

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



“Diseño de un proceso de extracción de aceite esencial de cáscara de naranja y hoja de eucalipto residual en Aspen Plus®”

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRIA EN
INGENIERÍA**

PRESENTA

Jesús Manuel Armenta Gálvez

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Marcos Alberto Coronado Ortega

CODIRECTOR DE TESIS

Dr. José Ramón Ayala Bautista

Mexicali, Baja California, Junio de 2021

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca otorgada para la realización de mis estudios de maestría.

Agradezco al Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, por haberme aceptado y abrirme las puertas de su seno científico para la realización del presente trabajo, así como también a los diferentes docentes que me brindaron su conocimiento para mi formación académica. En especial, a mis directores de tesis el Dr. Marcos Alberto Coronado Ortega y el Dr. José Ramón Ayala Bautista, por darme la oportunidad de recurrir de su enorme capacidad y conocimiento, así como la gran paciencia para guiarme durante el desarrollo de la tesis, sustentado en su gran calidad humana. Siempre tuve constante apoyo de su parte lo cual estaré agradecido de por vida. Recalco que sus indicaciones y orientaciones fueron indispensables, siempre con buena actitud y excelente trato humano.

Agradezco especialmente al Dr. Alan Ayala Bautista, por sus enseñanzas las cuales impulsaron mi gusto por la investigación, por la motivación y el apoyo para ingresar al programa de posgrado.

De igual manera, agradezco a los Doctores; Carlos Alfonso Sagaste Bernal, Conrado García González. Porque sus consejos, siempre buenos, se ven reflejados en mi trabajo de tesis.

De mis compañeros agradezco a Iracema Valenzuela Espinoza, Samuel Lepe de Alba, Daniela Montes y Lisandra Quintana por su simpatía y colaboración.

Agradezco a mis padres y hermano, por su comprensión, apoyo y cariño. Sin ellos no hubiera logrado una meta más en mi vida profesional al estar siempre a mi lado.

Finalmente, agradezco a Angélica Guerra por su confianza, amor y apoyo brindado durante esta etapa.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	2
ÍNDICE	3
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
1. Introducción.....	10
1.1 Justificación.....	11
1.2 Planteamiento del problema.....	11
1.3 Objetivo.....	12
1.3.1 Objetivos específicos	12
2. Marco teórico.....	13
2.1 Biomasa.....	13
2.1.1 Aprovechamiento de residuos agroindustriales	15
2.1.2 Quema de residuos agroindustriales	16
2.2 Aceites esenciales recuperados a partir de residuos agroindustriales	18
2.3 Métodos de extracción convencionales de aceites esenciales.....	19
2.3.1 Destilación por arrastre de vapor (DAV).....	19
2.3.2 Extracción con disolventes	20
2.3.3 Hidrodestilación.....	21
2.3.4 Prensado en frío	22
2.4 Métodos de extracción no convencionales de aceites esenciales.....	23
2.4.1 Extracción por fluidos supercríticos (EFS).....	23
2.4.2 Extracción asistida por microondas (EAM).....	24
2.4.3 Extracción asistida por ultrasonidos (EAU)	25

2.5	Morfología de la cáscara de naranja, compuestos representativos y aplicaciones del aceite esencial.....	27
2.6	Morfología de la hoja de eucalipto, compuestos representativos y aplicaciones del aceite esencial.....	31
2.7	Mercado de los aceites esenciales de naranja y hoja de eucalipto	33
2.8	Producción de naranja	34
2.9	Producción de hoja de eucalipto.....	37
2.10	Energías renovables.....	38
2.11	Fuentes renovables e industria solar en México.....	43
2.12	Energía solar y fundamentos de colectores solares térmicos	45
2.13	Utilización de energía solar en la extracción de AE	50
2.14	Software para modelado de procesos	51
3.	Metodología.....	53
4.	Resultados.....	64
5.	Conclusiones.....	79
6.	Recomendaciones	81
7.	Referencias	82
8.	Otros productos académicos.....	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición del aceite esencial de cáscara de naranja en distintas regiones (%m/m). Elaboración propia.	30
Tabla 2. Composición del aceite esencial en la hoja de eucalipto en distintas regiones (%m/m). Elaboración propia.	32
Tabla 3. Componentes utilizados en software ASPEN PLUS® para el proceso de extracción. ...	54
Tabla 4. Composición del material vegetal en las corrientes de entrada en Aspen Plus®. Elaboración propia.	56
Tabla 5. Descripción de la operación de cada equipo con flujos detallados de entrada y salida para extracción de cáscara de naranja. Elaboración propia.	59
Tabla 6. Descripción de la operación de cada equipo con flujos detallados de entrada y salida para extracción de hoja de eucalipto. Elaboración propia.	60
Tabla 7. Parámetros del colector de tubos evacuados.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Una economía circular en el procesamiento de recursos agrícolas. (Fuente: Cerdá, E. (2012). Energía obtenida a partir de biomasa. Cuadernos económicos de ICE, (83).)	14
Figura 2. Principales tecnologías para recuperación de residuos agroindustriales (Yepes et al., 2008). Elaboración propia.	15
Figura 3. Principales problemas de la quema de residuos agrícolas. Elaboración propia.	17
Figura 4. Localización de los aceites esenciales	18
Figura 5. Diagrama del proceso del método destilación por arrastre de vapor. Adaptado de Pornpunyapat, J., et al., 2011.	19
Figura 6. Diagrama del proceso del método de extracción por solvente. Adaptado de Rassem, H. H., et al., 2016.	20
Figura 7. Diagrama de proceso del método de hidrodestilación. Adaptado de Dangkulwanich, M. y Charaslertrangsi, T., 2020.	21
Figura 8. Diagrama del proceso del método de prensado de frío. Adaptado de Boukhatem, M.N., 2020.	22
Figura 9. Diagrama del proceso del método extracción por fluidos supercríticos. Adaptado de Fornari, T., et al., 2012.	24
Figura 10. Representación gráfica de extracción por microondas a escala laboratorio. Adaptado de Filly et al., 2014.	25
Figura 11. Representación gráfica de extracción asistida por ultrasonido. Adaptado de Ibáñez, et al., 2012.	26
Figura 12. Anatomía de la cáscara de naranja. Morfología de frutos cítricos. Corte transversal del fruto (A) y representación esquemática de un segmento, incluidos los tejidos de la piel (B). Adaptado de Nakamura, et al., 2017.	27
Figura 13. Composición mayoritaria de la cáscara de cítricos.	28
Figura 14. Estructura química del limoneno.	28
Figura 15. A) Hoja de Eucalipto B) microscopia electrónica de barrido (MEB) de la hoja de eucalipto antes del método de extracción C) MEB de HE después del método de extracción D) sección transversal de la hoja antes de procesar E) sección transversal de la hoja después de procesar. Recuperado de García, C et. al., 2017.	31

Figura 16. Estructura química de los compuestos del aceite esencial de eucalipto. 1,8-cineol (1), p-cimeno (2), α -pineno (3), terpinen-4-ol (4), aromadendreno (5) y α -terpineol (6)	31
Figura 17. Cantidad de toneladas y miles de USD importados a México de aceites esenciales a partir de cáscara de naranja en el periodo 2014-2018. Elaboración propia con datos del SIAP y SIAVI. (Línea verde:USD, Barra naranja:Toneladas).....	33
Figura 18 . Importaciones en toneladas de AEE en el periodo 2000-2014 (Barras verde), Precio de las importaciones de AEE en el periodo 2003-2014 (Línea negra). Elaboración propia con datos del SIAP y SIAVI.....	34
Figura 19. Producción de naranja el contexto Internacional/Nacional. Elaboración propia con datos del SIAP y SIAVI.....	35
Figura 20. Producción por entidad federativa en México en el año 2019. Elaboración propia con datos del SIAP y SIAVI.....	36
Figura 21. Producción en toneladas de Naranja a Nivel Baja California. Elaboración propia con datos del SIAP y SIAVI.....	37
Figura 22. Participación de los distintos combustibles en la oferta mundial de energía primaria. Fuente International Energy Agency Statistics.....	41
Figura 23. Tendencia histórica sobre número de patentes registradas en el área de energías renovables. Fuente: División de Economía y Estadística de la OMPI. Elaboración propia.....	42
Figura 24. Tendencia histórica sobre número de patentes registrada en tecnologías solares. Fuente: División de Economía y Estadística de la OMPI. Elaboración propia	42
Figura 25. Principales países con patentes registradas en tecnologías solares. Fuente: División de Economía y Estadística de la OMPI. Elaboración propia.....	43
Figura 26. Crecimiento en la producción de energía a partir de las fuentes solar y eólica en México. Fuente: Sistema de Información Energética, SENER. Elaboración propia.....	44
Figura 27. Distribución de la energía solar en el mundo, kWh/m ² /año. (Kannan, N. y Vakeesan, D., 2016).	45
Figura 28. Un colector típico de placa plana para líquidos. Recuperado de Roonprasang, N., et al., 2008.....	46
Figura 29. Colector parabólico de seguimiento de un eje orientado este-oeste y colector parabólico de seguimiento de un orientado de este a oeste.	47
Figura 30. Diagrama esquemático de un colector de tubo de vacío con tubo de calor.....	48

Figura 31. Colector solar de tubos evacuados CPC.....	49
Figura 32. Diagrama esquemático de un sistema de destilación solar.1-Reflector primario 2- Panel fotovoltaico 3-Soporte de reflector solar 4-Receptor de vapor 5- Cuerpo de destilación 6- Material vegetal 7- Controlador de temperatura 8- Condensador 9- Aceite esencial.....	50
Figura 33. Algoritmo secuencial para elegir el método de propiedades. Obtenido de Al-Malah, K. I., 2016. Aspen plus ^(R) . Wiley.	55
Figura 34. Diagrama del proceso para la extracción de aceites esenciales delimitado por etapa en ASPEN PLUS [®]	57
Figura 35. Diagrama esquemático de un sistema solar para calentamiento de agua con tanque de almacenamiento.	61
Figura 36. Radiación solar en la ciudad de Mexicali Baja California. Obtenido en software TRNSYS [®]	62
Figura 37. Diagrama esquemático del calentamiento térmico del agua para el proceso de extracción de aceites esenciales en un colector de tubo evacuado. TRNSYS [®]	62
Figura 38. Efecto de la proporción de agua a hojas de eucalipto sobre la cantidad de aceite esencial de naranja obtenido.	64
Figura 39. Efecto del agua utilizada en el proceso de arrastre de vapor.....	65
Figura 40. Comportamiento de la concentración de 1,8 cineol y ácido láurico presente en el AEE obtenido en función de la cantidad agregada al proceso como solvente. Línea roja (presencia de ácido láurico).	65
Figura 41. Gráfico de superficie-respuesta para el proceso de extracción de AEN. Elaborado en MATLAB.....	67
Figura 42. Gráfico de superficie-respuesta para el proceso de extracción de AEE. Elaborado en MATLAB.....	68
Figura 43. Perfil del índice energético total (IET) en el proceso de extracción de AEN.	69
Figura 44. Perfil del índice energético total (IET) en el proceso de extracción de AEE.....	69
Figura 45. Perfil de la temperatura en función del flujo de enfriamiento del condensador (HEATEXCH) del proceso de AEN.	70
Figura 46. Gasto energético del equipo enfriador (ENFRIADO) en función de la temperatura del agua de entrada para la extracción de AEE.	71
Figura 47. Gráfico de superficie respuesta para la columna de destilación de limoneno.	72

Figura 48. Perfil de temperatura en la columna de destilación y concentración de limoneno por etapa. Temperatura (Línea roja), Concentración de limoneno (Línea amarilla).....	72
Figura 49. Gráfico de superficie respuesta en la columna de destilación de 1,8 cineol.	73
Figura 50. Perfil de temperatura en la columna de destilación y concentración de 1,8 cineol por etapa. Temperatura (Línea roja), Concentración de 1,8 cineol (Línea Verde).	74
Figura 51. Diagrama esquemático del sistema de colectores solares para apoyo energético de la caldera.	75
Figura 52. Perfil anual de temperatura en la ciudad de Mexicali. Línea Verde- 30 de enero, línea Azul-10 de mayo, línea Amarilla-27 de agosto, línea roja-5 de diciembre	75
Figura 53. Perfil de temperatura del flujo de agua en la salida del colector solar y radiación incidente el día 30 de enero en Mexicali.	76
Figura 54. Perfil de temperatura del flujo de agua en la salida del colector solar y radiación incidente el día 10 de mayo en Mexicali.	77
Figura 55. Perfil de temperatura del flujo de agua en la salida del colector solar y radiación incidente el día 27 de agosto en Mexicali.	77
Figura 56. Perfil de temperatura del flujo de agua en la salida del colector solar y radiación incidente el día 5 de diciembre en Mexicali.	78

1. Introducción

En la ciudad de Mexicali, Baja California se generan residuos de cáscara de naranja y hojas de eucalipto los cuales tienen potencial de valorización debido a sus compuestos de interés como limoneno y 1,8-cineol que conforman aceites esenciales. Los aceites esenciales son sustancias aromáticas encontradas prácticamente en todas las plantas; son muy numerosos y están ampliamente distribuidos en las distintas partes de la planta: raíces, tallos, hojas, flores y frutos. Los aceites esenciales son componentes heterogéneos de terpenos, sesquiterpenos, ácidos, ésteres, fenoles, lactonas (Vázquez et al., 2001).

Se propone dar un uso al aceite esencial producido debido a que tiene diferentes aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética. La aplicabilidad del aceite esencial se ha investigado en la conservación de alimentos, aromatizantes, control de plagas, antimicrobiano para envasado (Mahato et al., 2017; Vincekovic et al., 2017).

El simulador Aspen Plus® se utiliza para el modelo del método de extracción del aceite esencial el cual contempla en el proceso el uso de equipos de destilación, intercambio de calor, intercambio de materia, separación de fases así como refinado. El diseño del proceso por medio de la simulación, se basa en principios termodinámicos, permite disminuir el trabajo experimental y evaluar la posibilidad de llevar el proceso a un escalamiento mayor.

Con los resultados de operación en ASPEN PLUS®, en la etapa de generación de vapor del proceso de extracción de aceite esencial de eucalipto, se simuló en TRNSYS®, un sistema de colectores de tubos evacuados, con los parámetros de entrada acordes a la ciudad de Mexicali. Al combinar ambas herramientas se presenta el diseño de un proceso de extracción de aceite esencial a base de los residuos de naranja y hoja de eucalipto que integra energía solar térmica.

1.1 Justificación

La adecuada utilización de los residuos en una región es de vital importancia debido a que impacta de manera social, económica y ambiental a una determinada población. En el caso del valle de Mexicali, la cáscara residual de naranja y hojas de eucalipto poseen potencial de reutilización. Este material residual agroindustrial se aprovecha de manera parcial en la actualidad. Por ello se propone revalorizar estos remanentes como materia prima para extraer aceite esencial con el fin de obtener limoneno y 1,8-cineol de alta pureza que puedan competir en el mercado de aceites esenciales de México. Contribuyendo a la reducción de importaciones de aceite esencial a nivel nacional, que en el año 2017 se importaron 1,000 toneladas de aceite esencial a partir de cáscara de naranja y 300 toneladas de aceite esencial a partir de hoja de eucalipto (Barbieri, C., & Borsotto, P., 2018).

1.2 Planteamiento del problema

La industria de alimentos produce grandes cantidades de residuos que pueden ser aprovechados. Entre estos residuos se encuentran los provenientes de las frutas, los cuales pueden ser utilizados en alimentación animal y humana, abonos, obtención de biogás, extracción de aceites esenciales, pectinas, flavonoides, entre otros (Yepes S, 2011). Se estima que la quema de biomasa, como madera, hojas, árboles y pastos incluidos los residuos agrícolas, produce 40 % del dióxido de carbono (CO_2), 32 % del monóxido de carbono (CO), 20 % de partículas de materia suspendidas (PM) y 50 % de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) emitidos al ambiente a escala mundial (P.M. Lemieux, C.C. Lutes y D.A. Santoianni, 2010). Por ello se propone el diseño de un proceso de extracción de aceites esenciales a partir de residuos de cáscara de naranja y hojas de eucalipto, integrando tecnología solar térmica con el fin de satisfacer una fracción de la demanda energética del proceso.

1.3 Objetivo

Diseñar un proceso de extracción de aceite esencial a base de los residuos de naranja y hoja de eucalipto, utilizando ASPEN PLUS[®] e integrando energías renovables mediante TRNSYS[®].

1.3.1 Objetivos específicos

- Realizar una investigación del estado del arte con base en la cantidad de residuos generados de materia prima en la región del Valle de Mexicali, Baja California, para su aprovechamiento.
- Efectuar un análisis del comportamiento de las importaciones de aceite esencial de cáscara de naranja y hoja de eucalipto a México.
- Realizar una búsqueda de patentes sobre tecnologías de aprovechamiento de energía solar térmica y sus aplicaciones en procesos de extracción de aceites esenciales.
- Simular el proceso de producción de limoneno y 1,8-cineol con base en los residuos de cáscaras de naranja y hojas de eucalipto de acuerdo con la disponibilidad en la ciudad de Mexicali, Baja California.
- Integrar energía solar térmica para satisfacer una fracción de la demanda energética de la etapa de generación de vapor en el proceso de extracción de aceites esenciales.

