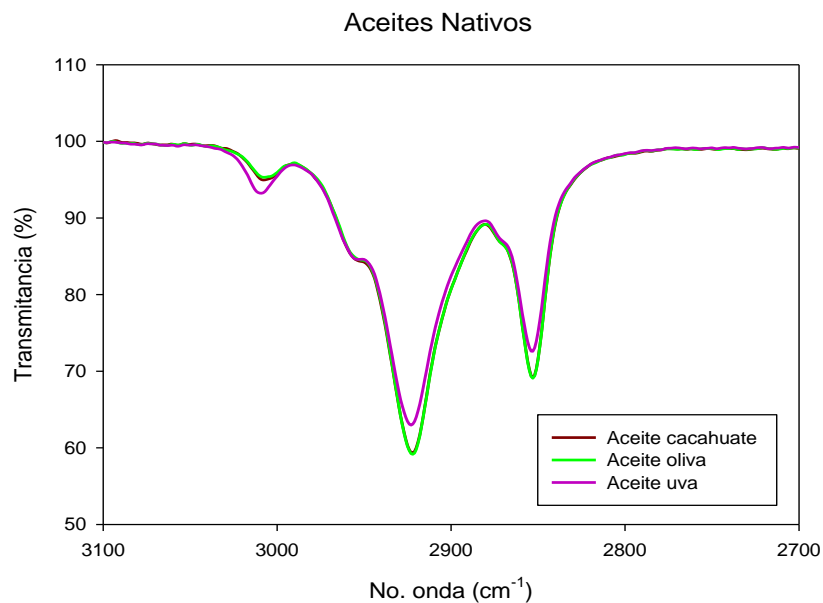


Figura 18. Determinación de FTIR aceites nativos.

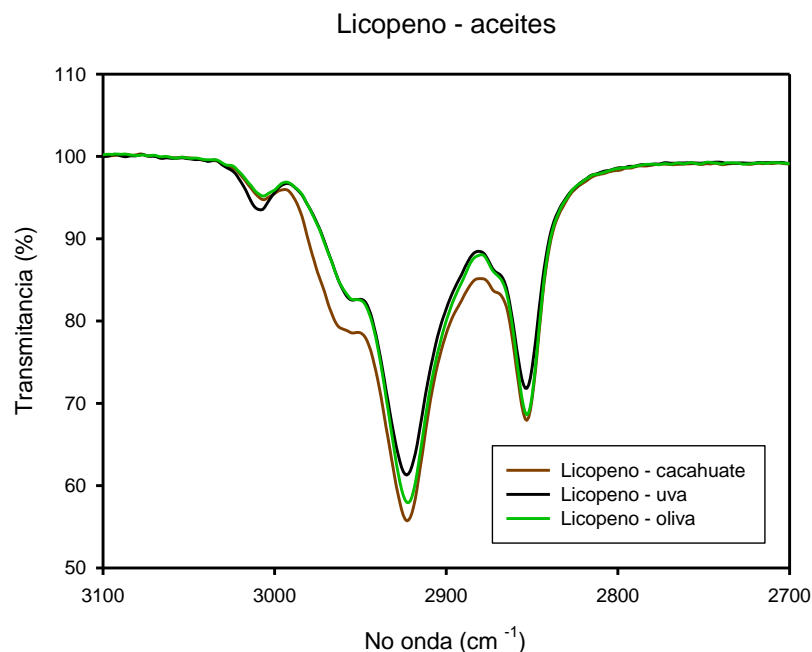


Figura 19. Determinación de (FTIR) de aceites con extracto de licopeno.

Las bandas de absorción principales de los lípidos se encuentran en la región de 3000 a 2800 cm^{-1} donde las vibraciones de los enlaces C-H de los metilos están en las bandas 2956 y 2874 cm^{-1} , en las bandas 2922 y 2852 cm^{-1} se encuentran los CH_2 . La interpretación de cada dato depende del conocimiento de propiedades espectroscópicas de cada muestra biológica (Barraza-Garza et al., 2013). Otros estudio previos han identificado el modo estiramiento C-H que corresponde a los picos 2920 cm^{-1} y 2950 cm^{-1} , estos picos pertenecen a la estructura de licopeno (Rahimi & Mikani, 2019).

Los picos 2920 y 2850 cm^{-1} pertenecen al estiramiento simétrico y asimétrico de C-H alifático. La absorción en el rango de 3000 a 2800 cm^{-1} muestra presencia de C-H (Movasaghi, Rehman, & ur Rehman, 2008). El pico a los 2920 cm^{-1} presenta un estiramiento asimétrico de los enlaces C-H; el segundo pico muestra un estiramiento simétrico. La absorción de hidrocarburos alifáticos es similar en todos los espectros registrados. Las ubicaciones de ambos picos de absorción muestran la presencia de metilo grupo de hidrocarburos alifáticos (Krumins, Klavins, Seglins, & Kaup, 2012).

7.5 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

La figura 20 muestra los termogramas de calorimetría diferencial de barrido en muestra de aceites de uva con extracto de licopeno, aceite de oliva extra virgen con extracto de licopeno y aceite de cacahuete con extracto de licopeno que fueron sometidas a sonicación. Estos mostraron que a mayor grado de instauración en los aceites se obtiene temperaturas de fusión bajos. Como ejemplo, el aceite de oliva tiene mayor cantidad de ácido graso oleico por lo tanto es el menos insaturado, esta muestra presentó la mayor temperatura de fusión (T_m) que fue alrededor de $-6.30\text{ }^{\circ}\text{C}$. El aceite de cacahuete contiene mayor cantidad de ácido graso oleico y linoleico, este presentó una T_m de $-13.57\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, el aceite de uva que posee el mayor grado de instauración debido a la cantidad de ácido graso linolenico que contiene. Este reportó la más baja temperatura de fusión alrededor de $-24.64\text{ }^{\circ}\text{C}$. Si se analizan las propiedades térmicas de los aceites con extracto desde un punto de vista estructural, se observa que el aceite de cacahuete fue el que requirió mayor energía para fundirse en virtud de que presentó una entalpía de 73.23 J/g . Esto podría deberse a la cantidad de ácidos grasos que contiene el aceite; el ácido oleico tiene 34 átomos de hidrógeno y ácido linoleico con 32 átomos de carbono. El aceite de oliva (26.81 J/g) contiene en su mayoría ácido graso oleico con 34 átomos de hidrógeno. Finalmente, el aceite de uva (22.43 J/g) cuenta con el mayor contenido de ácido linolenico con 30 átomos de carbono. Trabajos previos, analizaron diferentes muestras de aceite de oliva mediante calorimetría diferencial de barrido e identificaron que la entalpia del aceite de oliva extra virgen fue de $73,1 \pm 0,9\text{ J/g}$ (Márquez, 2003). La complejidad de las propiedades térmicas de los aceites se debe principalmente a los triacilgliceroles, por lo tanto, la temperatura de fusión no es específica. La fusión y cristalización de los aceites son importantes para determinar su funcionalidad cuando son incorporados a diversos productos alimenticios. Estudios previos donde analizaron once tipos de aceites diferentes encontraron que la temperatura de transición y la forma de los picos de la T_m dependen de la tasa de calentamiento. Los triacilgliceroles mayormente saturados se funden a temperaturas más altas que los mayormente insaturados (Márquez, 2003).