2. Marco teórico

2.1 Biomasa

El término biomasa indica la materia orgánica de origen vegetal o animal, esta definición incluye a las sustancias que pudieron haber sido procesadas de forma natural o artificial, producida directa o indirectamente mediante el proceso de fotosíntesis. La definición de biomasa es materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. Son ejemplo de biomasa espontánea materia orgánica de árboles, arbustos, animales, microorganismos, cultivos energéticos y biomasa residual (SENER, 2018). Así, el término biomasa identifica una gran variedad de materiales y matrices heterogéneos. Para limitar el alcance del presente análisis, se consideró solo la biomasa de origen vegetal y específicamente los residuos y desechos agrícolas y agroindustriales, los cultivos energéticos, los residuos y desechos forestales. De hecho, el concepto de energía a partir de biomasa considera la biomasa como un producto energético renovable obtenido como subproducto de un producto primario, por ejemplo, la poda de árboles frutales o la paja como subproducto de la producción de cereales. La disponibilidad mundial potencial de biomasa sin explotar por sí sola podría proporcionar entre el 10 % y el 20 % de la demanda de energía primaria del planeta (Bonechi, C., Consumi, M., Donati, A., Leone, G., Magnani, A., Tamasi, G., & Rossi, C., 2017).

La biomasa está disponible universalmente y, por lo tanto, es un recurso estratégico en caso de escasez de recursos energéticos tradicionales. Esta energía también puede ayudar a reducir el costo total de energía y la demanda de energía de origen fósil. Otra contribución positiva podría ser la reducción de las emisiones atmosféricas de gases de efecto invernadero, ya que el ciclo completo de producción, procesamiento y uso de este material tienen en teoría un balance de dióxido de carbono nulo. Los residuos contienen a menudo sustancias bioactivas como antioxidantes, flavonoides, ligninas y carotenoides que pueden extraerse. Esta posibilidad dependerá de la economía, sostenibilidad ambiental de la depuración y reutilización de estos recursos.

La producción de energía a partir de biomasa es compleja, por lo que la producción agrícola debe ser considerada como parte de un proceso basado en principios de sustentabilidad global: medioambiental, económica y social. Esto significa que para todo tipo de producción agrícola, se considera no solo el producto primario (generalmente alimento) sino también el residuo, que si se procesan correctamente puede dar lugar a productos con actividad biológica útiles en las industrias

alimentaria, farmacéutica y cosmética. Al final de estos procesos, la parte estructural fibrosa del material vegetal se puede recuperar y utilizar para la producción de energía. Las prácticas típicas de las líneas de producción son reemplazadas por un sistema interconectado. La tierra donde se plantan diferentes cultivos se considera como un sistema que proporciona distintos tipos de residuos agrícolas y de la industria alimentaria. El procesamiento debe ocurrir en una planta (biorrefinería) que combina diferentes tecnologías para maximizar la recuperación de componentes con alto contenido biológico y químico.

La Agencia Internacional de energía (IEA, por sus siglas en inglés) define el concepto de biorrefinería como “El procesamiento sustentable de la biomasa en un espectro de productos comercializables (alimentos, materiales, químicos) y energía (combustibles, electricidad, calor)” (Budzianowski, W. M., 2017). El ciclo de procesamiento de recursos agrícolas queda descrito en la Figura 1.

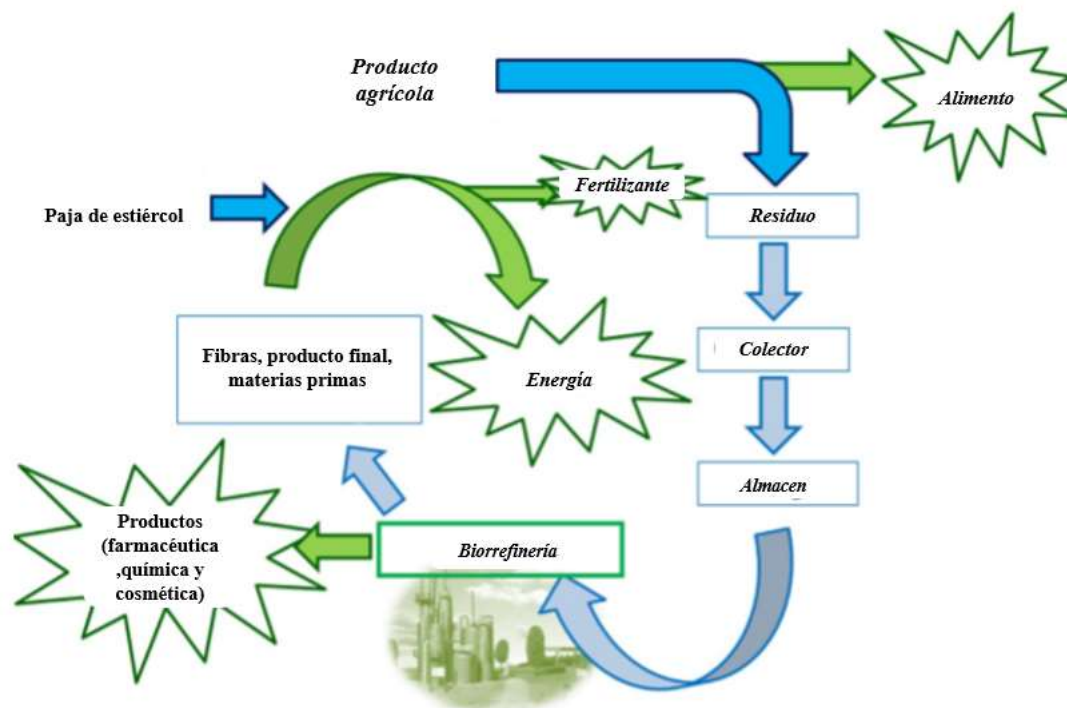


Figura 1. Una economía circular en el procesamiento de recursos agrícolas. (Fuente: Cerdá, E. (2012). Energía obtenida a partir de biomasa. Cuadernos económicos de ICE, (83).

2.1.1 Aprovechamiento de residuos agroindustriales

Existen diferentes definiciones de agroindustria. Sin embargo, una de las más acertadas es la expuesta por Saval (2012), quien la define como una actividad económica que combina el proceso productivo agrícola con el industrial para obtener alimentos o materias primas semielaboradas destinadas al mercado. Es considerado residuo todo aquel remanente de las actividades agrícolas, industriales, ganaderas, forestales y en general de cualquier tipo que se desarrollen para satisfacer las necesidades humanas. Los residuos agroindustriales se han convertido en las últimas décadas en motivo de diversos estudios, debido a que gran parte de sus componentes pueden ser utilizados como materia prima para la generación de productos con valor agregado. Actualmente se prevé que continúe esta tendencia a futuro desde el punto de vista de la generación de bioenergéticos y la prioridad para reducir el impacto ambiental que ocasionan dichos residuos. La industria de alimentos produce grandes cantidades de residuos que pueden ser aprovechados de diversas formas. El aprovechamiento de los residuos agroindustriales permite dar solución a diferentes problemáticas ambientales, originadas tanto por la generación y disposición de estos residuos como por otros factores producto del desarrollo de otros sectores productivos. En la Figura 2 se observa las distintas finalidades que podría tener la recuperación de los residuos agroindustriales.



Figura 2. Principales tecnologías para recuperación de residuos agroindustriales (Yepes et al., 2008). Elaboración propia.

Corredor, Y. A. V., & Pérez, L. I. P. (2018) resalta que el aprovechamiento de residuos es una alternativa que impulsa el desarrollo de tecnologías orientadas hacia una transformación sustentable de los recursos naturales. Por consiguiente, el aprovechamiento de residuos agroindustriales se plantea como una estrategia base para su manejo, con diversidad de alternativas gracias a la composición tan variada que presentan esos residuos o subproductos.

En México se generan anualmente cerca de 76 millones de toneladas de residuos orgánicos de frutas (limón, peras, manzanas, papaya, piña, plátano, naranja) y vegetales (maíz, caña de azúcar, frijol, col, zanahoria, tomate, lechuga, papa) (Valdez, I., & Reyes, J. C., 2017).

2.1.2 Quema de residuos agroindustriales

En muchos países, quemar residuos agrícolas como tallos, pastos, hojas y cáscaras, entre otros continúa siendo la manera más económica y fácil de disposición. Este tipo de quema a cielo abierto se realiza a fin de eliminar de manera rápida los restos de cosechas anteriores, así como limpiar, podar y despejar la zona de cultivo. También se lleva a cabo con el objetivo de liberar nutrientes para el siguiente ciclo productivo, así como eliminar moscos y otras plagas de los campos de cultivo. Las quemas de residuos agrícolas son muy utilizadas a pesar de que no se trata de un manejo ambientalmente aceptable. Además, desde el punto de vista ambiental, esta práctica resulta preocupante por una serie de razones expuestas en la Figura 3.

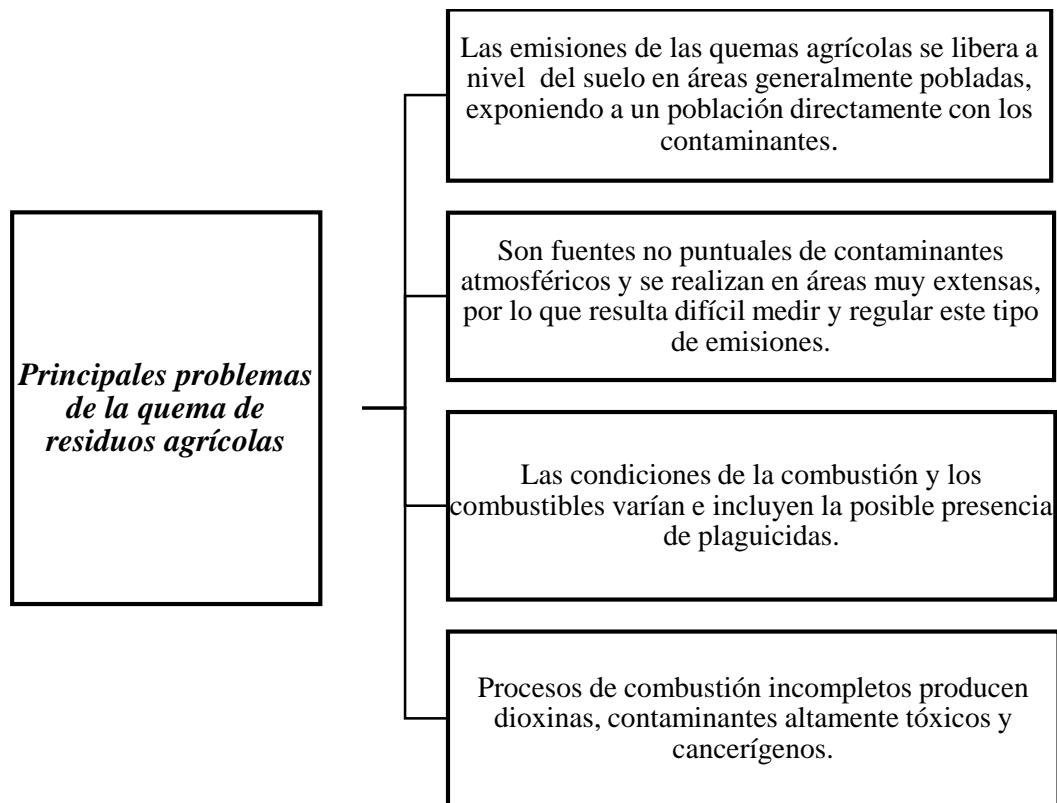


Figura 3. Principales problemas de la quema de residuos agrícolas. Elaboración propia.

La generación de residuos agroindustriales sólidos, líquidos o gaseosos constituye focos de contaminación riesgosos para la salud, si no son dispuestos o procesados apropiadamente. De acuerdo con (Barragán et al., 2008) algunos de estos residuos son quemados o vertidos en rellenos sanitarios, lo que produce una gran liberación de dióxido de carbono (CO_2), contaminación de aguas, molestias por presencia de olores, proliferación de ratas, moscas y otros insectos, entre otros efectos negativos. La generación de estos residuos puede ocurrir durante los procesos relacionados con el cultivo u obtención de materia prima o en las actividades de procesamiento de esta. Si no son reciclados o dispuestos apropiadamente, tales residuos producen diversos impactos ambientales adversos, lo que genera, según Guerrero y Valenzuela (2011), contaminación principalmente en el suelo y agua, tanto en fuentes superficiales como subterráneas. Adicionalmente, en menor proporción se ocasiona contaminación en la atmósfera por las emisiones provenientes de la operación agroindustrial.

2.2 Aceites esenciales recuperados a partir de residuos agroindustriales

Los aceites esenciales son sustancias aromáticas encontradas prácticamente en todas las plantas; son numerosos y están ampliamente distribuidos en las distintas partes de la planta: raíces, tallos, hojas, flores y frutos. Los aceites esenciales son componentes heterogéneos de terpenos, sesquiterpenos, ácidos, ésteres, fenoles, lactonas; separables por métodos químicos o físicos, como la destilación, la refrigeración, centrifugación, entre otros (Ríos, J. L., 2016). Se utilizan en una amplia variedad de bienes de consumo, como detergentes, jabones, cosméticos, productos farmacéuticos, perfumes, productos alimenticios de confitería, refrescos, bebidas alcohólicas destiladas (bebidas duras) e insecticidas. Los aceites esenciales generalmente se derivan de una o más partes de la planta, como las flores (p. Ej. Rosa, jazmín, clavel, clavo, mimosa, romero, lavanda), hojas (p. Ej. menta, Ocimum, limoncillo), hojas y tallos (p. Ej. geranio, pachulí, petitgrain, verbena, canela), corteza (por ejemplo, canela, casia), madera (p. Ej. cedro, sandalia, pino), raíces (p. Ej. angélica, sazafrán, vetiver, saussurea, valeriana), semillas (por ejemplo, hinojo, cilantro, alcaravea, eneldo, nuez moscada), frutas (bergamota, naranja, limón, enebro), rizomas (por ejemplo, jengibre, cálamo, cúrcuma, orris) y oleorresinas (por ejemplo, bálsamo de Perú, Myroxylon balsamum, storax, mirra).



Figura 4. Localización de los aceites esenciales

Se ha reportado que los aceites esenciales presentan actividad antimicrobiana y actúan como agentes antioxidantes. Los métodos de obtención de los aceites esenciales determinan su posible aplicación. El tipo de disolvente puede contaminarlos o limitar su uso, dependiendo de la toxicidad del disolvente y de las técnicas utilizadas para su extracción. De ahí la importancia de investigar métodos nuevos y/o alternativos para la obtención de aceites esenciales (Thongson et al., 2004).

Dependiendo del método de extracción varía la composición del aceite esencial, e incluso variaciones en el número de los componentes (Da Porto et al., 2009).

2.3 Métodos de extracción convencionales de aceites esenciales

2.3.1 Destilación por arrastre de vapor (DAV)

Cuando se utiliza vapor saturado o sobrecalentado, generado fuera del equipo principal, ya sea por una caldera, una olla de presión o un matraz, esta técnica recibe el nombre de destilación por arrastre con vapor tal como se muestra en la Figura 5. Se lleva a cabo la vaporización selectiva del componente volátil de una mezcla formada por este y otros no volátiles. Lo anterior se logra por medio de la inyección de vapor de agua directamente en el seno de la mezcla denominándose este “vapor de arrastre”, pero en realidad su función no es la de arrastrar el componente volátil, sino condensarse formando otra fase inmiscible que cederá su calor latente a la mezcla a destilar para lograr su evaporación.

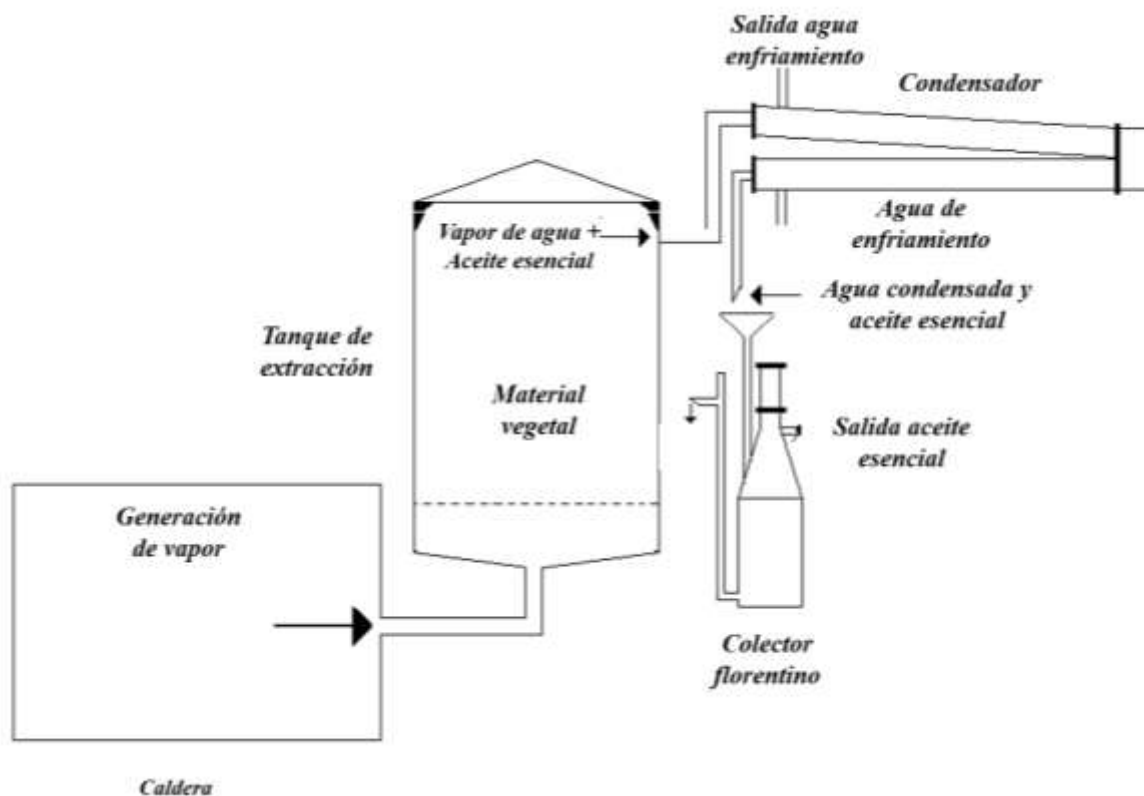


Figura 5. Diagrama del proceso del método destilación por arrastre de vapor. Adaptado de Pornpunyapat, J., et al., 2011.