Trabajos previos (2018), realizaron un estudio donde produjeron y caracterizaron nanopartículas con licopeno de tomate, en la identificación de licopeno mediante DSC encontraron un pico endotérmico a 163.3 °C relacionado con el punto de fusión del licopeno. Chang y otros autores (2016) identificaron un pico endotérmico a 172°C de igual forma perteneciente al licopeno. Los autores obtuvieron estos resultados en muestras de soluciones acuosas mientras que los resultados de la presente investigación fueron obtenidos en muestras de soluciones oleosas.

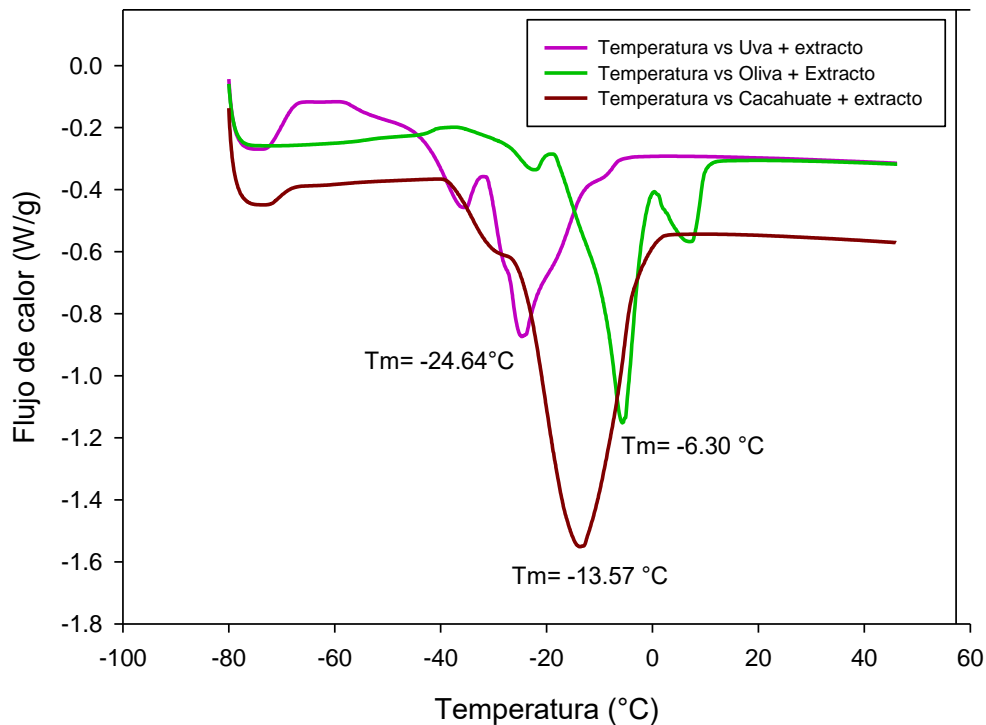


Figura 20. Determinación de propiedades térmicas en aceite de uva, oliva extra virgen y cacahuete. Estas muestras contienen licopeno y provienen del proceso de sonicación.

7.6 Espectroscopia ultravioleta visible (UV-Vis)

Los espectros de la figura 21 (a) realizados a los aceites nativos no muestran picos en ninguna región, mientras que los espectros de la figura 21 (b) muestran tres picos pertenecientes a antioxidantes en las regiones 448, 473 y 508 nm. Los dos primeros se refieren a los picos característicos del licopeno, el tercer pico pertenece a otros carotenoides. Estos resultados permiten comprobar que en los aceites nativos no existe presencia de licopeno mientras que en los extractos con aceites si existe. Arándiga y Díaz (2008) extrajeron licopeno con solventes convencionales y al hacer la determinación mediante UV-Vis identificaron la presencia de licopeno a 471 nm. Chemat y col., (2010) realizaron extracción de licopeno con limoneno obtenido de naranja y al realizar espectro de absorción UV-Vis identificaron tres picos a 457, 483 y 516 nm el pico de licopeno es a 483nm.

Finalmente, Rahimi y Mikani (2019) realizaron extracción de licopeno de tomate con ultrasonido y aceite de girasol, estos autores identificaron que el pico perteneciente al licopeno se encuentra en 472 nm. Los resultados obtenidos en este trabajo, comparados con los obtenidos por otros grupos de investigación muestran que el pico perteneciente al carotenoide obtenido en este trabajo si pertenece al licopeno.

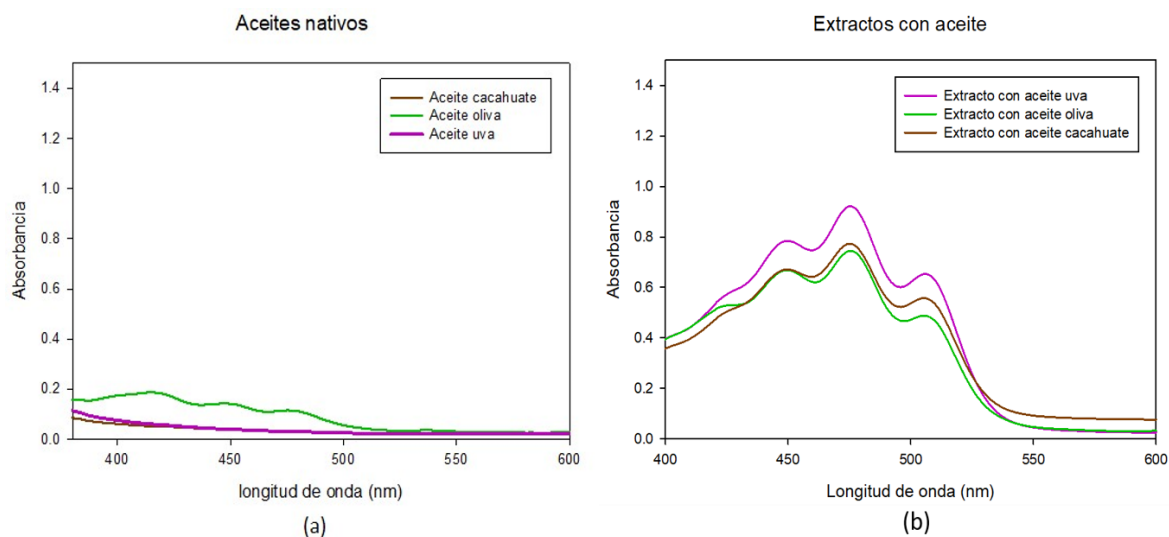


Figura 21. (a) Espectroscopia UV-Vis en aceites nativos y (b) espectroscopia en extractos con licopeno.

8 CONCLUSIONES

El uso de ultrasonido de alta intensidad no es una técnica recomendada para la extracción de licopeno debido a la formación de radicales libres que se forman por diversos factores y oxidan este carotenoide. Una de las técnicas que se recomienda usar para la extracción de licopeno es mediante la técnica de agitación magnética ya que esta técnica es menos agresiva y no forman radicales libres que oxiden al licopeno y a los compuestos presentes en los aceites vegetales. Adicionalmente, los aceites vegetales con alto contenido de insaturaciones, también fueron susceptibles a la oxidación por diversos factores, tal es el caso del aceite de cacahuete con extracto que sufrió una mayor oxidación, por lo tanto, este tipo de aceite no es factible para utilizarlo como solvente en la extracción de licopeno. Sin embargo, el aceite que si permitió tener mayor extracción fue el aceite de oliva debido a que es muy recomendable usarlo como solvente para extraer este tipo de carotenoides. También se concluye que el radical que permitió analizar de mejor manera muestras oleosas es el DPPH debido a su mayor afinidad con muestras oleosas.

9 REFERENCIAS

- Aadil, R. M., Zeng, X.-A., Han, Z., & Sun, D.-W. (2013). Effects of ultrasound treatments on quality of grapefruit juice. *Food Chem*, *141*(3), 3201-3206.
- Adekunte, A., Tiwari, B., Cullen, P., Scannell, A., & O'donnell, C. (2010). Effect of sonication on colour, ascorbic acid and yeast inactivation in tomato juice. *Food Chem*, *122*(3), 500-507.
- Aguirre-Cruz, G., León-López, A., Cruz-Gómez, V., Jiménez-Alvarado, R., & Aguirre-Álvarez, G. (2020). Collagen Hydrolysates for Skin Protection: Oral Administration and Topical Formulation. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, *9*(2), 181. doi: 10.3390/antiox9020181
- Alighourchi, H., Barzegar, M., Sahari, M., & Abbasi, S. (2013). Effect of sonication on anthocyanins, total phenolic content, and antioxidant capacity of pomegranate juices. *International Food Research Journal*, *20*(4).
- Anaya-Esparza, L. M., Velázquez-Estrada, R., Roig-Sagués, A., Garcia, H., Sayago-Ayerdi, S., & Montalvo-González, E. (2017). Thermosonication: An alternative processing for fruit and vegetable juices. *Trends in Food Science & Technology*, *61*, 26-37. doi: 10.1016/j.tifs.2016.11.020
- Aranda Alonso, C. (2013). *Análisis cualitativo y cuantitativo de licopeno y ácido ascórbico en tomate y fresa, en presencia de microorganismos endófitos*. (Maestría), Universidad Internacional de Andalucía.
- Arándiga-Martí, G., & Díaz-Sánchez, S. (2008). *Estudio del licopeno del tomate como colorante natural desde la perspectiva analítica e industrial*. (Licenciatura), Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña, España.
- Aredo, V., Passalacqua, E. S., Pratavieira, S., & de Oliveira, A. L. (2019). Formation of lycopene-loaded hydrolysed collagen particles by supercritical impregnation. *LWT*, *110*, 158-167. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.04.055>
- Arya, S. S., Salve, A. R., & Chauhan, S. (2016). Peanuts as functional food: a review. *Journal of food science and technology*, *1*(53), 31-41.
- Awad, T. S., Moharram, H. A., Shaltout, O. E., Asker, D., & Youssef, M. M. (2012). Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Research International*, *48*(2), 410-427. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.05.004>
- Azuola, R., & Vargas-Aguilar, P. (2007). Extracción de sustancias asistida por ultrasonido (EUA). *Revista Tecnología en Marcha*, *20*(4).

- Baldenegro, Q. C. V. G. (2011). *Expresión de genes involucrados en la síntesis de carotenoides en el fruto de tomate por la aplicación de oligogalacturonidos y ethephon*. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo.
- Baldizón, C. G., Córdoba, M. E. M., & Valle, G. C. (2011). Evaluación de la vida útil de una pasta de tomate mediante pruebas aceleradas por temperatura. *Revista Ingeniería*, 21(2), 31-38.
- Barraza-Garza, G., de la Rosa, L. A., Martínez-Martínez, A., Castillo-Michel, H., Cotte, M., & Alvarez-Parrilla, E. (2013). La microespectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIRM) en el estudio de sistemas biológicos. *Revista latinoamericana de química*, 41(3), 125-148.
- Baysal, T., Ersus, S., & Starmans, D. A. (2000). Supercritical CO(2) extraction of beta-carotene and lycopene from tomato paste waste. *J Agric Food Chem*, 48(11), 5507-5511.
- Bergougnoux, V. (2014). The history of tomato: From domestication to biopharming. *Biotechnology Advances*, 32, 170–189.
- Berrospe-Ochoa, E. A., Saucedo-Veloz, C., Ramírez-Vallejo, P., & Ramírez- Guzmán, M. E. (2015). Comportamiento Agronómico de plántulas de poblaciones nativas de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) en producción intensiva en invernadero. *Agrociencia*, 49(6), 637-650.
- Blanch, G. P., Ruiz del Castillo, M. L., del Mar Caja, M., Pérez-Méndez, M., & Sánchez-Cortés, S. (2007). Stabilization of all-trans-lycopene from tomato by encapsulation using cyclodextrins. *Food Chem*, 105(4), 1335-1341. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.04.060>
- Bonfiglio Caprile, F., & Hernández Pineyrúa, R. (2013). *Caracterización nutricional de tres cultivares de tomate industria*. (Licenciatura), Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- Borguini, R. G., & Ferraz Da Silva Torres, E. A. (2009). Tomatoes and Tomato Products as Dietary Sources of Antioxidants. *Food Reviews International*, 25(4), 313-325. doi: 10.1080/87559120903155859
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M.-E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food science and Technology*, 28(1), 25-30.
- Cadoni, E., Rita De Giorgi, M., Medda, E., & Poma, G. (1999). Supercritical CO2 extraction of lycopene and β -carotene from ripe tomatoes. *Dyes and Pigments*, 44(1), 27-32. doi: [https://doi.org/10.1016/S0143-7208\(99\)00065-0](https://doi.org/10.1016/S0143-7208(99)00065-0)
- Campomanes, Á. M. F., & Chamorro, R. A. M. (2009). Influencia de la Temperatura y Tamaño de Partícula en el Proceso de Extracción de Aceite de Semilla de uva (*Vitis vinifera*). *Revista de Investigación Universitaria*, 1(1).