DAV es un método sencillo y de bajo costo, pero su inconveniente es que requiere largos periodos de tiempo y tiene rendimientos bajos en comparación con otros métodos. (Da Porto et al., 2009).

2.3.2 Extracción con disolventes

La muestra seca y molida se pone en contacto con disolventes orgánicos tales como alcohol y cloroformo, entre otros. Estos disolventes solubilizan y extraen otras sustancias como grasas y ceras, obteniéndose al final una oleorresina o un extracto impuro. El proceso se ilustra en la Figura 6. Se utiliza a escala de laboratorio porque a nivel industrial resulta costoso por el valor comercial de los disolventes, ya que se obtienen esencias contaminadas con otras sustancias, y además por el riesgo de explosión e incendio característico de muchos disolventes orgánicos volátiles. (Martínez, 2003). La extracción de Soxhlet tiene varias desventajas, incluyendo que requiere varias horas o días para realizarse; la muestra se diluye en grandes volúmenes de disolvente, y debido al calentamiento del matraz de destilación, las pérdidas por efecto térmico presentan degradación y volatilización.

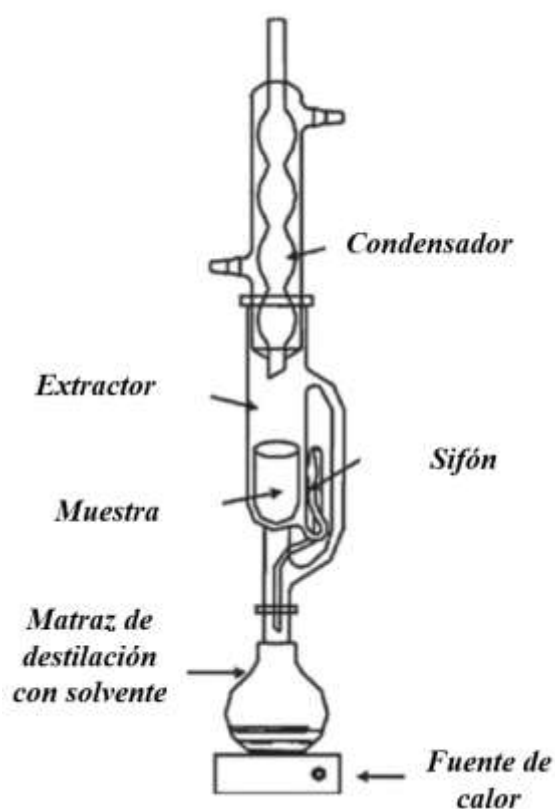


Figura 6. Diagrama del proceso del método de extracción por solvente. Adaptado de Rassem, H. H., et al., 2016.

2.3.3 Hidrodestilación

La extracción de aceite esencial (AE) por hidrodestilación se realiza en las mismas condiciones que la destilación al vapor. La única diferencia es que en este caso el material vegetal se coloca en el matraz que contiene agua y la unidad se lleva a ebullición. La mezcla de vapor de agua y aceite pasa al condensador, como se observa en la Figura 7. El aceite se recupera después por una diferencia de densidades. El principio de extracción se basa en la destilación azeotrópica. De hecho, a presión atmosférica y durante el proceso de extracción (calentamiento), el agua y las moléculas de aceite esencial forman una mezcla heterogénea que alcanza su temperatura de ebullición en un punto cercano a los 100-115°C, este punto se encuentra en función de la escala de procesamiento o la concentración de material vegetal introducido al hidrodestilador, mientras que para los componentes de aceite esencial individuales este punto es muy alto. La mezcla de AE/agua se destila como si fuera un solo compuesto. Esto se conoce como codestilación en presencia de vapores de agua como unidad de disolvente. La ventaja del agua es que es inmisible con la mayoría de las moléculas terpénicas de los AE.

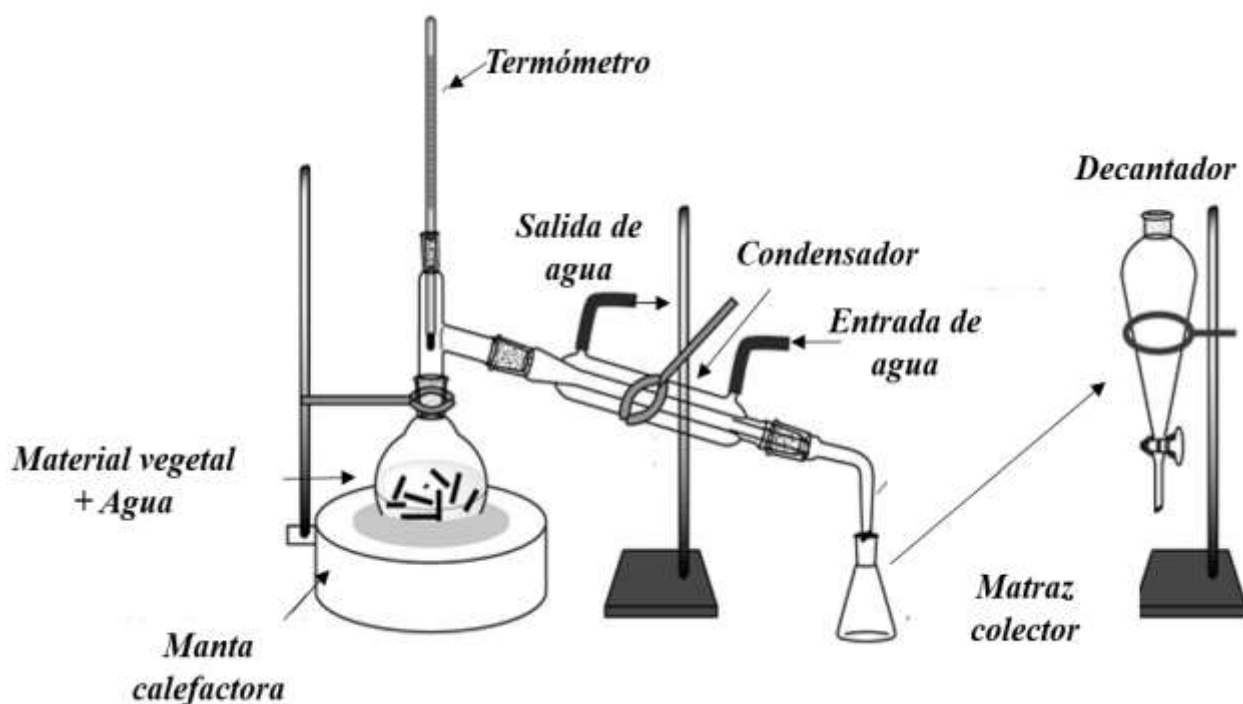


Figura 7. Diagrama de proceso del método de hidrodestilación. Adaptado de Dangkulwanich, M. y Charaslertrangsi, T., 2020.

2.3.4 Prensado en frío

El prensado en frío es el método tradicional para extraer AE de cáscara de cítricos. Durante la extracción, los sacos de aceite se rompen y liberan aceites volátiles que se localizan en la parte externa del mesocarpio (sacos de aceite o glándulas sebáceas). Este aceite se remueve mecánicamente por prensado en frío produciendo una emulsión acuosa. El aceite es recuperado posteriormente por centrifugación (Ferhat et al., 2007). En este caso obtenemos la esencia vegetal de cáscara de cítricos. El proceso se ilustra en la Figura 8.

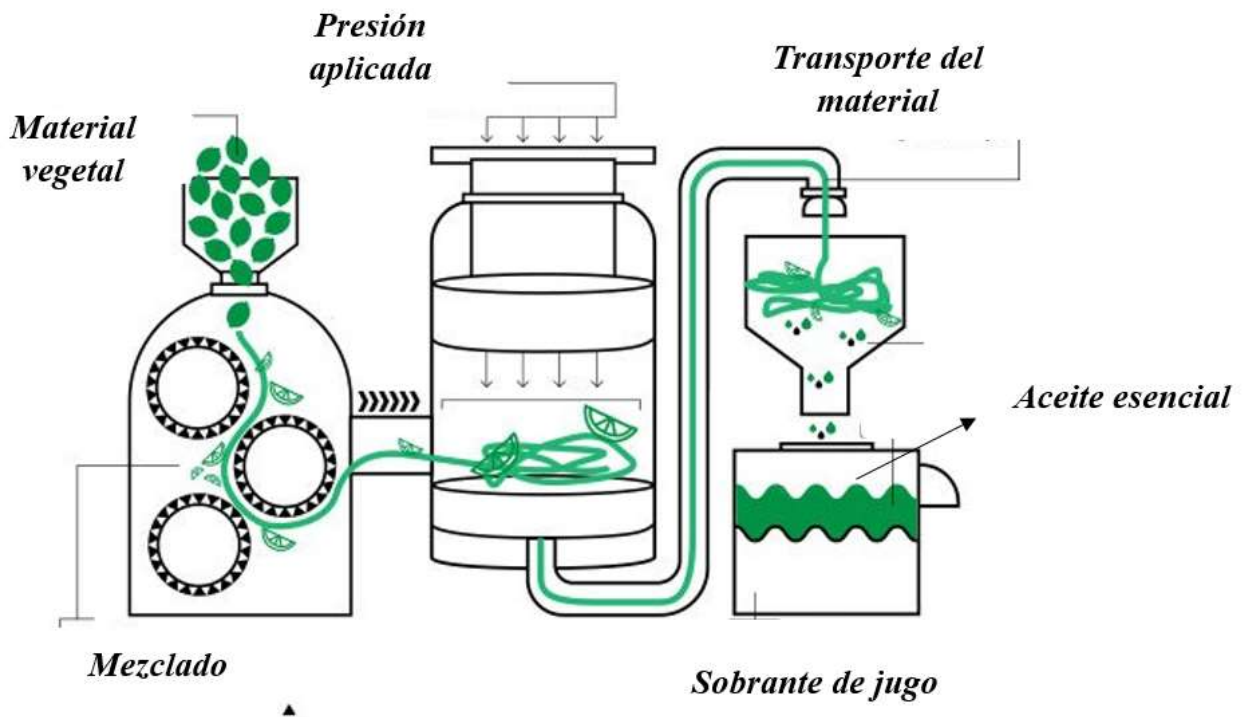


Figura 8. Diagrama del proceso del método de prensado de frío. Adaptado de Boukhatem, M.N., 2020.

2.4 Métodos de extracción no convencionales de aceites esenciales

2.4.1 Extracción por fluidos supercríticos (EFS)

Es una operación unitaria que explota el poder disolvente de fluidos supercríticos en condiciones por arriba de su temperatura y presión críticas. Es posible obtener extractos libre de disolvente y la extracción es más rápida que con disolventes orgánicos convencionales. Estas ventajas son debido a la alta volatilidad de los fluidos supercríticos y a las propiedades de transporte mejoradas (alta difusividad y baja viscosidad). Entre las ventajas de la extracción por fluidos supercríticos se encuentran los tiempos de extracción reducidos, mayores rendimientos, selección de sustancias, composición de extractos y el requerimiento de menor energía (Yamini et al., 2008). El dióxido de carbono es considerado el disolvente ideal en estado supercrítico, ya que no es tóxico ni inflamable, es económico y posee una temperatura crítica (T_c) baja ($T_c = 304 \text{ K}$, $P_c = 7.38 \times 10^6 \text{ Pa}$). El principio se basa en el uso y reciclaje de fluido en repetidos pasos de compresión/depresión. Al comprimir y calentar mucho, el CO_2 alcanza el estado supercrítico y pasa a través del material vegetal. A esto le sigue un paso de depresión: el extracto se dirige a uno o más separadores, donde el CO_2 se descomprime gradualmente (perdiendo así su poder disolvente) para separar el extracto obtenido del fluido. Este último se convierte en un gas liberado y luego se recircula (Asbahani, et al., 2015). El uso de esta técnica para la extracción de AE se ha incrementado en las últimas dos décadas. El único obstáculo para su implementación es el alto costo de los equipos, la instalación y su mantenimiento (Capuzzo, A., Maffei, M. E., & Occhipinti, A., 2013). En la Figura 9 se observa la descripción de este proceso.

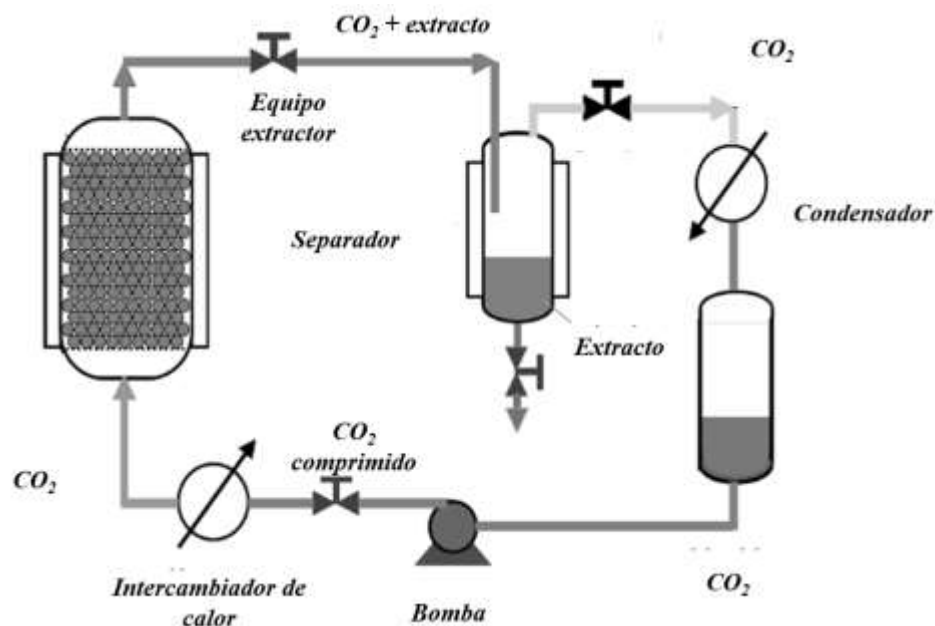


Figura 9. Diagrama del proceso del método extracción por fluidos supercríticos. Adaptado de Fornari, T., et al., 2012.

2.4.2 Extracción asistida por microondas (EAM)

Se combina el calentamiento por microondas y la destilación seca. No se necesita agregar ningún disolvente o agua si se emplea material fresco. Los equipos para llevar a cabo esta técnica se pueden adaptar modificando un horno de microondas convencional, haciendo un orificio en la parte superior que conecte un matraz de fondo plano con un aparato de refrigeración (un condensador conectado a un tubo de separación por gravedad, por el que pasa una corriente de agua fría), sellando la conexión con el horno para evitar la fuga de microondas. (Bayramoglu et al., 2008). El proceso se auxilia de radiación electromagnética no ionizante que tiene una frecuencia de 300 MHz a 300 GHz. La EAM transfiere energía al disolvente calentado, como metanol o una mezcla de metanol/agua para compuestos polares y hexano para compuestos apolares por mecanismos gemelos de rotación dipolo y conducción iónica. La humedad, cuando se calienta dentro de la célula vegetal debido al efecto de las microondas, se evapora y genera alta presión en la pared celular y da como resultado la hinchazón de la célula vegetal (Mandal, V., Mohan, Y. y Hemalatha, S., 2007). Por lo tanto, a diferencia de los métodos convencionales el

calentamiento ocurre de manera simultánea con el solvente. De esta forma, los vapores de disolvente penetran a través de la muestra y se condensan, como se muestra en la Figura 10.

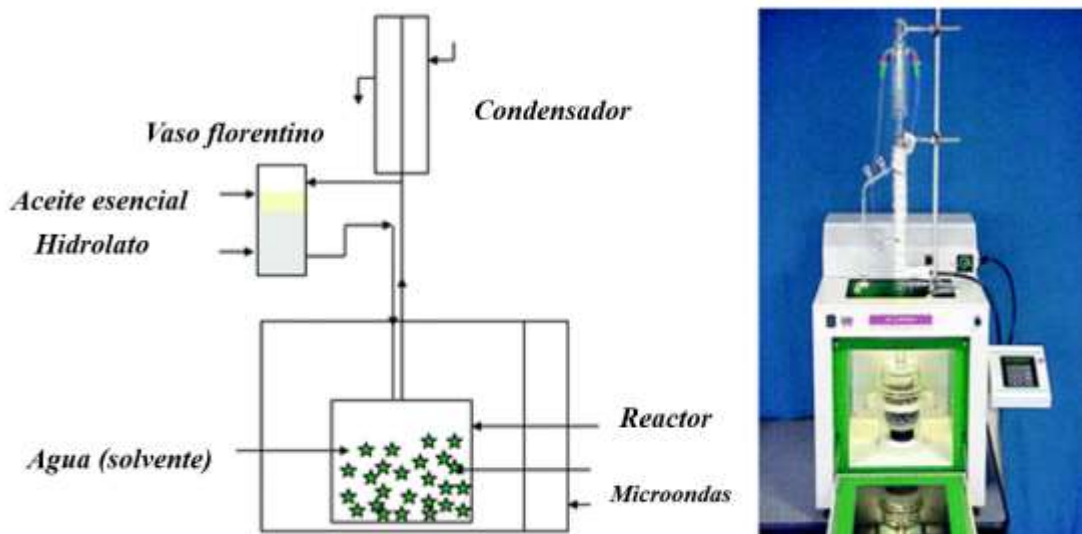


Figura 10. Representación gráfica de extracción por microondas a escala laboratorio. Adaptado de Filly et al., 2014.