- Campos, K. K. D., de Oliveira Ramos, C., Martins, T. L., Costa, G. d. P., Talvani, A., Garcia, C. C. M., . . . Bezerra, F. S. (2019). Lycopene mitigates pulmonary emphysema induced by cigarette smoke in a murine model. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, *65*, 93-100. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2018.12.008>
- Candelas-Cadillo, M. G., Alanís-Guzmán, M. G. J., Bautista-Justo, M., Del Río-Olague, F., & García-Díaz, C. (2005). Contenido de licopeno en jugo de tomate secado por aspersion. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, *4*(3), 299-307.
- Candelas Cadillo, M. G., Alanís Guzmán, M. G. d. J., & Río Olague, F. d. (2006). Cuantificación de licopeno y otros carotenoides en tomate y polvo de tomate *Revista Mexicana de Agronegocios*, *X*(19), 0.
- Cardona, E. M., Ríos, L. A., & Restrepo, G. M. (2006). Extraction of the carotenoid lycopene from chonto tomato (*lycopersicum esculentum*). *Vitae*, *13*(2), 44-53.
- Carranco Jáuregui, M. E., Calvo Carrillo, M., & Pérez-Gil Romo, F. (2011). Carotenoides y su función antioxidante: Revisión. *Arch. latinoam. nutr*, 233-241.
- Carretto, V., Cuervo, P., Dirienzo, G., & di Vito, V. (2002). Aceite de oliva: beneficios en la salud. *Invenio: Revista de investigación académica*(8), 141-149.
- Carrillo, L. M., Serra, J. D., Álvarez, J. R. M., i Alberich, R. S., & Jiménez, F. P. (2011). Grasas de la dieta y salud cardiovascular. *Anales de Pediatría: Publicación Oficial de la Asociación Española de Pediatría (AEP)*, *74*(3), 192.
- Casierra-Posada, F., & Avendaño, Ó. A. (2008). Calidad en frutos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cosechados en diferentes estados de madurez. *Agronomía Colombiana*, *26*(2), 300-307.
- Catalkaya, G., & Kahveci, D. (2019). Optimization of enzyme assisted extraction of lycopene from industrial tomato waste. *Separation and Purification Technology*, *219*, 55-63. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.03.006>
- Clarke, P., & Hill, C. (1970). Physical and chemical aspects of ultrasonic disruption of cells. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *47*(2B), 649-653.
- Cruz-Bojórquez, R. M., González Gallego, J., & Pilar, S. C. (2013). Propiedades funcionales y beneficios para la salud del licopeno. *Nutrición Hospitalaria*, *1*. doi: 10.3305/nh.2013.28.1.6302
- Chandrapala, J., Oliver, C., Kentish, S., & Ashokkumar, M. (2012). Ultrasonics in food processing. *Ultrason Sonochem*, *19*(5), 975-983. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.01.010>
- Chang, C.-W., Wang, C.-Y., Wu, Y.-T., & Hsu, M.-C. (2016). Enhanced solubility, dissolution, and absorption of lycopene by a solid dispersion technique: The dripping pill delivery system. *Powder technology*, *301*, 641-648.

- Chemat-Djenni, Z., Ferhat, M. A., Tomao, V., & Chemat, F. (2010). Carotenoid Extraction from Tomato Using a Green Solvent Resulting from Orange Processing Waste. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, *13*(2), 139-147. doi: 10.1080/0972060X.2010.10643803
- Chemat, F., Vian, M., & Cravotto, G. (2012). *Green Extraction of Natural Products: Concept and Principles* (Vol. 13).
- Chemat, F., Zill e, H., & Khan, M. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrason Sonochem*, *18*(4), 813-835. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.11.023>
- Chen, D., Huang, C., & Chen, Z. (2019). A review for the pharmacological effect of lycopene in central nervous system disorders. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, *111*, 791-801. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2018.12.151>
- Cheng, L., Soh, C., Liew, S., & Teh, F. (2007). Effects of sonication and carbonation on guava juice quality. *Food Chem*, *104*(4), 1396-1401.
- Choudhari, S. M., & Ananthanarayan, L. (2007). Enzyme aided extraction of lycopene from tomato tissues. *Food Chem*, *102*(1), 77-81. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.04.031>
- Deaquiz-Oyola, Y. A., & Burgos. Avila, Y. E. (2013). Efecto de la aplicación de Giberelinas (GA3) sobre germinación de semillas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) variedad Santa Cruz. *Conexión Agropecuaria JDC*, *3*(2), 29-36.
- Derbyshire, E. (2014). A review of the nutritional composition, organoleptic characteristics and biological effects of the high oleic peanut. *International journal of food sciences and nutrition*, *65*(7), 781-790.
- Durán Agüero, S., Torres García, J., & Sanhueza Catalán, J. (2015). Aceites vegetales de uso frecuente en Sudamérica: características y propiedades. *Nutrición Hospitalaria*, *32*(1), 11-19.
- Egea, I., Barsan, C., Bian, W., Purgatto, E., Latche, A., Chervin, C., . . . Pech, J. C. (2010). Chromoplast differentiation: current status and perspectives. *Plant Cell Physiol*, *51*(10), 1601-1611. doi: 10.1093/pcp/pcq136
- Egydio, J. A., Moraes, Â. M., & Rosa, P. T. V. (2010). Supercritical fluid extraction of lycopene from tomato juice and characterization of its antioxidation activity. *The Journal of Supercritical Fluids*, *54*(2), 159-164. doi: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2010.04.009>
- Espín, J. C., Soler-Rivas, C., & Wichers, H. J. (2000). Characterization of the Total Free Radical Scavenger Capacity of Vegetable Oils and Oil Fractions Using 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl Radical. *J Agric Food Chem*, *48*(3), 648-656. doi: 10.1021/jf9908188