2.4.3 Extracción asistida por ultrasonidos (EAU)

El ultrasonido permite la intensificación y selectividad de la extracción de AE al acelerar su liberación del material vegetal cuando se usa en combinación con otras técnicas (hidrodestilación y extracción con solventes). La materia prima vegetal se sumerge en agua o disolvente y al mismo tiempo se somete a la acción de los ultrasonidos. Esta técnica se ha utilizado para la extracción de AE, particularmente de semillas (Karim Assami, 2012, Sereshti et al., 2012). Sin embargo, ha sido desarrollado especialmente para extracciones selectivas de interés terapéutico (Chemat y Lucchesi, 2006). Las ondas ultrasónicas utilizadas tienen una frecuencia de 20 kHz – 1 MHz. Esto induce la vibración mecánica de las paredes y membranas del extracto vegetal, lo que permite una rápida liberación de AE. El mecanismo de extracción involucra dos tipos de fenómenos: difusión a través de las paredes celulares y lavado del contenido celular una vez que se rompen las paredes (Vinatoru, 2001). De hecho, los AE se almacenan en la planta en estructuras internas o externas específicas en forma de glándulas llenas de gotitas de AE. Sus pieles son muy delgadas y pueden

ser fácilmente destruidas por sonicación (en el caso de estructuras externas). Para los internos, el grado de molienda del material vegetal juega un papel importante en el rendimiento. La reducción del tamaño del material vegetal aumentará el número de células expuestas a cavitaciones inducidas por ultrasonidos.

En comparación con los métodos de extracción tradicionales, los EAU mejoran la eficiencia y la velocidad de extracción, reducen la temperatura de extracción y aumentan los rangos de selección de los disolventes (Romanik et al., 2007). Los equipos son relativamente simples y económicos en comparación con otras técnicas como EFS o EAM. Además, los EAU son beneficiosos para los materiales botánicos que son sensibles a la temperatura. Las otras ventajas del ultrasonido son la intensificación de la transferencia de masa, la rotura celular, la mejora de la penetración del solvente y el efecto capilar. El proceso se describe en la Figura 11.

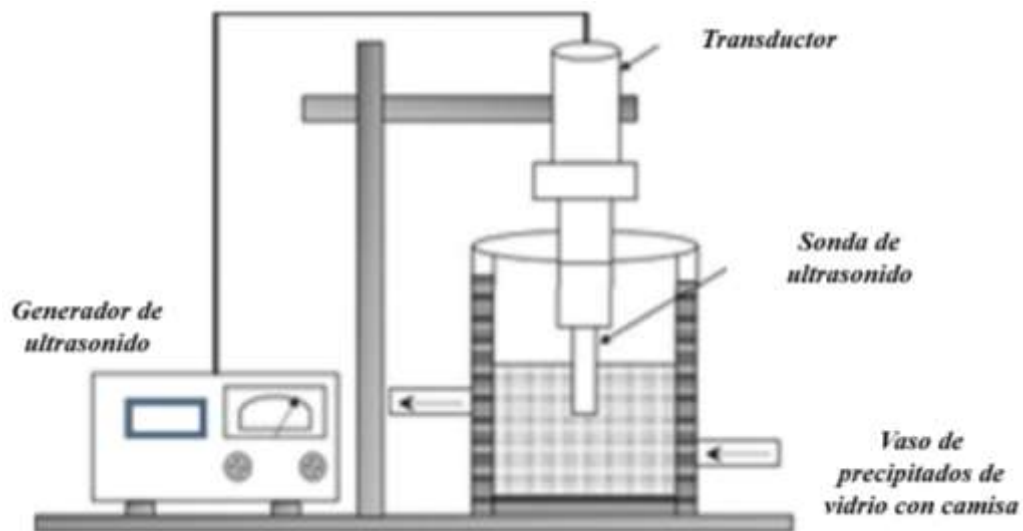


Figura 11. Representación gráfica de extracción asistida por ultrasonido. Adaptado de Ibáñez, et al., 2012.

2.5 Morfología de la cáscara de naranja, compuestos representativos y aplicaciones del aceite esencial

La cáscara de los cítricos es una fuente de melaza, pectina y limoneno. Generalmente se seca, se mezcla con pulpas secas y se vende como alimento para ganado (Hwang et al., 2012). Las cáscaras de los cítricos se subdividen en epicarpio o flavedo (superficie periférica coloreada) y mesocarpio o albedo (capa intermedia blanda blanca) como se muestra en la Figura 12.

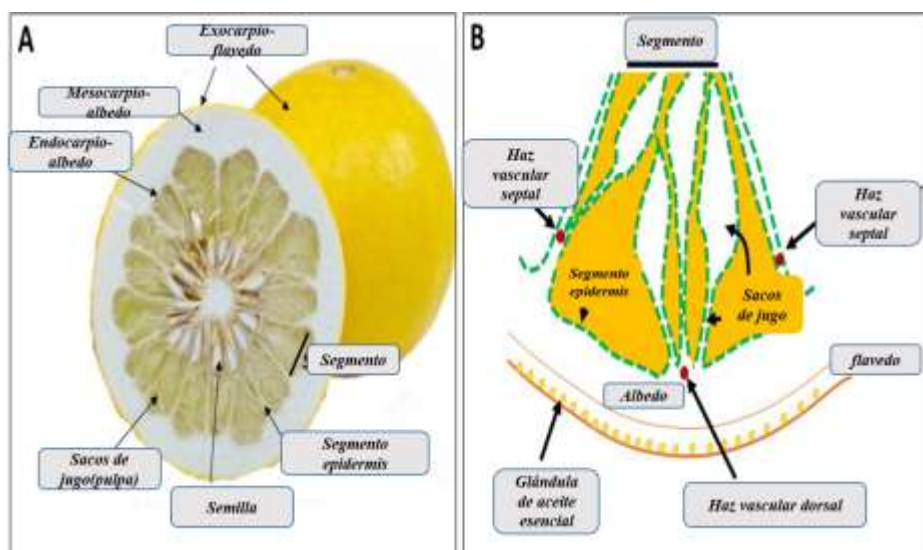


Figura 12. Anatomía de la cáscara de naranja. Morfología de frutos cítricos. Corte transversal del fruto (A) y representación esquemática de un segmento, incluidos los tejidos de la piel (B). Adaptado de Nakamura, et al., 2017.

Varios estudios han reconocido la presencia de polifenoles, vitaminas, minerales, fibras dietéticas, aceites esenciales y contenido de carotenoides presentes en la cáscara. La glucosa, fructosa y sacarosa son los azúcares solubles presentes en la cáscara de los cítricos. La pectina, celulosa y hemicelulosa constituyen los polisacáridos presentes en las paredes celulares de cualquier cáscara de cítricos tal como se muestra en la Figura 13. Las pectinas y hemicelulosa se conforman principalmente de arabinosa, galactosa y ácido galacturónico, y en menor proporción de ramnosa, glucosa y xilosa.

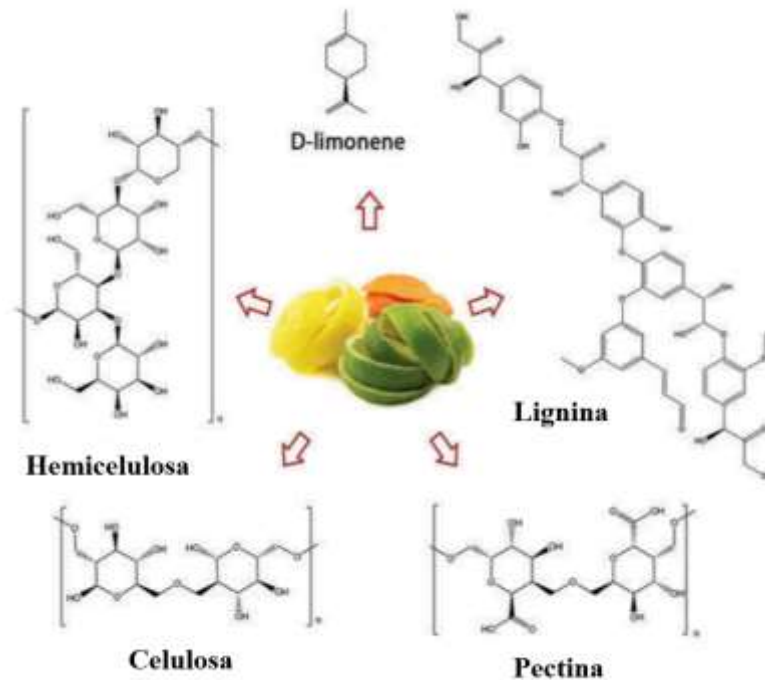


Figura 13. Composición mayoritaria de la cáscara de cítricos.

El limoneno es una sustancia natural que se extrae de los cítricos. Es la sustancia que da el olor característico al limón y naranja. Pertenece al grupo de los terpenos. Se representa en la Figura 14. El limoneno levógiro (-) se extrae de la cáscara de la naranja y le confiere su olor característico mientras que el limoneno dextrógiro (+) es un líquido aceitoso que puede extraerse de la cáscara del limón.

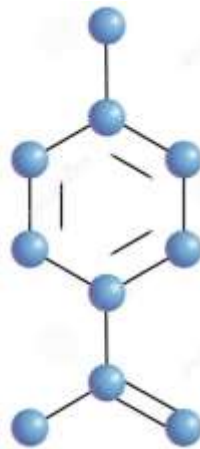


Figura 14. Estructura química del limoneno.

El D-limoneno está generalmente reconocido como seguro debido a la inocuidad y evaluación del producto para el uso propuesto (GRAS, Generally Recognized as Safe) por la Administración de Drogas y Alimentos de los Estados Unidos (FDA, Food and Drug Administration). El aceite esencial de cáscara de naranja puede alcanzar una concentración de hasta 94.88% de limoneno como se observa en la Tabla 1. El limoneno es usado, por ejemplo, en disolvente de resinas, pigmentos, tintas, en la fabricación de adhesivos, etc. También es usado por las industrias farmacéutica y alimentaria como componente aromático y para dar sabor, siendo usado, por ejemplo, en la obtención de sabores artificiales de menta y en la fabricación de dulces y goma de mascar. Recientes estudios parecen apuntar que el limoneno tiene efectos anticancerígenos. Incrementa los niveles de enzimas hepáticas implicadas en la detoxificación de carcinógenos. Estudios en animales demuestran que el limoneno en la dieta reduce el crecimiento tumoral en mamíferos.

La ubicación de los aceites esenciales es diversa en la planta, pueden encontrarse tanto en tallos, raíces, corteza, cáscaras, hojas y tronco. Para el caso del aceite esencial de naranja se encuentra en la cáscara, la cual está cubierta de albedo. En la Tabla 1 se presentan los compuestos más representativos del aceite esencial de naranja. La composición del AE varía en función de la región de recolección de la cáscara de naranja y el método de extracción utilizado. El concentrado de la Tabla 1 consiste en un análisis de diferentes trabajos y obtención de datos de cromatografías de gases acoplado a un espectrofotómetro de masas.

Tabla 1. Composición del aceite esencial de cáscara de naranja en distintas regiones (%m/m). Elaboración propia.

Compuestos	Irán		Nigeria	Turquía	Colombia	España	México
	Hidro destilación	Explosión de vapor	Hidrodestilación asistida por radiación de Microondas (HDMO)	Hidro destilación	Hidrodestilación asistida por radiación de Microondas (HDMO)	Prensado en frío	Hidro destilación
n-Nonane	-	2	-	-	-	-	-
alpha-Pinene	1.17	0.72	0.45	0.9	-	0.3	1.45
Sabinene	1.41	0.55	0.53	0.92	-	0.43	3.26
beta-myrcene	6.08	3.41	1.59	2.63	0.45	0.92	4.27
n-Decane	-	0.4	-	-	-	-	-
n-Octanal	-	0.35	-	-	-	0.27	-
Limonene	77.39	89.13	94.88	92.01	90.93	85.5	74.43
p-Menthon-8-thiol	0.44	0.22	-	-	0.69	-	-
Dodecanal	0.41	0.82	-	-	-	-	-
Sinensal	0.35	0.2	0.01	-	-	-	-
1-octanol	2.18	-	-	-	-	0.05	-
L-Linalool	5.13	-	0.29	-	-	0.47	1.54
Decanal	2.92	-	0.18	0.44	-	0.43	-
Z-citral	0.63	--	-	-	-	-	-
E-citral	0.66	-	-	-	-	-	-
beta-Phellandrene	-	-	0.28	-	-	0.07	-
beta-carene	-	-	0.24	-	-	-	-
citronellal	-	-	0.001	-	-	-	0.87
Terpineol	-	--	0.02	0.08	-	-	-
Nerol	-	-	0.02	-	-	-	-
Neral	-	-	0.01	-	-	-	-
Geranial	-	-	0.06	-	-	-	-

2.6 Morfología de la hoja de eucalipto, compuestos representativos y aplicaciones del aceite esencial

El cultivo del Eucalipto para su explotación industrial tiene como finalidad aprovechar la madera y sus derivados. El aceite esencial de hojas de eucalipto es utilizado como medicina natural en los tratamientos terapéuticos contra enfermedades respiratorias y productos de aseo personal (Obregón S., Restrepo N., 2016). La representación de la hoja de Eucalipto queda descrito en la Figura 15.

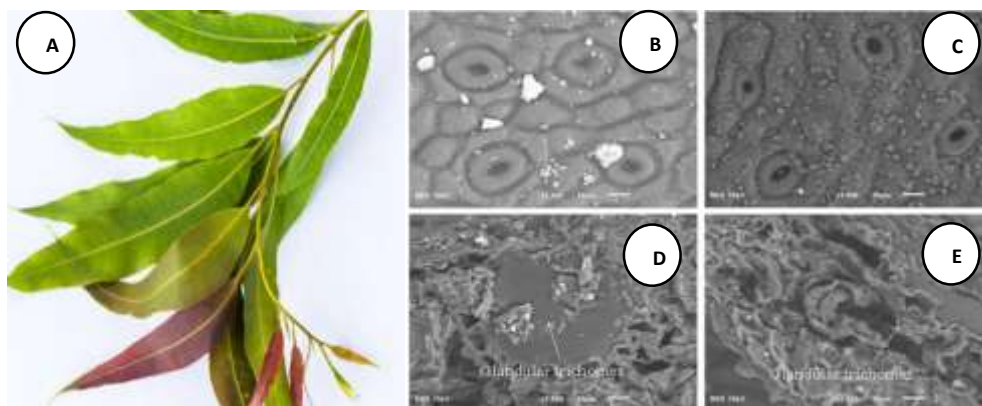


Figura 15. A) Hoja de Eucalipto B) microscopía electrónica de barrido (MEB) de la hoja de eucalipto antes del método de extracción C) MEB de HE después del método de extracción D) sección transversal de la hoja antes de procesar E) sección transversal de la hoja después de procesar. Recuperado de García, C et. al., 2017.

Para el aceite esencial de hoja de eucalipto, el terpeno de interés es el 1,8-cineol, cuya concentración puede oscilar entre 35% - 45% en peso. Los componentes más representativos del aceite esencial de eucalipto se muestran en la Figura 16.

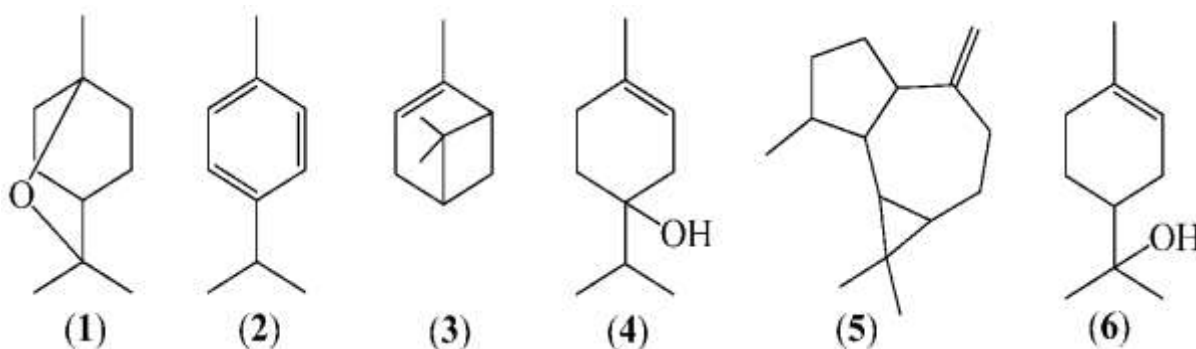


Figura 16. Estructura química de los compuestos del aceite esencial de eucalipto. 1,8-cineol (1), p-cimeno (2), α -pineno (3), terpinen-4-ol (4), aromadendreno (5) y α -terpineol (6)

Los veterinarios utilizan el aceite esencial de manera tópica por su actividad antibacteriana. Otras aplicaciones incluyen su uso en jabones y perfumes, como saborizante de alimentos y en bebidas y como un solvente de uso odontológico e industrial. El aceite esencial de eucalipto presenta propiedades antisépticas, bactericidas (Mossi et al., 2011) e insecticidas (Koul et al., 2008; Pant et al., 2014). Esto último se debe a la presencia de 1,8-cineol, compuesto característico del género *Eucalyptus*, que ha sido considerado como un fumigante prometedor (Lee et al., 2003). En la Tabla 2 se muestra la composición del aceite esencial de diferentes regiones.