- Faine, L. A., Rodrigues, H. G., Galhardi, C. M., Ebaid, G. M., Diniz, Y. S., Padovani, C. R., & Novelli, E. L. (2006). Effects of olive oil and its minor constituents on serum lipids, oxidative stress, and energy metabolism in cardiac muscle. *Canadian journal of physiology and pharmacology*, 84(2), 239-245.
- Feng, H., V. Barbosa-Canovas, G., & Weiss, J. (2011a). The Physical and Chemical effects of Ultrasound. In S. Kentish & M. Ashokkumar (Eds.), *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing* (Vol. 2, pp. 1-12). Australia: Springer Science+Business Media, LLC.
- Feng, H., V. Barbosa-Canovas, G., & Weiss, J. (2011b). Ultrasound applications in food processing. In D. Bermúdez-Aguirre, T. Mobbs & G. V. Barbosa-Cánovas (Eds.), *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing* (Vol. 2, pp. 65- 101). Washington State University, Pullman: Springer Science+Business Media, LLC.
- Fernández, C., Pitre, A., Llobregat, M. J., & Rondón, Y. (2007). Evaluación del Contenido de Licopeno en Pastas de Tomate Comerciales. *Información tecnológica*, 18, 31-38.
- Foh, M. B. K., Amadou, I., Foh, B. M., Kamara, M. T., & Xia, W. (2010). Functionality and antioxidant properties of tilapia (*Oreochromis niloticus*) as influenced by the degree of hydrolysis. *International journal of molecular sciences*, 11(4), 1851-1869.
- Franco-Mora, O., Salomon-Castaño, J., Morales, A., Castañeda-Vildózola, A., & Rubí-Arriaga, M. (2015). Ácidos grasos y parámetros de calidad del aceite de semilla de uva silvestre (*Vitis spp.*). *Scientia Agropecuaria*, 6(4), 271-278.
- Gámez-Losada, M. d. C. (2017). *Aprovechamiento de derivados de tomate, como fuente de licopeno, en productos cárnicos tradicionales y tratados con radiaciones ionizantes.* (Doctorado), Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España
- Godínez- Oviedo, A., Zamora-Rodríguez, Z., Martínez-Juárez, V., Fleitas-González, E., Hernández-Rosado, A., & Peña-Jiménez, F. (2017). Evaluación del efecto antibacterial del aceite de oliva ozonizado contra *Listeria monocytogenes*. *Abanico veterinario*, 7, 36-43.
- Hatami, T., Meireles, M. A. A., & Ciftci, O. N. (2019). Supercritical carbon dioxide extraction of lycopene from tomato processing by-products: Mathematical modeling and optimization. *Journal of Food Engineering*, 241, 18-25. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.07.036>
- Henriques da Silva, D. J., Barbosa-Abreu, F., Brunele-Caliman Fabiano Ricardo., Castro-Antonio, A., & Patel, V. B. (2008). Tomatoes: Origin, cultivation techniques and germplasm resources. In V. R. Preedy & R. R. Watson (Eds.), *Tomatoes and tomato products. Nutritional, medicinal and therapeutic properties* (pp. 3-25). Hampshire, USA: Science publishers.
- Hernández Pérez, V., Hellín García, P., Fenoll Serrano, J., Molina Menor, M. V., Cava Artero, J., Garrido González, I., & Flores Fernández-Villamil, P. (2014). *Efecto de*

- la temperatura sobre la acumulación de carotenoides en frutos de tomate en diferentes estados de desarrollo. III Workshop en Investigación Agroalimentaria. Cartagena, Colombia.*
- Herrera-Covarrubias, D., Fernandez-Pomares, C., Aranda-Abreu, G. E., Dominguez-Ortiz, M. A., & Hernandez-Aguilar, M. E. (2013). El licopeno y su papel en la prevención del cáncer de próstata. *Revista eNeurobiología*, 4(8), 1-16.
- Jiménez, M., Aguilar, M., Zambrano, M., & Kolar, E. (2001). Propiedades físicas y químicas del aceite de aguacate obtenido de puré deshidratado por microondas. *Revista de la Sociedad Química de México*, 45(2), 89-92.
- Jiménez, M. E., Aguilar, M. d. R., Zambrano, M. d. l. L., & Kolar, E. (2001). Propiedades físicas y químicas del aceite de aguacate obtenido de puré deshidratado por microondas. *Revista de la Sociedad Química de México*, 45, 89-92.
- Jiménez, P., Masson, L., & Quitral, V. (2013). Composición química de semillas de chía, linaza y rosa mosqueta y su aporte en ácidos grasos omega-3. *Revista chilena de nutrición*, 40(2), 155-160.
- Jones, B. J. (1999). Tomato plant culture In. *The field, greenhouse, and home garden* (pp. 183). Boca Raton, USA: CRC Press LLC.
- Juárez Trujillo, N., Jiménez Fernández, V. M., Guerrero Analco, J. A., Monribot Villanueva, J. L., & Jiménez Fernandez, M. (2017). Caracterización del aceite y harina obtenido de la semilla de uva silvestre (*Vitis tiliifolia*). *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(5), 1113-1126.
- Kong, K.-W., Khoo, H.-E., Prasad, K. N., Ismail, A., Tan, C.-P., & Rajab, N. F. (2010). Revealing the power of the natural red pigment lycopene. *Molecules*, 15(2), 959-987.
- Konwarh, R., Pramanik, S., Kalita, D., Mahanta, C. L., & Karak, N. (2012). Ultrasonication – A complementary ‘green chemistry’ tool to biocatalysis: A laboratory-scale study of lycopene extraction. *Ultrason Sonochem*, 19(2), 292-299. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2011.07.010>
- Krebesová, R., Castro, A. J., & Alche, J. (2015). Identificación de las proteínas presentes en el aceite de oliva virgen extra y determinación de su origen tisular. *Madrid, España: ISBN*.
- Krumins, J., Klavins, M., Seglins, V., & Kaup, E. (2012). Comparative study of peat composition by using FT-IR spectroscopy. *Material Science and Applied Chemistry*, 26, 106-114.
- León-López, A., Fuentes-Jiménez, L., Hernández-Fuentes, A. D., Campos-Montiel, R. G., & Aguirre-Álvarez, G. (2019). Hydrolysed collagen from sheepskins as a source of functional peptides with antioxidant activity. *International journal of molecular sciences*, 20(16), 3931.