Tabla 2. Composición del aceite esencial en la hoja de eucalipto en distintas regiones (% m/m). Elaboración propia.

Compuesto	Brasil	Colombia	Uruguay	Irán	Australia
	Arrastre de vapor	Arrastre de vapor	Solvente	Hidrodestilación	Solvente
alfa-pinene	1.47	5.26	23.9	3.65	7.8
beta-pinene	0.87	-	0.7	0.38	-
alfa-Phellandrene	1.2	0.52	-	-	-
Limonene	10.75	2.28	5.2	-	7
1,8 Cineol	73.334	81.43	65	70.15	77
Sabinene	0.48	-	-	-	-
Camphor	0.04	-	-	-	-
beta-mircene	-	0.5	-	-	-
alfa-terpineno	-	1.17	-	1.3	-
linalol	-	0.32	-	-	-
alfa-terpineol	-	0.51	0.5	2.54	-
alfa-copaeno	-	2.03	-	-	-
beta-selineno	-	0.59	-	-	-
pinocarvone	-	-	-	0.71	-
trans - carveol	-	-	-	0.18	-
thymol	-	-	-	2.48	-
alfa-terpinyacetate	-	-	-	0.27	-
isoledene	-	-	-	0.2	-
alfa-gurjunene	-	-	-	0.62	-
beta-copaene	-	-	-	0.36	-
aromadendrene	-	-	-	6.92	-
ledene	-	-	-	0.9	-
viidiflorol	-	-	-	4.49	-
p-cymene	-	-	-	-	3.1

2.7 Mercado de los aceites esenciales de naranja y hoja de eucalipto

Se estima que la demanda global de limoneno supere las 65,000 toneladas para 2023, debido a un antecedente histórico de 45,000 toneladas en 2015 (John, I., Muthukumar, K., & Arunagiri, A., 2017). Las importaciones de México se demuestran en la Figura 17, con un ligero descenso anual desde el 2014 al 2018.

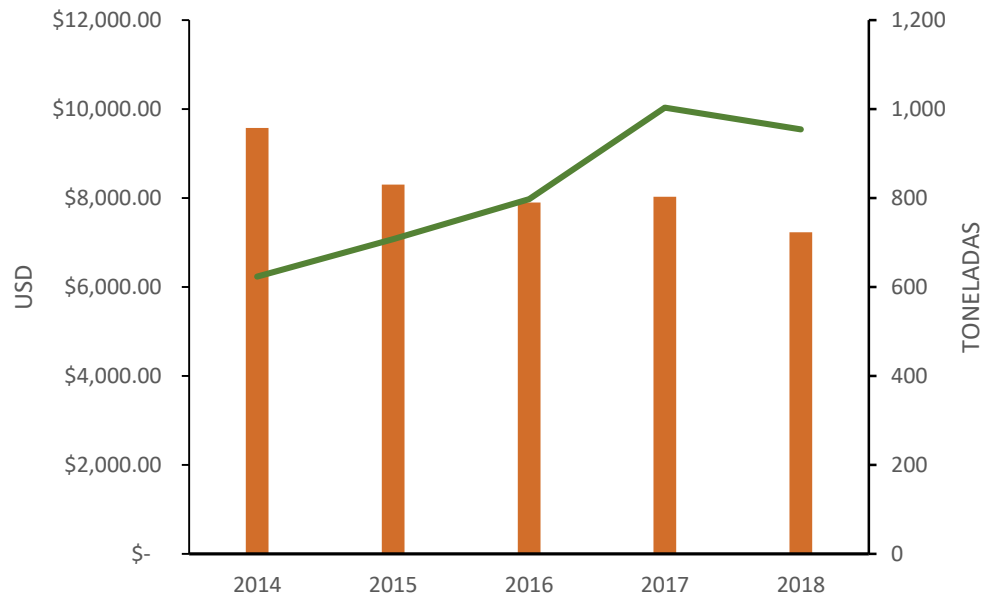


Figura 17. Cantidad de toneladas y miles de USD importados a México de aceites esenciales a partir de cáscara de naranja en el periodo 2014-2018. Elaboración propia con datos del SIAP y SIAVI. (Línea verde:USD, Barra naranja:Toneladas).

De acuerdo con la Figura 18 las cifras del INEGI indican que hasta el año 2014 el promedio de importaciones de AEE fue de 349 toneladas por año.

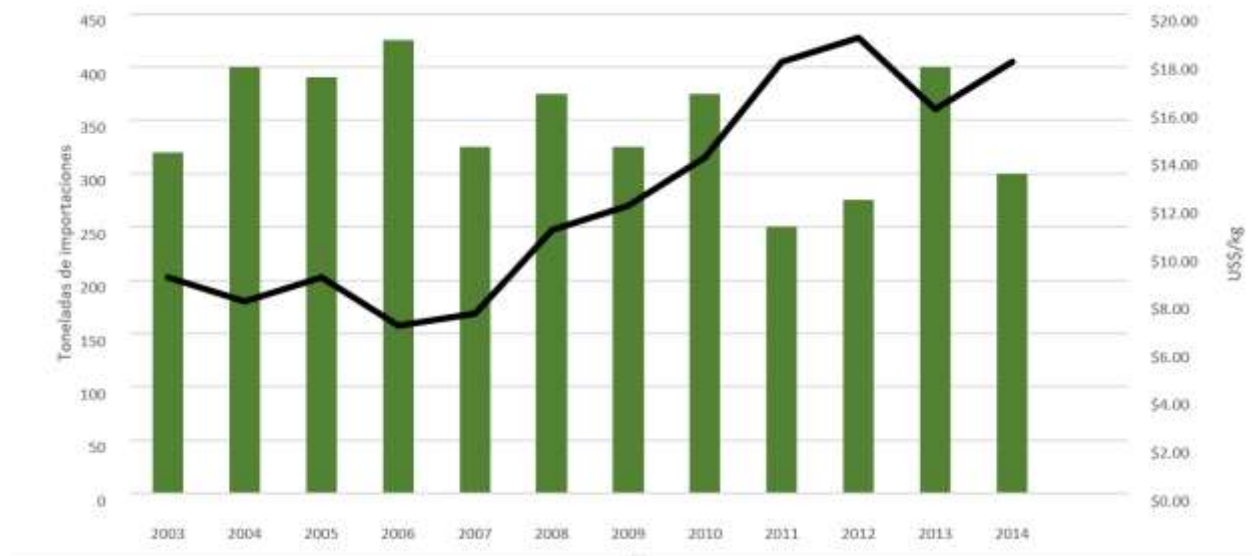


Figura 18 . Importaciones en toneladas de AEE en el periodo 2000-2014 (Barras verde), Precio de las importaciones de AEE en el periodo 2003-2014 (Línea negra). Elaboración propia con datos del SIAP y SIAVI.

2.8 Producción de naranja

La producción mundial de cítricos ha aumentado significativamente durante los últimos años y llegó a los 82 millones de toneladas en los años 2015-2019, de los cuales las naranjas, los cítricos más importantes comercialmente, representan alrededor de 73 millones de toneladas (USDA, 2018). Más del 50% de la producción mundial de naranja se genera en el continente Americano, donde México tiene una importante contribución que representó el 6.17% en 2016. La producción de naranja se presenta en la Figura 19 en el contexto internacional y nacional. Se muestra el pico de producción en 2012 en el mundo y un aumento constante en 2013 en México.

De la producción mundial de naranja el 34% se utilizó para la producción de jugo, con un rendimiento de aproximadamente 40% de cáscara como subproducto, generando alrededor de 30 millones de toneladas anuales de residuos (Ladero, M. et al., 2017). Por esto, se puede plantear su uso como materia prima de biorrefinerías para obtener aceites esenciales, pectina, bioetanol, energía y productos de alto valor añadido con aplicaciones alimenticias, entre otros. Por tanto, la identificación y el aislamiento de los compuestos bioactivos de los subproductos de las industrias de procesamiento de alimentos pueden generar valor agregado

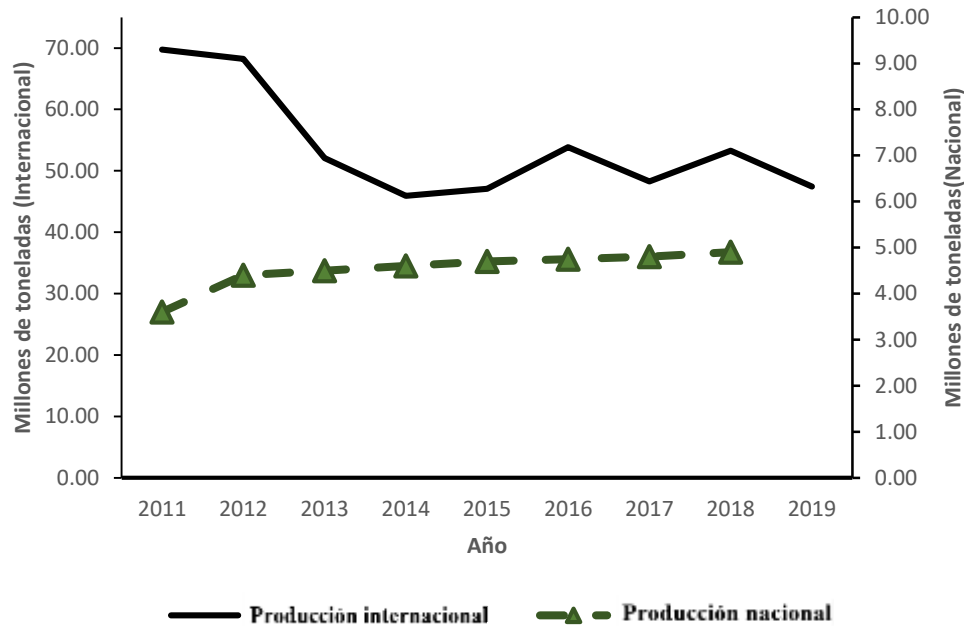


Figura 19. Producción de naranja el contexto Internacional/Nacional. Elaboración propia con datos del SIAP y SIAVI.

Los cítricos son frutos de alto consumo en México y uno de los principales productos de exportación. Por ejemplo, México es el quinto productor de naranja a nivel mundial con 4.6 millones de toneladas. La naranja fue el cultivo perenne con la mayor superficie sembrada en 2016, con 335.336 hectáreas. Del año 2016 al 2018 las exportaciones se elevaron de 0.75 a 1.37 millones de toneladas con un costo de 842.54 millones de dólares. Actualmente se satisface 100% de los requerimientos nacionales con producción interna de naranja. Las principales exportaciones se realizan a Estados Unidos, Reino Unido y Países bajos. Veracruz es el Estado líder en la producción del fruto, con más de la mitad del total nacional (2.4 millones de toneladas) en el año 2019, tal como se muestra en la Figura 20. A nivel nacional, el Estado de Sonora es donde se obtiene el mayor rendimiento de naranja, con 25 toneladas por hectárea.

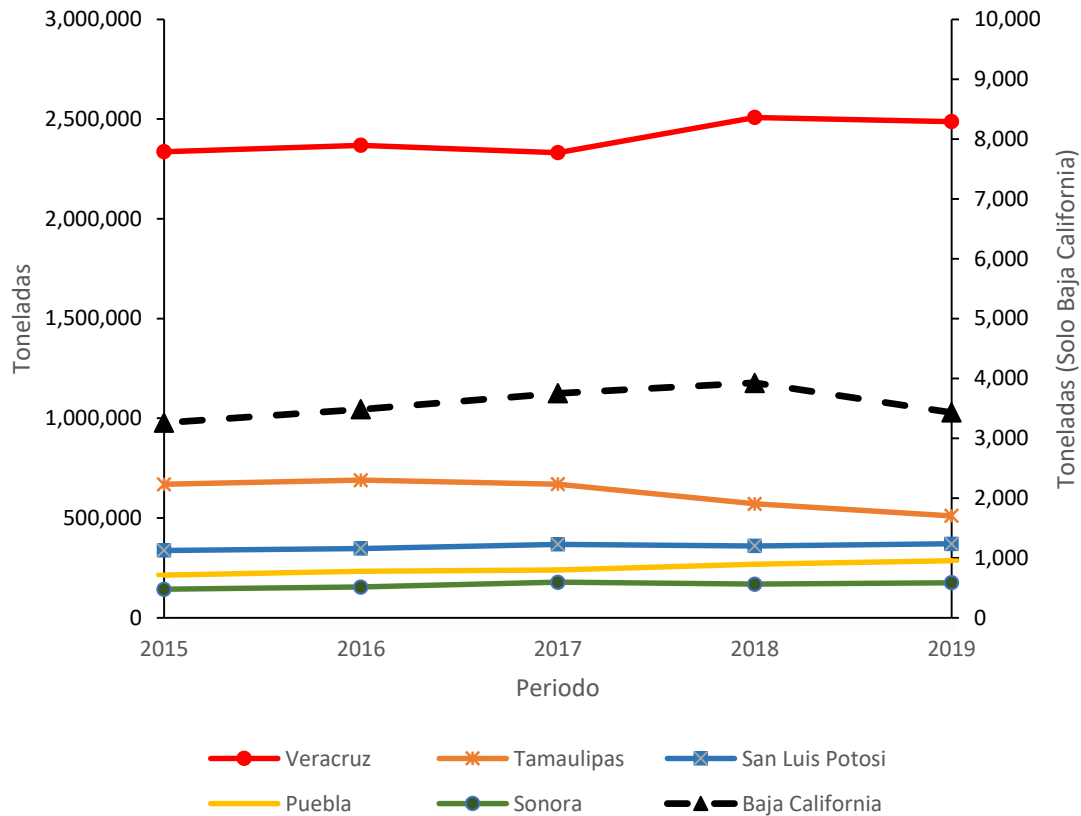


Figura 20. Producción por entidad federativa en México en el año 2019. Elaboración propia con datos del SIAP y SIAVI.

Las especies de cítricos difieren en sus exigencias de temperaturas. En forma general, pueden desarrollar y fructificar en un rango de 10 a 40 °C, y en forma óptima de 24 a 32 °C, aunque pueden soportar sin daño aparente temperaturas extremas de 0 y hasta 50 °C. La tolerancia a bajas temperaturas de las especies comerciales es en el siguiente orden descendente: mandarina, naranja, toronja, limón y lima. Las zonas más al norte como Mexicali y Caborca presentan mayor riesgo de daño por heladas, mientras que los valles del Yaqui, Mayo en Sonora y las regiones cítricas de Sinaloa prácticamente están libres de esa situación. De acuerdo con la Figura 21 en el Estado de Baja California se explota una superficie considerable de cítricos entre los cuales destacan la naranja, limón, mandarina y toronja. La tendencia a la alza de producción de naranja en Baja California coincide con que en el año 2018 se cosecharon alrededor de 4,000 toneladas.

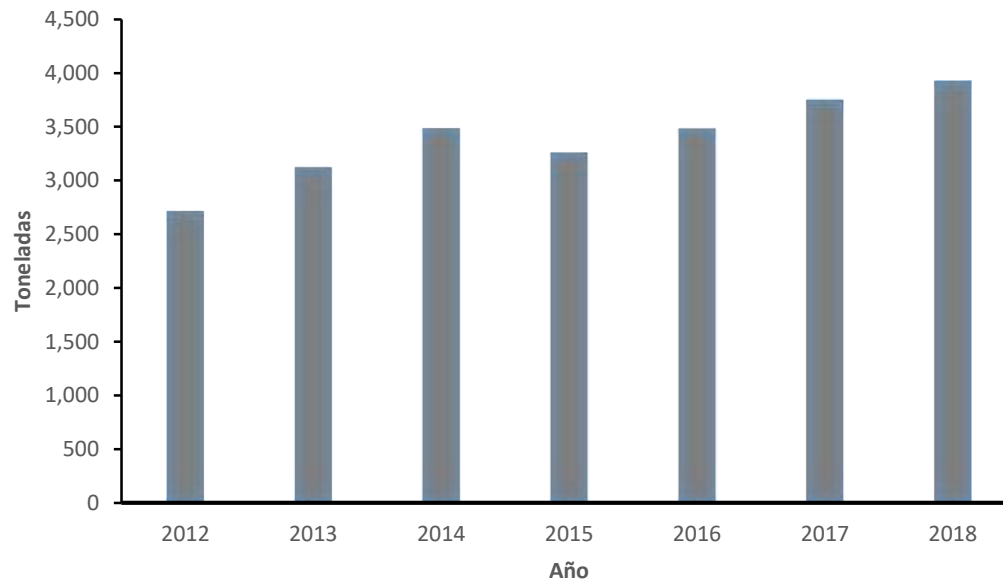


Figura 21. Producción en toneladas de Naranja a Nivel Baja California. Elaboración propia con datos del SIAP y SIAVI.

2.9 Producción de hoja de eucalipto

El eucalipto es el tipo de madera dura más plantado (aproximadamente 18 millones de ha) e incluye más de 700 especies que crecen en regiones tropicales, subtropicales y templadas. Las especies de eucalipto de interés industrial son productivas y las plantaciones se pueden operar a bajo costo (Zheng, J., et al., 2015). Otras ventajas de los eucaliptos sobre distintas fuentes de biomasa incluyen su alta densidad relativa, bajo contenido de humedad, fácil cosecha y capacidad para crecer en localidades donde existe una marcada escasez de agua durante partes sustanciales del año (Perks, M., 2012). El *E. globulus* se considera una especie de referencia, ha recibido especial atención en la literatura debido a su rápido crecimiento (Bean y Russo, 2020), adaptabilidad a una variedad de condiciones del sitio (con rango altitudinal desde del nivel del mar hasta aproximadamente 1100 m), idoneidad como materia prima para la industria de papel así como requerimientos limitados de agua y nutriente (Morales, P., 2017). La demanda a nivel internacional de productos derivados de la madera de eucalipto es una industria que muestra crecimiento. El consumo mundial de madera se reparte entre las necesidades energéticas como leñas, carbón vegetal y de celulosa, ya que pueden fabricarse múltiples productos de uso cotidiano como: papel sanitario, pañales e higiénicos; derivados como el celofán o la cola de empapelar; formica, papeles especiales, filtros, y elaboración de fibras textiles como el rayón. Además, no es tóxico para

mamíferos, es de bajo costo, constituye un recurso renovable, posee un manejo que produce abundante follaje como residuo, y es una especie que no está en peligro de conservación. En el caso de hoja de eucalipto, una vez que se realiza la cosecha o la poda del Eucalipto, esta biomasa no se aprovecha y son considerados como desperdicio. El panorama en México indica que la mayor concentración de árboles de eucalipto se encuentra en Tamaulipas (17%) y Tabasco (38%). Actualmente Baja California cuenta con 135 hectáreas de eucalipto. Este recurso está siendo parcialmente aprovechado. Su madera se utiliza como combustible, las hojas son consideradas como desecho y en el mejor de los casos son utilizadas como mejorador de suelo como tratamiento previo. La ciudad de Mexicali cuenta con el 69% de las plantaciones de eucalipto en Baja California. Las ramas y hojas de eucalipto, en la producción de madera para cualquiera de los propósitos, son considerados como biomasa residual, las proporciones de esta biomasa al momento de la cosecha, van de 10% para las ramas y 9% para las hojas. La mayoría de las veces esta biomasa residual, solamente se almacena, y en época de altas temperaturas estos residuos sufren un secado acelerado, suponiendo zonas con alto riesgo de incendio.

2.10 Energías renovables

Las energías renovables son aquellas energías cuya fuente reside en fenómenos de la naturaleza, procesos o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por el ser humano, que se regeneran naturalmente, por lo que se encuentran disponibles de forma continua o periódica, y que al ser generadas no liberan emisiones contaminantes (SENER, 2019). Todas las fuentes de energía renovables (excepto la mareomotriz y la geotérmica) provienen, en último término, del Sol. Su energía provoca las diferencias de presión atmosféricas que originan los vientos, fuente de la energía eólica. También provoca la evaporación del agua que luego precipita para formar ríos, los que permiten obtener energía hidráulica. Las plantas y algas se sirven del sol para realizar la fotosíntesis, origen de toda la materia orgánica (o biomasa) de la Tierra. Por último, la radiación solar se aprovecha como energía tanto térmica como fotovoltaica (Twidell, J., & Weir, T., 2015).

A través de placas solares se absorbe la radiación solar y se transforma en electricidad que puede ser almacenada o alimentada a la red eléctrica. También existe la energía solar termoeléctrica, que es aquella que utiliza la radiación solar para calentar un fluido (que puede ser agua), hasta que

genere vapor, y accione una turbina que genera electricidad (Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A., & Kim, K. H., 2018). En el caso de la *energía eólica* la generación de electricidad se lleva a cabo con la fuerza del viento. La energía eólica es una fuente de energía renovable que se obtiene de la energía cinética del viento que mueve las palas de un aerogenerador el cual a su vez pone en funcionamiento una turbina que la convierte en energía eléctrica. A nivel mundial, la generación se ha cuadruplicado entre 2000 y 2006 y a finales del año pasado, la capacidad mundial era de más de 70,000 megavatios. Los expertos de la industria predicen que si este ritmo de crecimiento continúa, hacia el 2050 la respuesta a un tercio de las necesidades de electricidad del mundo se encontrará en el viento (Banegas, D. P. P. ,2017) (Kalmikov, A., 2017). La *energía hidroeléctrica o hidráulica* es otra de las energías renovables más conocidas. Utiliza la fuerza del agua en su curso para generar la energía eléctrica y se produce normalmente en presas. La tecnología hidroeléctrica es una de las más desarrolladas, rentables y confiable (Kanoğlu, M., Çengel, Y. A., & Cimbalá, J. M., 2020).

La *energía de la biomasa* consiste en la combustión de residuos orgánicos de origen animal y vegetal. Los principales procesos mediante los cuales se puede obtener energía a partir de la biomasa incluyen la combustión directa, pirólisis, gasificación, hidrogasificación, licuefacción, digestión anaeróbica, fermentación alcohólica y transesterificación. Cada tecnología tiene sus propias ventajas, según la fuente de biomasa y la forma de energía necesaria (Chang, J., Leung, D. Y., Wu, C. Z., & Yuan, Z. H. ,2003).

La *mareomotriz* aprovecha la fuerza de las mareas, es la producción de energía (eléctrica) gracias a la fuerza del mar. El vaivén del agua de las mareas, las corrientes marinas, incluso la diferencia de temperaturas que hay entre el agua de la superficie del mar y la de las profundidades, también pueden ser utilizados para generar energía.

La *energía geotérmica* aprovecha el calor de la Tierra para obtener agua caliente, vapor o electricidad a partir de las aguas subterráneas. La geotermoeléctrica de Mexicali está ubicada en Cerro Prieto y es el segundo campo geotérmico más grande a nivel mundial. Este proyecto es responsabilidad de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y tiene como objetivo generar electricidad a partir de agua y calor interior de la tierra. El campo geotérmico de cerro prieto cuenta con una capacidad instalada de 720 MWe y trece plantas generadoras de electricidad de tipo

condensante, aunque su capacidad operativa actual es de 570 MWe. El campo se divide en cuatro áreas llamadas Cerro Prieto-1 (CPU), Cerro Prieto-2 (CPD), Cerro Prieto-3 (CPT) y Cerro Prieto-4 (CPC). El vapor separado que alimenta las unidades generadoras proviene de 165 pozos integrados y se transporta a las plantas mediante una compleja red de recolección de vapor que se compone de redes paralelas de alta (AP) y baja (BP) presión. Estas redes tienen longitudes de 92.1 km y 47.6 km, respectivamente, es decir 139.6 km en total, cuyos diámetros varían entre 8" y 48", y originalmente estaban aisladas con una capa de 2" de espesor de lana mineral o fibra de vidrio, recubiertas con lámina de aluminio o hierro galvanizado (García-Gutiérrez, A., et al., 2019). La ubicación geográfica de Mexicali posee las características de subsuelo necesarias para desplazar hacia arriba el magma de entre las rocas sólidas en el interior de la tierra hasta casi alcanzar la superficie, en este sitio es donde se captura. La diferencia de temperatura entre el núcleo de la Tierra y la superficie de la Tierra crea un gradiente geotérmico, lo que significa que la energía térmica se conduce continuamente a la superficie. Los recursos geotérmicos ocurren donde el flujo de calor a la superficie es alto, lo que permite que la energía sea extraída para la generación de electricidad o para uso directo en aplicaciones como calefacción urbana o usos agrícolas (Wilberforce, T., 2019).

La energía que se consume en el mundo proviene actualmente en su mayor parte de fuentes no renovables como se muestra en la Figura 22 y, por lo tanto, su agotamiento significa un efecto negativo sobre el ambiente. De esta forma, la sustitución de las fuentes convencionales por otras renovables y menos contaminantes resulta una tarea prioritaria. La participación de estas últimas en la oferta energética mundial es reducida (Figura 22) pero su crecimiento es notable. Este incremento puede adjudicarse a dos factores fundamentales: el progreso técnico que permite máquinas más eficientes y las medidas gubernamentales de promoción de fuentes de energía "limpias".

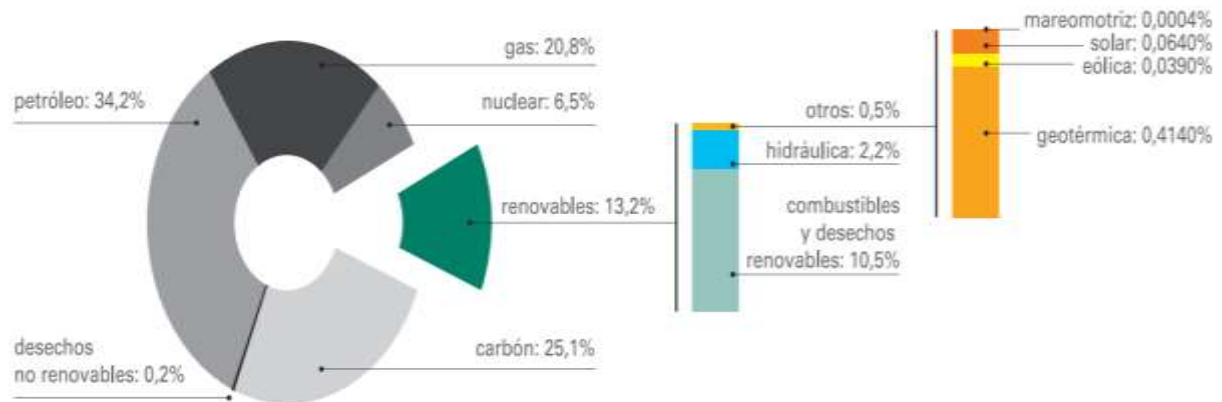


Figura 22. Participación de los distintos combustibles en la oferta mundial de energía primaria. Fuente International Energy Agency Statistics.

Esta transición energética se verá facilitada por la innovación tecnológica, especialmente en el campo de las energías renovables. Las nuevas incorporaciones de capacidad instalada de energía renovable pueden atribuirse a la rápida caída de los costos y la competitividad, en particular para la energía solar fotovoltaica y la energía eólica.

La utilización de energías renovables se encuentra en aumento ya que su desarrollo es importante para disminuir la problemática ambiental. El almacenamiento de energía térmica (TES) tiene especial interés debido a su uso en aplicaciones como calefacción de agua, refrigeración de agua y espacios. Según se observa en la Figura 23, el número total de patentes a nivel internacional sobre tecnologías relacionadas con energías renovables aumentó desde 2002 a 2012, alcanzando un máximo de 4,541. A partir de ahí, el número de solicitudes disminuyó entre 2013 y 2018, aunque volvió a registrarse un ligero aumento en 2019.

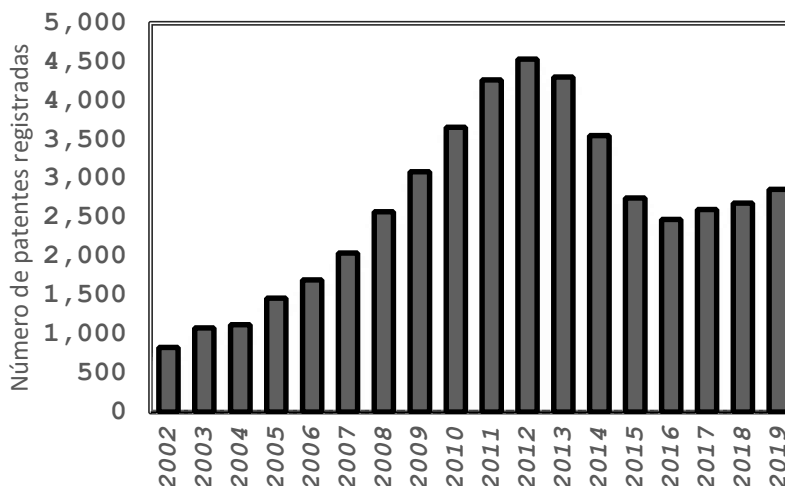


Figura 23. Tendencia histórica sobre número de patentes registradas en el área de energías renovables. Fuente: División de Economía y Estadística de la OMPI. Elaboración propia.

El total de patentes de energías renovables publicadas se clasifica en cuatro sectores principales: energía solar, celdas de combustible (que generan electricidad a través de reacciones químicas), la energía eólica y la geotérmica. En 2018, el porcentaje de patentes sobre renovables tuvo una participación del alrededor del 1% en todo el sector tecnológico el cual incluye informática, comunicaciones digitales, tecnología médica y productos farmacéuticos.

La tendencia más destacable desde 2002 es el crecimiento de la tecnología solar (Figura 24) tomando como indicador el número de patentes registradas.

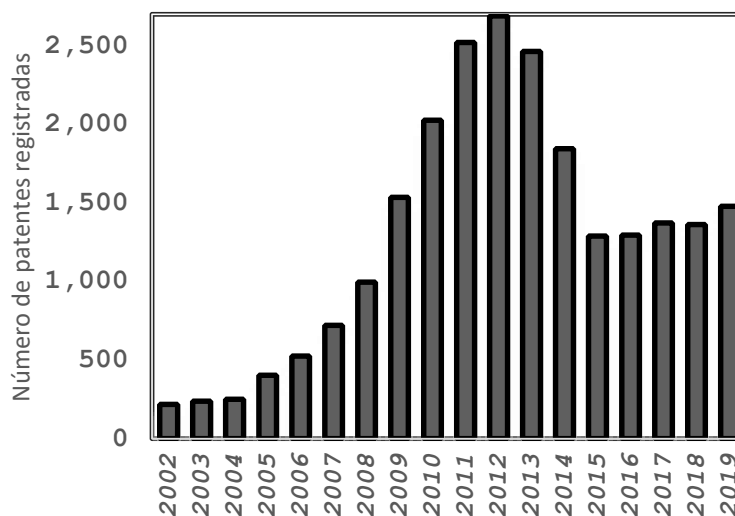


Figura 24. Tendencia histórica sobre número de patentes registrada en tecnologías solares. Fuente: División de Economía y Estadística de la OMPI. Elaboración propia

El análisis de las tendencias de patentes sobre energía solar por País queda descrito en el Figura 24. De acuerdo con la Figura 25, entre 2010 y 2019, Japón se sitúa en cabeza en cuanto al total de patentes en el sector de las renovables en general, así como en tecnología solar.

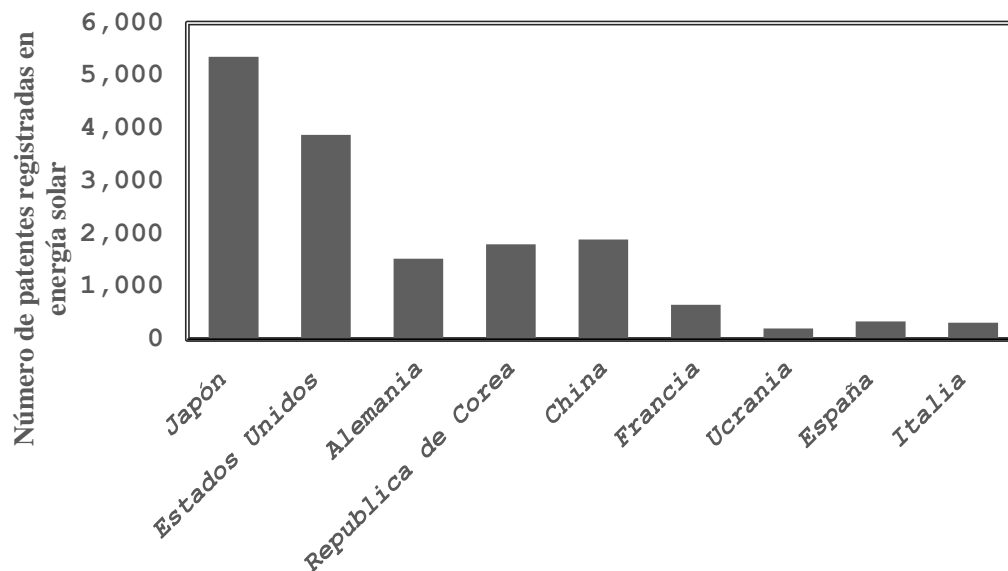


Figura 25. Principales países con patentes registradas en tecnologías solares. Fuente: División de Economía y Estadística de la OMPI. Elaboración propia.

En México existen dos empresas nacionales especializadas en la fabricación de módulos fotovoltaicos: Solartec y ERDM. La empresa Solartec se encuentra ubicada en Irapuato, Guanajuato y la la empresa ERDM se encuentra ubicada en San Andrés Tuxtla, Veracruz (Fernández, L. G., & Cervantes, A., 2017).

2.11 Fuentes renovables e industria solar en México

La matriz energética que conforma la oferta interna bruta de energía en México ha permanecido prácticamente constante en los últimos años. En 2019, la oferta interna bruta de energía fue de 8,811.06 PJ, 4.75% por debajo del año 2018. Al cierre del primer semestre de 2018 la generación por fuentes limpias alcanzó 24.12 % (40,499.01 GWh), menos de un punto porcentual para cumplir la meta del 25 % de generación de energía limpia establecida por México en la Ley de Transición Energética. Las tecnologías que mayor crecimiento presentaron fueron la fotovoltaica, la eólica y

la cogeneración eficiente contribuyendo a que la capacidad instalada por fuentes limpias se incrementara 11.84 % (2,550.41 MW) (SENER, 2018). Dicha tendencia se presenta en la Figura 26.