- Li, X., Wang, Z., Zhang, G., & Yi, L. (2019). Improving lycopene production in *Saccharomyces cerevisiae* through optimizing pathway and chassis metabolism. *Chemical Engineering Science*, *193*, 364-369. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.09.030>
- Li, Y., Fabiano-Tixier, A. S., Tomao, V., Cravotto, G., & Chemat, F. (2013). Green ultrasound-assisted extraction of carotenoids based on the bio-refinery concept using sunflower oil as an alternative solvent. *Ultrason Sonochem*, *20*(1), 12-18. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.07.005>
- Lianfu, Z., & Liu, Z. (2008). *Optimization and comparison of ultrasound/microwave assisted extraction (UMAE) and ultrasonic assisted extraction (UAE) of lycopene from tomatoes* (Vol. 15).
- Liao, J. (2016). An Improved Ultrasonic-Assisted Extraction Method by Optimizing the Ultrasonic Frequency for Enhancing the Extraction Efficiency of Lycopene from Tomatoes. *Food analytical methods*, v. 9(no. 8), pp. 2288-2298-2016 v.2289 no.2288. doi: 10.1007/s12161-016-0419-4
- Lin, C. H., & Chen, B. H. (2005). Stability of carotenoids in tomato juice during storage. *Food Chem*, *90*(4), 837-846. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.05.031>
- Márquez, A. J. (2003). Resultados preliminares en la caracterización de mezclas de aceite de oliva por calorimetría diferencial de barrido-Preliminary results on the characterization of mixtures of olive oil by differential scanning calorimetry-Resultados preliminares na caracterización de mixturas de aceite de oliva por calorimetría diferencial de barrido. *CYTA-Journal of Food*, *4*(1), 47-54.
- Martínez-Sánchez, J., Fernández-González, I., Espinosa-Paz, N., Morales de la Cruz, F. d. R., Martínez-Valencia, B. B., & Hernández-Cruz, M. d. C. (2013). *Características físicas y químicas del aceite de cacahuate de diferentes variedades cultivadas en Chiapas* (Vol. 16). Chiapas, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).
- Martínez, H. V. (2007). Metalurgia semisólida de aleaciones y composites metálicos procesados por agitación mecánica. *Revista latinoamericana de metalurgia y materiales*, *27*(1), 13-27.
- Masson Salaué, L., & Mella Rojas, M. A. (1985). Materias grasas de consumo habitual y potencial en Chile: Composición en ácidos grasos.
- Medina, G. (2010). Aceites y grasas comestibles. *Universidad de Antioquía*. INTERNET: http://aprendeonline.udea.edu.co/lms/moodle/file.php/424/Gilma_Medina/Grasasyaceites/Documento_Grasas_y_aceites.pdf (Recuperado: 2 de julio, 2018).

- Medina Saavedra, T., Arroyo Figueroa, G., & Dzul Cauih, J. G. (2017). Origin and evolution of tomato production *Lycopersicon esculentum* in México. *Ciencia Rural*, 47(3), 2-8. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20160526>
- Meléndez-Martínez, A. J., Vicario-Romero, I., & Heredia-Mira, F. J. (2007). Pigmentos carotenoides: consideraciones estructurales y fisicoquímicas. *Sociedad Latinoamericana de Nutrición*, 57(2), 109-117.
- Moritz, B., & Cardoso Tramonte, V. L. (2006). Bioavailability of lycopene. *Revista de Nutrição*, 19, 265-273.
- Movasaghi, Z., Rehman, S., & ur Rehman, D. I. (2008). Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy of Biological Tissues. *Applied Spectroscopy Reviews*, 43(2), 134-179. doi: 10.1080/05704920701829043
- Navas, P. B. (2009). Composición química del aceite virgen obtenido por extracción mecánica de algunas variedades de uva (*Vitis vinifera* L.) con énfasis en los componentes minoritarios. *Archivos latinoamericanos de Nutrición*, 59(2), 214-219.
- Novelina, Nazir, N., & Adrian, M. R. (2016). The Improvement Lycopene Availability and Antioxidant Activities of Tomato (*Lycopersicum Esculentum*, Mill) Jelly Drink. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 9, 328-334. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.02.144>
- Nyuk, C. M., & Mohamad Isa, M. I. N. (2013). The Oleic Acid Composition Effect on the Carboxymethyl Cellulose Based Biopolymer Electrolyte. *Journal of Crystallization Process and Technology*, 03, 1-4. doi: 10.4236/jcpt.2013.31001
- Olivares-Corichi, I. M., Guzmán-Grenfell, A. M., Vargas, M. P. S., Atencio, R. d. S. M., & Gómez, J. J. H. (2005). Perspectives in the use of antioxidants for the treatment of asthma. *Revista del Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias*, 18(2), 154-161.
- Ordóñez, A. L., Balanza, M. E., Martín, F. R., & Flores, C. A. (2009). Estabilidad del Carotenoide Licopeno en Tomates en Conserva. *Información tecnológica*, 20, 31-37.
- Padrón Pereira, C. A., León, P., Marié, G., Montes Hernández, A. I., & Oropeza González, R. A. (2012). Determinación del color en epicarpio de tomates (*Lycopersicum esculentum* Mill.) con sistema de visión computarizada durante la maduración. *Agronomía Costarricense*, 36(1), 97-111.
- Paniwnyk, L. (2017). Applications of ultrasound in processing of liquid foods: A review. *Ultrason Sonochem*, 38, 794-806. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.12.025>
- Papaioannou, E. H., & Karabelas, A. J. (2012). Lycopene recovery from tomato peel under mild conditions assisted by enzymatic pre-treatment and non-ionic surfactants. *Acta Biochim Pol*, 59(1), 71-74.