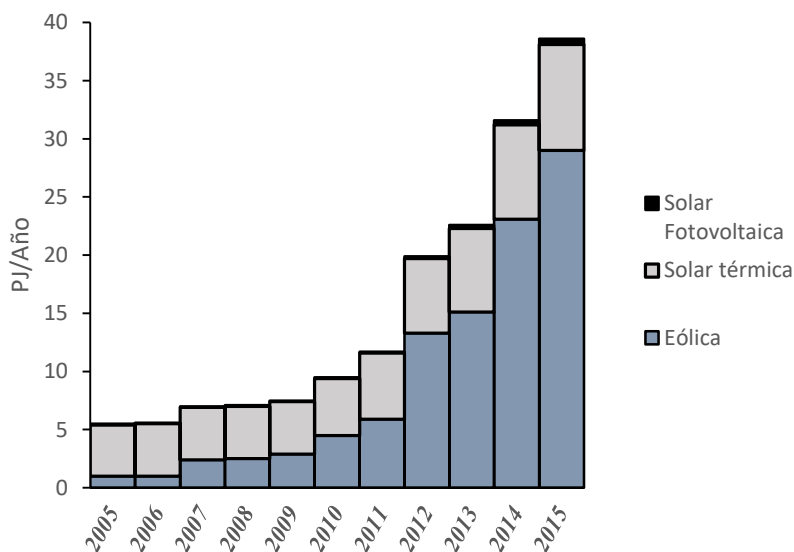


Figura 26. Crecimiento en la producción de energía a partir de las fuentes solar y eólica en México. Fuente: Sistema de Información Energética, SENER. Elaboración propia.

Actualmente, el subsector de la energía térmica está más desarrollado que su contraparte fotovoltaica. En el país se han implementado con anterioridad programas para la promoción de esta tecnología, sobre todo aplicada al calentamiento de agua en el sector residencial, con lo que su despliegue ha sido mucho mayor.

Los paralelos 40°N y 35°S definen la llamada “Franja Solar” donde se concentra el 70% de la población mundial y recibe la mayor cantidad de energía solar del planeta. Como se observa en la Figura 27, México queda dentro de esta franja y su potencial de aprovechamiento de energía solar es uno de los más altos del mundo. Alrededor del 75 % del territorio nacional son zonas con una insolación media del orden de los 5 kWh/m² al día, el doble del promedio en EUA. La zona del noroeste del país (los estados de Chihuahua, Sonora y Baja California) posee el recurso solar más abundante con insolaciones que llegan a los 6 kWh/m² al día.

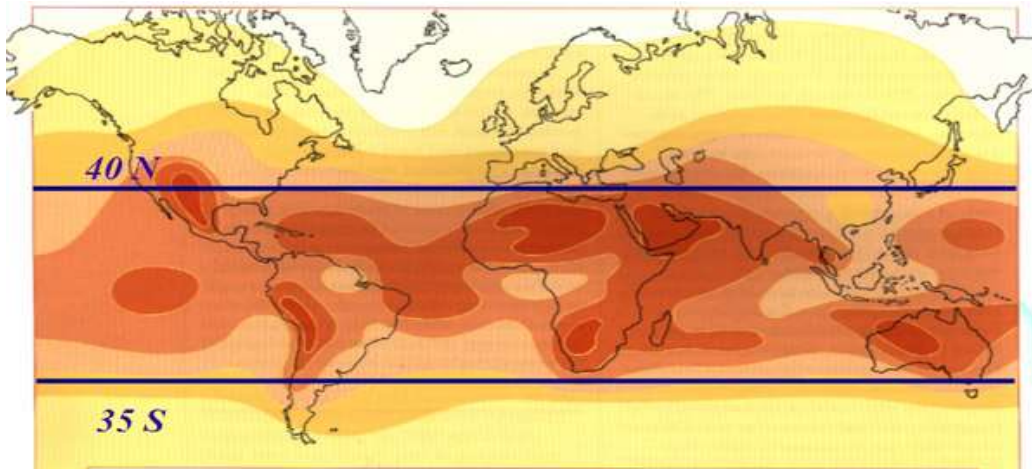


Figura 27. Distribución de la energía solar en el mundo, kWh/m²/año. (Kannan, N. y Vakeesan, D., 2016).

2.12 Energía solar y fundamentos de colectores solares térmicos

La Tierra recibe una gran cantidad de energía a partir del sol: con la energía que se recibe del Sol durante un solo día se podría cubrir la demanda energética mundial actual por más de 20 años (Chu, Y. y Meisen, P., 2011). Cuando la energía llega a la superficie de la Tierra, ha sido atenuada dos veces tanto por la atmósfera (6% por reflexión y 16% por absorción) como por las nubes (20% por reflexión y 3% por absorción). Otro 51% de la radiación solar entrante total llega a la tierra y los océanos. Es evidente que, a pesar de la atenuación, la cantidad total de energía solar disponible en la Tierra sigue siendo enorme, pero debido a que es de baja densidad e intermitencia, debe recolectarse y almacenarse de manera eficiente (Nielsen, R., 2005).

Si bien la luz es el principal beneficio que obtenemos del sol, la energía radiante enviada al planeta puede ser transformada en calor o electricidad. La energía solar transformada en calor puede ser utilizada para el calentamiento y evaporación de agua, el secado de materia orgánica y el acondicionamiento de espacios. El calor también puede transformarse en trabajo mecánico y electricidad, facilitando algunas transformaciones fisicoquímicas (El-Shaarawi, M. A., & Al-Ugla, A. A., 2018).

Un colector solar, es un intercambiador de energía especial, convierte la energía de irradiación solar en energía térmica del fluido. Para aplicaciones solares térmicas, la irradiación solar es absorbida por un colector solar como calor que luego se transfiere a su fluido de trabajo (aire, agua

o aceite). El calor transportado por el fluido de trabajo se puede utilizar para proporcionar agua caliente sanitaria/calefacción o para cargar un tanque de almacenamiento de energía térmica del que se puede extraer el calor para su uso posterior (Sharma, et al., 2009).

La patente incluida Jing, M. NZ0537462A (2005) se refiere a un colector solar de agua. El sistema de calefacción comprende un conducto formado por dos colectores de sección transversal que corren paralelos entre sí, como se muestra en el sistema descrito en la Figura 28.

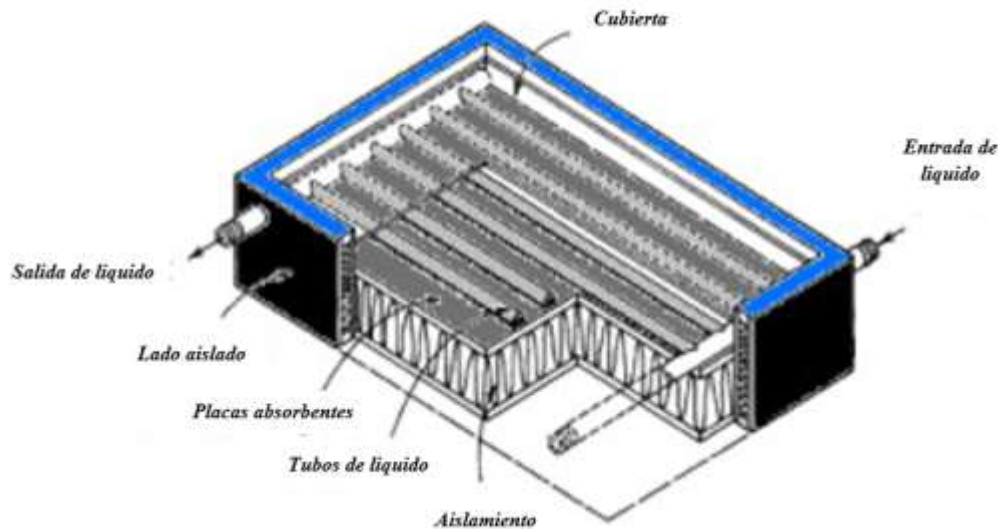


Figura 28. Un colector típico de placa plana para líquidos. Recuperado de Roonprasang, N., et al., 2008.

En la aplicación de sistemas solares de calentamiento de agua en hogares y calefacción solar de espacios, los colectores de placa plana son los colectores solares más utilizados. Una caja de metal aislada con una cubierta de vidrio o plástico también llamada acristalamiento y una placa absorbente de color oscuro es un colector típico de placa plana, que se muestra en la Figura 29. Estos colectores calientan el líquido o el aire a temperaturas inferiores a 80 °C.

La patente de Kuckelkorn, T. (2008). Patente de Estados Unidos N° 7.395.820 sobre colectores cilindro-parabólicos se refiere a un colector que incluye un espejo parabólico y un tubo receptor dispuestos en el punto focal (F) del espejo parabólico como se puede apreciar en la Figura 29.

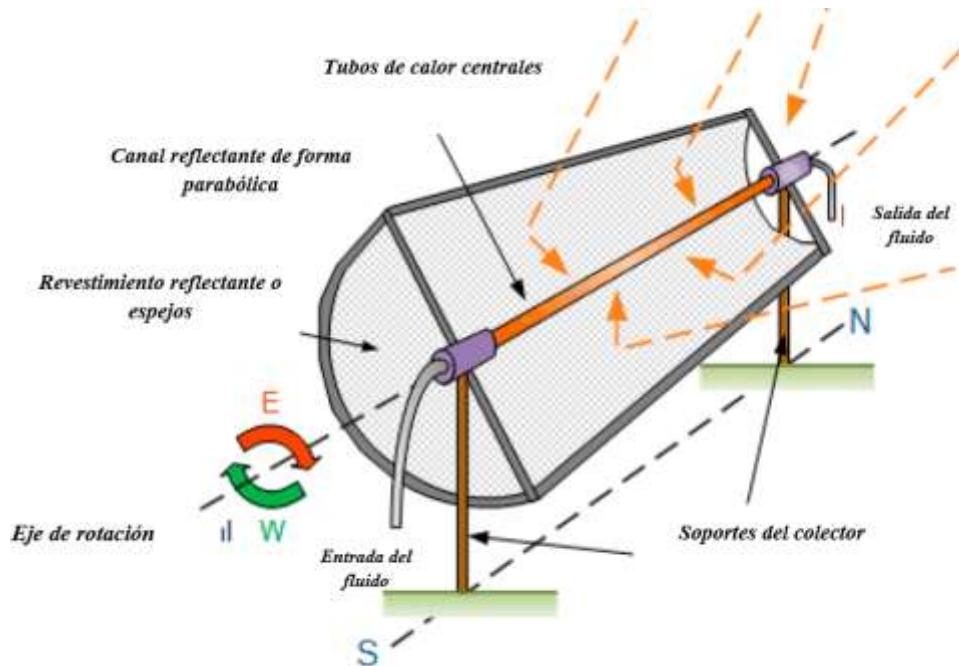


Figura 29. Colector parabólico de seguimiento de un eje orientado este-oeste y colector parabólico de seguimiento de un orientado de este a oeste.

Los colectores cilindro-parabólicos concentran la luz solar con una tasa de alrededor de 40, en función del tamaño del canal. La temperatura de la línea focal puede ser tan alta como 350 °C a 400 °C. El componente clave de tales colectores es un conjunto de espejos parabólicos, cada uno de los cuales tiene la capacidad de reflejar la luz solar a su línea focal común. En la línea focal, se coloca un receptor de metal negro (cubierto por un tubo de vidrio para reducir la pérdida de calor) y absorber el calor acumulado (Bakos, G.C., 2006).

Los colectores solares de tubo de vacío, consisten en un tubo de calor dentro de un tubo sellado al vacío. En comparación con el colector de placa plana, utiliza los efectos combinados de un revestimiento de superficie altamente selectivo y aislamiento al vacío del elemento absorbente. La envoltura de vacío reduce las pérdidas por convección y conducción, por lo que los colectores pueden operar a temperaturas más altas (Shah, L. J., & Furbo, S., 2007). Los colectores solares de tubo de vacío como el que se muestra en la Figura 30 pertenecen al grupo de temperatura media (100°C y 250°C), por lo que es el que mejor se ajusta a las condiciones del proceso de extracción de aceite esencial.

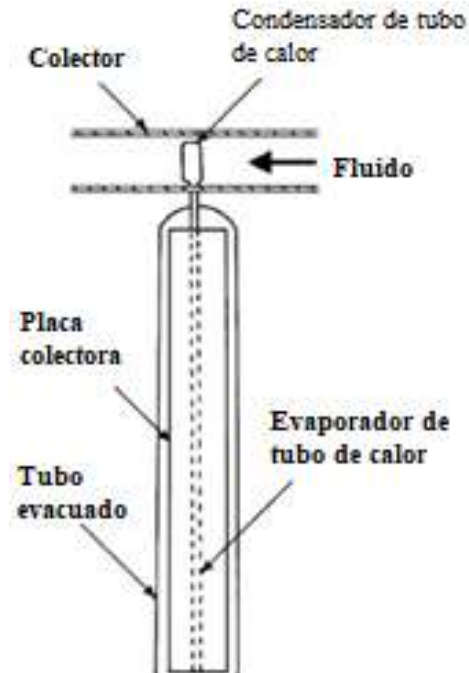


Figura 30. Diagrama esquemático de un colector de tubo de vacío con tubo de calor.

Existe un tipo de colector de tubos evacuados llamado CPC (captador de concentración cilindro parabólico compuesto) mostrado en la Figura 31, consiste en un tubo de vidrio de doble pared, cuyo fin es evitar posibles pérdidas de vacío a través de la conexión entre el metal y el vidrio. La superficie absorbedora se encuentra directamente pegada al tubo interior de vidrio y al ser cilíndrica se utilizan como concentradores. Los captadores tipos CPC ofrecen un área de apertura mayor debido al reflector. Esta disposición geométrica permite la recolección de cualquier radiación solar que ingrese a la apertura del colector dentro de un ángulo de aceptación (dependiendo de la geometría pero que varía de 10 a 80 grados) sobre el receptor de tubo por medio de múltiples reflexiones internas. Esta importante característica permite que las CPC funcionen sin seguimiento continuo (Osório, T., Horta, P., & Collares-Pereira, M., 2019).

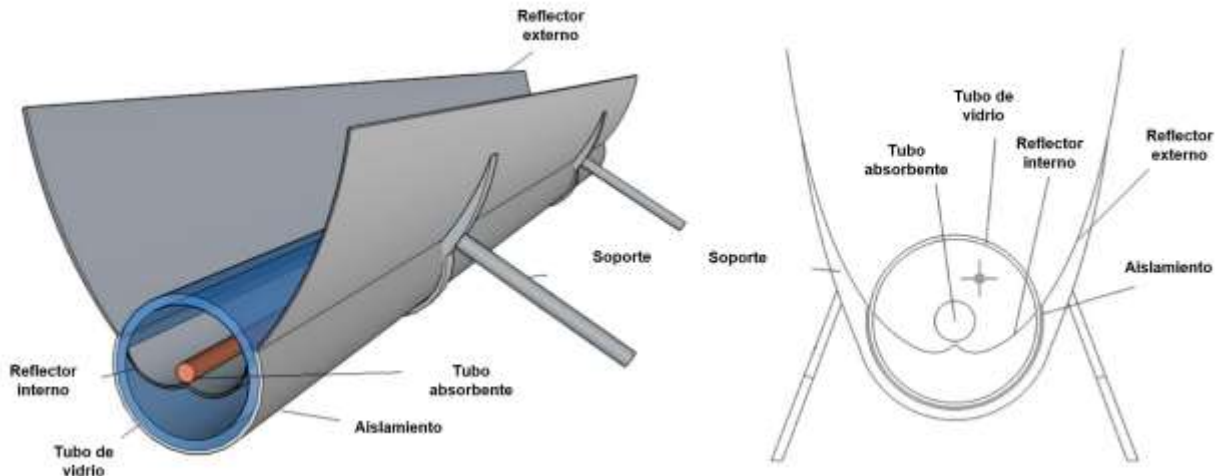


Figura 31. Colector solar de tubos evacuados CPC

La relación entre el total de radiación recibida y el aprovechamiento efectivo transmitido al absorbedor del captador solar constituye la eficiencia. Así la conversión de energía radiante del Sol en energía térmica lleva asociada unas pérdidas por radiación, convección y conducción que determinan el rendimiento del sistema de captación. El rendimiento (η) quedará determinado por la ecuación 1.

$$\eta = \eta_0 - k_1(T_m - T_a)/I \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

η_0 = rendimiento óptico.

Denominado por los fabricantes como factor de eficiencia, los catálogos del producto han de informar de sus características.

T_m = temperatura interior del colector (temperatura del flujo)

T_a = temperatura exterior (ambiental)

I = radiación incidente total sobre el colector (W/m^2)

k_1 = factor de corrección por pérdidas térmicas expresado como

$$k_1 = [\text{kg acumulación} / (75 \text{ s})]^{-0,25}$$

2.13 Utilización de energía solar en la extracción de AE

Los procesos industriales más importantes que utilizan calor en rangos de temperatura media son: esterilización, extracción, pasteurización, secado, enfriamiento, aire acondicionado, hidrolización, destilación, evaporación, lavado, limpieza y polimerización. Los rangos de temperatura de estos procesos se encuentran entre 60-280 °C. La extracción de aceites esenciales de plantas medicinales y aromáticas es una de las industrias agrícolas de temperatura media. Estos aceites se utilizan con fines medicinales, farmacéuticos, alimentos, ingredientes alimentarios, cosméticos, perfumería, aromaterapia, control de plagas, agentes gelificantes, reguladores del crecimiento de plantas y fabricación de papel (Burt, S., 2004). La Figura 32 detalla el sistema de destilación solar de aceites esenciales.