- Peralta, I. E., Knapp, S., & Spooner, D. M. (2005). New species of wild tomatoes (*Solanum* section *Lycopersicon*: Solanaceae) from Northern Peru. *Systematic Botany*, 30(2), 424-434. doi: 10.1600/0363644054223657
- Pérez Trueba, G. (2003). Los flavonoides: antioxidantes o prooxidantes. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 22(1), 0-0.
- Periago, M. J., Martínez-Valverde, I., Ros, G., Martínez, C., & López, G. (2001). Propiedades químicas, biológicas y valor nutritivo del licopeno. *Anales de veterinaria de Murcia*, 17, 51-66.
- Perretti, G., Troilo, A., Bravi, E., Marconi, O., Galgano, F., & Fantozzi, P. (2013). Production of a lycopene-enriched fraction from tomato pomace using supercritical carbon dioxide. *The Journal of Supercritical Fluids*, 82, 177-182. doi: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2013.07.011>
- Perveen, R., Suleria, H. A. R., Anjum, F. M., Butt, M. S., Pasha, I., & Ahmad, S. (2015). Tomato (*Solanum lycopersicum*) Carotenoids and Lycopenes Chemistry; Metabolism, Absorption, Nutrition, and Allied Health Claims—A Comprehensive Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(7), 919-929. doi: 10.1080/10408398.2012.657809
- Phinney, D. M., Frelka, J. C., Cooperstone, J. L., Schwartz, S. J., & Heldman, D. R. (2017). Effect of solvent addition sequence on lycopene extraction efficiency from membrane neutralized caustic peeled tomato waste. *Food Chem*, 215, 354-361. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.07.178
- Piné, R. Q., & Corona, J. J. D. (2009). Técnicas de análisis del aceite de oliva. *El Aceite de Oliva Virgen: Tesoro de Andalucía. Servicio de Publicaciones de la Fundación Unicaja. Málaga, España*, 247-286.
- Pingret, D., Fabiano-Tixier, A.-S., Bourvellec, C. L., Renard, C. M. G. C., & Chemat, F. (2012). Lab and pilot-scale ultrasound-assisted water extraction of polyphenols from apple pomace. *Journal of Food Engineering*, 111(1), 73-81. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.01.026>
- Poojary, M. M., & Passamonti, P. (2015). Extraction of lycopene from tomato processing waste: Kinetics and modelling. *Food Chem*, 173, 943-950. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.127>
- Puertollano, M. A., Puertollano, E., Álvarez de Cienfuegos, G., & Pablo, M. A. d. (2010). Aceite de oliva, sistema inmune e infección. *Nutrición Hospitalaria*, 25, 1-8.
- Rahimi, S., & Mikani, M. (2019). Lycopene green ultrasound-assisted extraction using edible oil accompany with response surface methodology (RSM) optimization performance: Application in tomato processing wastes. *Microchemical Journal*, 146, 1033-1042. doi: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.02.039>

- Rawson, A., Tiwari, B. K., Patras, A., Brunton, N., Brennan, C., Cullen, P. J., & O'Donnell, C. (2011). Effect of thermosonication on bioactive compounds in watermelon juice. *Food Research International*, 44(5), 1168-1173. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.07.005>
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26(9), 1231-1237. doi: [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Rendón-Marín, S. (2016). *Actividad antioxidante in vivo de licopeno del tomate, papaya y guayaba rosada para la prevención del cáncer colorrectal*. (Especialidad), Corporación Universitaria Lasallista, Antioquia, Colombia.
- Richelle, M., Lambelet, P., Rytz, A., Tavazzi, I., Mermoud, A.-F., Juhel, C., . . . Bortlik, K. (2011). La proporción de isómeros de licopeno presente en el plasma humano está modulada por el perfil de isómeros de licopeno existente en la comida pero no por el preparado de licopeno. *British Journal of nutrition*, 1-9.
- Ríos- Osorio, O., Cávez-Servia, J. L., & Carrillo-Rodríguez, J. C. (2014). Producción tradicional y diversidad de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) Nativo: un estudio de caso en Tehuantepec-Juchitán, México. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 11.
- Robles-Ozuna, L., & Ochoa-Martínez, L. (2012). Ultrasonido y sus aplicaciones en el procesamiento de alimentos *Revista iberoamericana de tecnología postcosecha*, 13(2), 109-122.
- Roca, M., Gallardo-Guerrero, L., & Gandul-Rojas, B. (2017). Metabolismo de carotenoides en el fruto del olivo y sus modificaciones en el procesado industrial. In A. J. Melendez-Martínez (Ed.), *Carotenoides en agroalimentación y salud*. España: Programa Iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo.
- Rodríguez-Cruz, M., Tovar, A. R., del Prado, M., & Torres, N. (2005). Mecanismos moleculares de acción de los ácidos grasos poliinsaturados y sus beneficios en la salud. *Revista de investigación clínica*, 57(3), 457-472.
- Rodriguez Riera, Z., Robaina Mesa, M., & Jauregui Haza, U. (2014). Use of ultrasound radiation for extraction of bioactive compounds from natural sources Current events and perspectives. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 45(specialissue), 139-147.
- Roldán-Gutiérrez, J. M., & Dolores Luque de Castro, M. (2007). Lycopene: The need for better methods for characterization and determination. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 26(2), 163-170. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2006.11.013>
- Sabio, E., Lozano, M., Montero de Espinosa, V., Mendes, R. L., Pereira, A. P., Palavra, A. F., & Coelho, J. A. (2003). Lycopene and β -Carotene Extraction from Tomato Processing Waste Using Supercritical CO₂. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42(25), 6641-6646. doi: 10.1021/ie0301233

- San Martín-Hernández, C., Ordaz-Chaparro, V. M., Sánchez-García, P., Beryl Colinas-Leon, M. T., & Borges-Gómez, L. (2012). Calidad de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) producido en hidroponia con diferentes granulometrías de tezontle. *Agrociencia*, *46*, 243-254.
- Sánchez-Rodríguez, E., & Mesa, M. D. (2018). Compuestos bioactivos del aceite de oliva virgen. *Nutrición Clínica*, *12*(2-2018), 80-94.
- Sañudo-Torres, R. R. (2013). *El cultivo de tomate (lycopersicon esculentum Mill.) y el potencial endofítico de diferentes aislados de Beauveria bassiana*. (Maestría en Ciencias en Desarrollo Sustentable de Recursos Naturales), Universidad Autónoma Indígena de México, Los Mochis, Sinaloa. México.
- Sayago, A., Marín, M., Aparicio, R., & Morales, M. (2007). Vitamin E and vegetable oils. *Grasas y Aceites*, *58*(1), 74-86.
- Schwab, M. (2008). *Encyclopedia of Cancer* (2nd ed. Vol. 1). New York, USA: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Sebei, K., Gnouma, A., Herchi, W., Sakouhi, F., & Boukhchina, S. (2013). Lipids, proteins, phenolic composition, antioxidant and antibacterial activities of seeds of peanuts (*Arachis hypogaea* l) cultivated in Tunisia. *Biological research*, *46*(3), 257-263.
- Serrano, M. E. D., López, M. L., & Espuñes, T. d. R. S. (2006). Componentes bioactivos de alimentos funcionales de origen vegetal. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, *37*(4), 58-68.
- Shalaby, A. M., & El Shaer, D. F. (2019). Lycopene protects against renal cortical damage induced by nandrolone decanoate in adult male rats. *Annals of Anatomy - Anatomischer Anzeiger*, *224*, 142-152. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2019.05.003>
- Shi, J., & Maguer, M. L. (2000). Lycopene in Tomatoes: Chemical and Physical Properties Affected by Food Processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *40*(1), 1-42. doi: 10.1080/10408690091189275
- Stice, C. P., Xia, H., & Wang, X.-D. (2018). Tomato lycopene prevention of alcoholic fatty liver disease and hepatocellular carcinoma development. *Chronic Diseases and Translational Medicine*, *4*(4), 211-224. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cdtm.2018.11.001>
- Sutkar, V. S., & Gogate, P. R. (2009). Design aspects of sonochemical reactors: Techniques for understanding cavitation activity distribution and effect of operating parameters. *Chemical Engineering Journal*, *155*(1), 26-36. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.07.021>
- Varas Condori, M. A. (2019). *Efecto antioxidante del extracto de Licopeno de tomate (Solanum lycopersicum) sobre la vida útil del aceite de linaza (Linum usitatissimum*

- L.). (Licenciatura), Universidad Nacional Agraria La Molina. Facultad de Industrias Alimentarias, Lima, Perú.
- Vasapollo, G., Longo, L., Rescio, L., & Ciurlia, L. (2004). Innovative supercritical CO₂ extraction of lycopene from tomato in the presence of vegetable oil as co-solvent. *The Journal of Supercritical Fluids*, 29(1), 87-96. doi: [https://doi.org/10.1016/S0896-8446\(03\)00039-1](https://doi.org/10.1016/S0896-8446(03)00039-1)
- Vergani, R. J. (2002). Una breve historia del tomate. *Horticultura: Revista de industria, distribución y socioeconomía hortícola: frutas, hortalizas, flores, plantas, árboles ornamentales y viveros*(158), 18-27.
- Waliszewki, K. N., & Blasco, G. (2010). Propiedades Nutracéuticas del licopeno. *Salud publica de México*, 52(3), 254-265.
- Xie, B.-x., Wei, J.-j., Zhang, Y.-t., Song, S.-w., Su, W., Sun, G.-w., . . . Liu, H.-c. (2019). Supplemental blue and red light promote lycopene synthesis in tomato fruits. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(3), 590-598. doi: [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62062-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62062-3)
- Xu, Y., & Pan, S. (2013). Effects of various factors of ultrasonic treatment on the extraction yield of all-trans-lycopene from red grapefruit (*Citrus paradise* Macf.). *Ultrason Sonochem*, 20(4), 1026-1032. doi: 10.1016/j.ultsonch.2013.01.006
- Yi, C., Shi, J., Xue, S. J., Jiang, Y., & Li, D. (2009). Effects of supercritical fluid extraction parameters on lycopene yield and antioxidant activity. *Food Chem*, 113(4), 1088-1094. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.08.083>
- Yin, Y., Zheng, Z., & Jiang, Z. (2019). Effects of lycopene on metabolism of glycolipid in type 2 diabetic rats. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 109, 2070-2077. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2018.07.100>
- Zardini, A. A., Mohebbi, M., Farhoosh, R., & Bolurian, S. (2018). Production and characterization of nanostructured lipid carriers and solid lipid nanoparticles containing lycopene for food fortification. *Journal of food science and technology*, 55(1), 287-298.
- Zuorro, A., Fidaleo, M., & Lavecchia, R. (2011). Enzyme-assisted extraction of lycopene from tomato processing waste. *Enzyme and Microbial Technology*, 49(6), 567-573. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2011.04.020>

10 ANEXOS

AMIDIQ

Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química A.C.



21 de febrero de 2020

Estimado(a) **GABRIEL AGUIRRE ÁLVAREZ**

Agradecemos sinceramente el interés por participar en el XLI Encuentro Nacional de la Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química A.C. (AMIDIQ) y por este conducto nos complace informarle que su trabajo:

365. EXTRACCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LICOPENO MEDIANTE ULTRASONIDO DE ALTA INTENSIDAD Y TECNOLOGÍA VERDE, A PARTIR DE DESECHOS DE TOMATE (SOLANUM LYCOPERSICUM).

Cuyos autores son:

Gieraldin Campos Lozada, Alma Delia Hernández Fuentes, Rafael G Campos Montiel, Rubén Jiménez Alvarado, Gabriel Aguirre Álvarez

Ha sido aceptado para su presentación en la sesión de **INGENIERÍA DE ALIMENTOS** en la modalidad **CARTEL**. Para ser acreedor de la constancia de participación de requiere que al menos uno de los **autores esté inscrito**, y que el **trabajo haya sido efectivamente presentado**. Para que el trabajo sea publicado en las memorias del congreso, es necesario cumplir con los criterios anteriores y haber enviado su trabajo en extenso.

A partir del 18 de marzo de 2020 consulte el programa completo en nuestra página web www.amidiq.com para conocer el día y hora precisa de su presentación. Recuerde que tiene hasta el viernes 20 de marzo de 2020 para sustituir el resumen de dos páginas por su trabajo en extenso en la plataforma OpenConf.

A nombre de la AMIDIQ le agradecemos su participación y esperamos tener la oportunidad de saludarlo personalmente en Ixtapa Zihuatanejo, Gro.

Atentamente
COMITÉ TÉCNICO AMIDIQ 2020