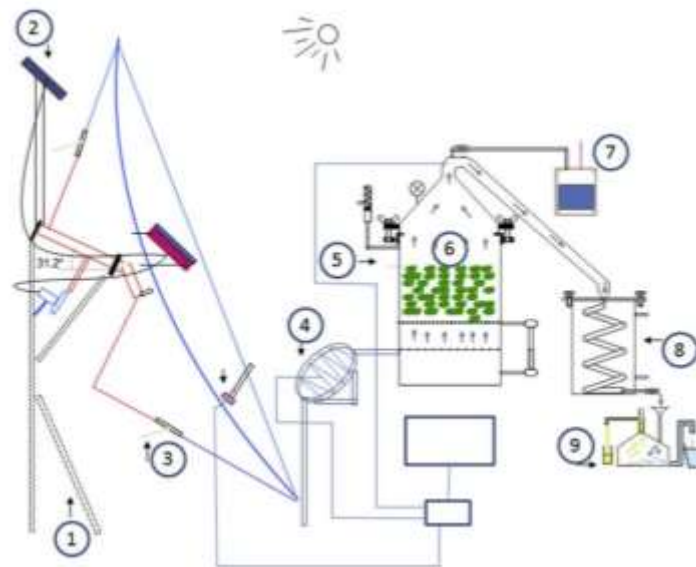


Figura 32. Diagrama esquemático de un sistema de destilación solar. 1- Reflector primario 2- Panel fotovoltaico 3- Soporte de reflector solar 4- Receptor de vapor 5- Cuerpo de destilación 6- Material vegetal 7- Controlador de temperatura 8- Condensador 9- Aceite esencial

El sistema consta de un reflector primario (concentrador Scheffer), receptor de vapor, destilador, condensador y un matraz florentino para la extracción de aceites esenciales de material vegetal. También se acopló un sistema auxiliar de biomasa al sistema de destilación para complementar los requerimientos energéticos durante condiciones climáticas adversas a lo largo de un año típico.

A partir de los datos registrados en el trabajo de Munir, A. (2010), donde se calcularon los consumos de energía por mL de aceites esenciales, se encontró que la energía calorífica consumida por mL de clavo, hinojo, comino, melisa, pachulí, casia, corteza de naranja, lavanda, menta fue de 0.133, 0.503, 0.574, 2.667, 2.716, 1.0, 2.807, 1.995, 0.50 kWh/mL respectivamente.

2.14 Software para modelado de procesos

ASPEN es un acrónimo de Advanced System for Process Engineering. Se basa en una simulación de diagrama de flujo. Por lo tanto, la simulación de un proceso completo, desde la materia prima hasta el producto final obtenido. Se representa por diferentes íconos donde cada uno equivale a una operación unitaria, proceso químico, flujo de material de entrada/salida, flujo de energía de entrada/salida o señal de entrada/salida eléctrica/neumática (Al-Malah, 2016). El simulador Aspen Plus[®], permite predecir el comportamiento de un proceso utilizando relaciones básicas de ingeniería. Los procesos físicos se describen mediante un conjunto de ecuaciones algebraicas/diferenciales linealmente independientes, de modo que el número de ecuaciones escritas será igual al número de variables (o cantidades desconocidas) y se dice que el proceso físico como tal está especificado o descrito por una representación matemática equivalente (Haydary, J., 2019). Además, permite la optimización y la mejora de los sistemas así como el diseño y cálculo de instalaciones. Las operaciones unitarias en el software incluyen mezclado, separación, absorción, destilación, extracción, calentamiento/enfriamiento con o sin cambio de fase y transformación química.

En el caso del software TRNSYS[®] (Transient Systems Simulation Program) es un simulador basado en un entorno gráfico muy flexible, utilizado para estudiar el comportamiento de sistemas de estados no estacionarios. Fue desarrollado en la Universidad de Wisconsin, y enriquecido por las contribuciones de TRANSSOLAR Energietechnik GMBH, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) y Thermal Energy Systems Specialists (TESS). Permite diseñar, optimizar, y hacer un análisis detallado de cualquier sistema cuyo comportamiento sea dependiente del paso del tiempo. Es utilizado para validar nuevos desarrollos energéticos, desde sistemas de agua caliente sanitaria hasta simulación energética de edificios, incluyendo estrategias de control y sistemas alternativos de energía (eólica, fotovoltaica, solar, sistemas de hidrógeno, etc.). La forma de generar un proyecto en TRNSYS[®] consiste en conectar gráficamente los componentes del

sistema (types) por medio de la interfaz visual “Simulation Studio”. Cada uno de los types se describe con un modelo matemático mediante lenguaje de programación Fortran y lleva asociado un Proforma en el Simulation Studio. Los componentes del sistema actúan como una caja negra por medio de entradas, salidas y parámetros. Las salidas de cada componente actúan como entradas de otro (Duffy, M.J, et al., 2009).

3. Metodología

El diseño del proceso del presente trabajo consiste en la extracción de aceite esencial de naranja (AEN) y de eucalipto (AEE), con dos variantes de destilación en el simulador ASPEN PLUS®. Para el AEN el método de extracción utilizado fue hidrodestilación y en el caso de AEE se utilizó arrastre de vapor. Arroyo Gámez, R. O., & León la Rosa, R. A. (2014) estudiaron el efecto de las densidades de carga (kg/L), método de extracción y variedad de materia prima en los rendimientos expresados con base seca. Ellos concluyeron que en la variedad Valencia, con el método de hidrodestilación, los rendimientos aumentan proporcionalmente de 1.89%, 2.13% hasta 2.33% conforme aumenta la densidad (0.4, 0.6 y 0.8 Kg/L). Mientras que cuando se empleó el método de arrastre de vapor, el comportamiento fue contrario, conforme aumentaron las densidades de carga, los rendimientos disminuyeron proporcionalmente de 2.04%, 2.01% hasta 1.61%. Esto se explica por el efecto de saturación de materia prima mediante arrastre de vapor. La transferencia de calor disminuye, quedando parte de los flavedos con aceite esencial, mientras que por hidrodestilación la ventaja radica en la transferencia de calor homogénea. Por otra parte, se prefiere la hidrodestilación para cítricos debido a que la mezcla caliente provoca una ligera reducción de tamaño, separando el albedo del flavedo y con ello mayor cantidad de aceite esencial se encuentra disponible para ser extraído. Otra ventaja es que al mezclar el agua con la cáscara molida, se produce movimiento generado por la ebullición del agua o auxiliado con agitación mecánica. Esto ayuda a eliminar acumulaciones de material sólido en el fondo del recipiente de extracción evitando que este se degrade térmicamente, lo que afectara en la calidad del aceite esencial resultante.

En el caso de la extracción de AEE se optó por arrastre de vapor, debido a que las condiciones experimentales tales como flujo de vapor, temperatura de extracción, presión de extracción, temperatura de agua de condensación y cantidad de agua de enfriamiento que correspondían a los mayores rendimientos se encontraban reportadas en el trabajo de Moreno, J., López, G., & Jara, R. S. (2010). Estos valores se tomaron como base en el diseño de la simulación del proceso de AEE.

En ambos procesos se genera una corriente rica en los componentes más volátiles del aceite esencial correspondiente, que luego pasa por un proceso de condensación, decantación y refinado para alcanzar la concentración de 1,8 cineol y limoneno deseada. Por último, ocurre el enfriamiento del agua utilizada durante el proceso. Las composiciones finales de limoneno y 1,8 cineol que se desean alcanzar para lograr productos comercializables como limoneno industrial y eucalipto deben ser de 97% y 75% en peso respectivamente. Los componentes presentes en el proceso se detallan en la Tabla 3, los cuales se utilizan en toda la simulación.

Tabla 3. Componentes utilizados en software ASPEN PLUS® para el proceso de extracción.

Componente Identificado por usuario	Tipo de componente	Nombre del componente en ASPEN PLUS®	Nombre por fórmula
LIMONENE	Convencional	D-LIMONENE	$C_{10}H_{16}D_1$
SABINENE	Convencional	(-)-SABINENE	$C_{10}H_{16}N_{44}$
BETA-PIN	Convencional	BETA-PINENE	$C_{10}H_{16}D_3$
APHA-PIN	Convencional	ALPHA-PINENE	$C_{10}H_{16}D_2$
LINALOOL	Convencional	C10H18O	$C_{10}H_{18}O$
GMA-TERP	Convencional	GAMMA-TERPINENE	$C_{10}H_{16}E_5$
FE2O3	Sólido	HEMATITE	Fe_2O_3
AL2O3	Sólido	ALUMINIUM-OXIDE-ALPHA-CORUNDUM	Al_2O_3
CAO	Sólido	CALCIUM-OXIDE	CaO
GLUCOSE	Sólido	DEXTROSE	$C_6H_{12}O_6$
AC.ASCOR	Convencional	ASCORBIC-ACID	$C_6H_8O_6$
FIBRA	Sólido	CELLULOSE	CELLULOSE
LYSINA	Sólido	LYSINE	$C_6H_{14}N_2O_2$
WATER	Convencional	WATER	H_2O
AC.LINOL	Convencional	LINOLEIC-ACID	$C_{18}H_{32}O_2$
AC.PALMI	Convencional	CIS-9-HEXADECENOIC-ACID	$C_{16}H_{30}O_2-N_4$
AC.STEAR	Convencional	STEARIC-ACID	$C_{18}H_{36}O_2$
ACCITRIC	Sólido	CITRIC-ACID	$C_6H_8O_7$
SULFSOD	Sólido	SODIUM-SULFATE	Na_2SO_4
SUCROSE	Convencional	SUCROSE	$C_{12}H_{22}O_{11}$
CELLU-01	Sólido	CELLULOSE	CELLULOSE
ACLAURIC	Convencional	N-DODECANOIC-ACID	$C_{12}H_{24}O_2$
1,8CINEO	Convencional	1,8-CINEOLE	$C_{10}HO-N_7$
ALP-TERP	Convencional	ALPHA-TERPINEOL	$C_{10}H_{18}O-D_1$
DEXTR-01	Convencional	DEXTROSE	$C_6H_{12}O_6$
VANIL-01	Sólido	VANILLIN	$C_6H_8O_8-D_1$
AIR	Convencional	AIR	AIR

La selección del método termodinámico está determinada por la naturaleza de los compuestos involucrados en el proceso, la presión de funcionamiento y los rangos de temperatura. El método seleccionado fue NRTL (No random two liquids, por sus siglas en inglés). En la Figura 33 se detalla la ruta de decisión para la selección del método. Se consideran compuestos polares, no electrolitos, presiones de trabajo inferiores a 10 bar, con interacción binaria y equilibrio líquido-líquido.

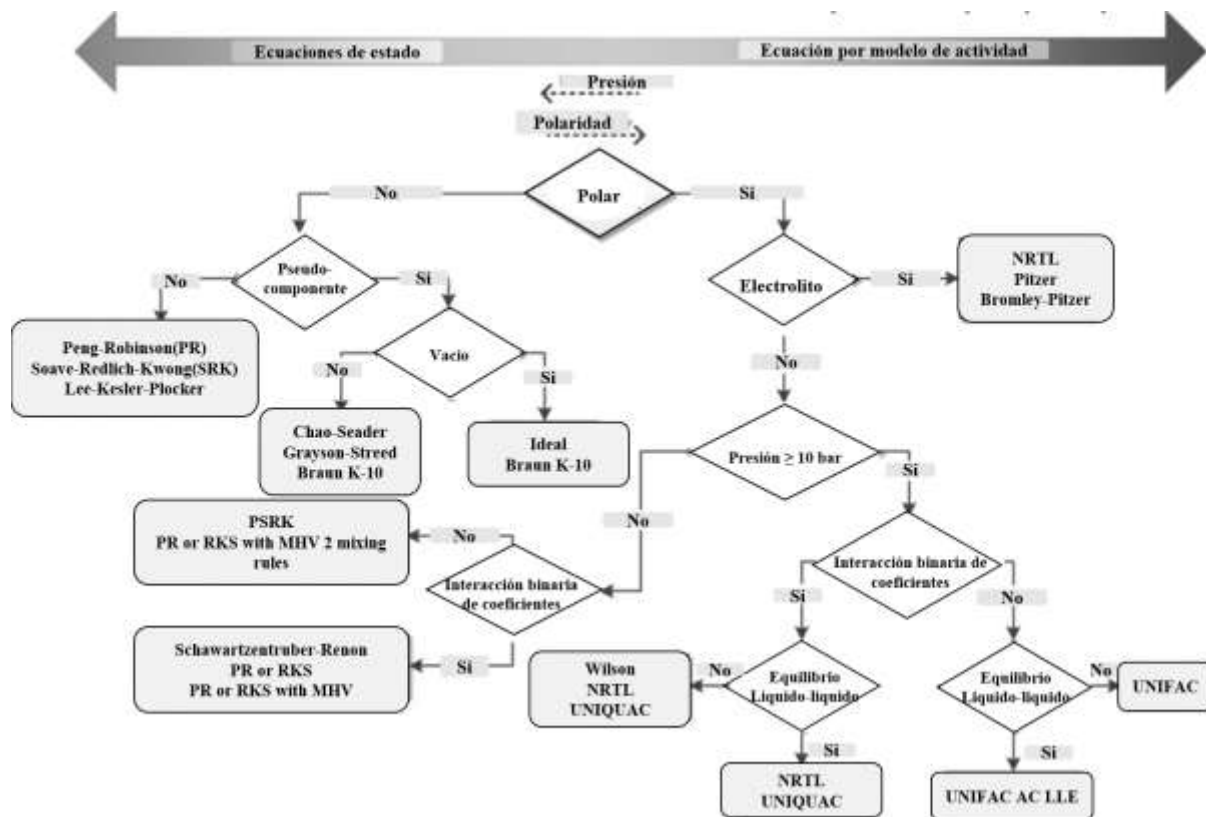


Figura 33. Algoritmo secuencial para elegir el método de propiedades. Obtenido de Al-Malah, K. I., 2016. Aspen plus^(R). Wiley.

Dado que la materia prima utilizada en el proceso es una matriz de varios componentes, se debe especificar la proporción de los compuestos que la conforman y a su vez se encuentran en el banco de datos de Aspen. La definición de los componentes y su proporción es un paso crítico en la simulación, para la aproximación de los materiales reales en el proceso. A esta aproximación se le conoce como modelo de equivalencia. Para la simulación de los procesos de extracción de aceite esencial de naranja y hoja de eucalipto se definieron cuatro modelos de equivalencia, el primero define la cáscara de naranja, el segundo la hoja de eucalipto, el tercero el AEN y por último el AEE. En la Tabla 4, se muestra el resumen de estos modelos de equivalencia.

De acuerdo con una recopilación de cromatografías (Tabla 1 y 2) de la composición de los aceites esenciales de diferentes regiones, se llegó a la conclusión que los compuestos representativos del AEN utilizados en la simulación serían limoneno, sabinene, β -pinene, α -pinene, linalool, γ -terpinene, mientras que para el AEE se seleccionaron 1,8 cineol, γ -terpinene, α -pinene, p-cymene, limoneno y β -pinene. La composición de cáscara de naranja se valoró de acuerdo a los datos reportados por Ortiz-Sanchez, et al, 2020 y para la hoja de eucalipto se tomó como base el trabajo de Ayala, J, et al, 2015, mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4. Composición del material vegetal en las corrientes de entrada en Aspen Plus[®]. Elaboración propia.

Cáscara de naranja	Aceite esencial de cáscara de naranja(AEN)		Hoja de Eucalipto	Aceite esencial de hoja de eucalipto(AEE)	
Agua 50%	Limoneno 90.33%		Lisina 4.3%	1,8 cineol 76.33%	
Celulosa 22.50%	Sabinene 1.27%		Agua 72.1%	γ-terpinene 0.73%	
Dextrosa 15%	β-Pinene 2.60%		Celulosa 6.2%	α-Pinene 8.35%	
Lignina 10.50%	α-Pinene 1.04%		Gluteína 7.7%	p-cymene 9%	
AEN 2.01%	Linalool 1.93%		Ácido Laurico 6.8%	Limoneno 5.24%	
	γ-terpinene 2.83%		Ácido Palmítico 2.5%	β-Pinene 0.41%	
			AEE 0.5%		

En el Estado de Baja California se cosecharon 3,800 toneladas de naranja en el 2019, el 35 % del fruto corresponde a la cáscara. La cantidad de residuos de cáscara de naranja (RCN), que se utiliza como materia prima en Baja California es del 8.78%, con base en este valor se estimó el procesamiento de 320 kg de RCN por día. Por otro lado, Baja California cuenta con 135 ha de árboles de eucalipto y de acuerdo con González, J. Á., et al., se producen 4.1 toneladas de hojas de eucalipto por cada hectárea plantada. El diseño del proceso contempló utilizar el 53% de la disponibilidad de hojas de eucalipto en Mexicali, con base en este valor se estimó el procesamiento de 800 kg de hojas de eucalipto diarios. Además, los cálculos anteriores se encuentran en función del volumen medio a escala industrial del equipo extractor, que se encuentran en el mercado. De acuerdo con Ruiz Galán, J. (2019), para considerar una producción de aceite esencial a nivel planta, se debe procesar entre 100-250 kg de material vegetal fresco. Los flujos de entrada de material vegetal en la simulación del proceso corresponden a nivel planta.

El día operativo consiste en 8 extracciones con duración de 60 minutos. El agua utilizada en el proceso de extracción de AEN es de 1,920 L/día y 25,788 L/día necesarios para el enfriamiento. Un total de 6,400 L/día se alimentan a la caldera para agregarse al proceso de extracción AEE y 65,800 L/día para el enfriamiento del mismo. En la etapa de decantación del AEN se genera una corriente de agua que se aprovechó en la etapa de condensado de AEE. El tanque hidrodestilador utilizado en el proceso de AEN opera a 140 °C y 1 atm. La caldera utilizada en el proceso de AEE, opera hasta convertir el flujo de masa de entrada en vapor saturado, este vapor se agrega al tanque de destilación por arrastre de vapor que opera a 125°C y 1 atm. El proceso de extracción se presenta en la Figura 34.

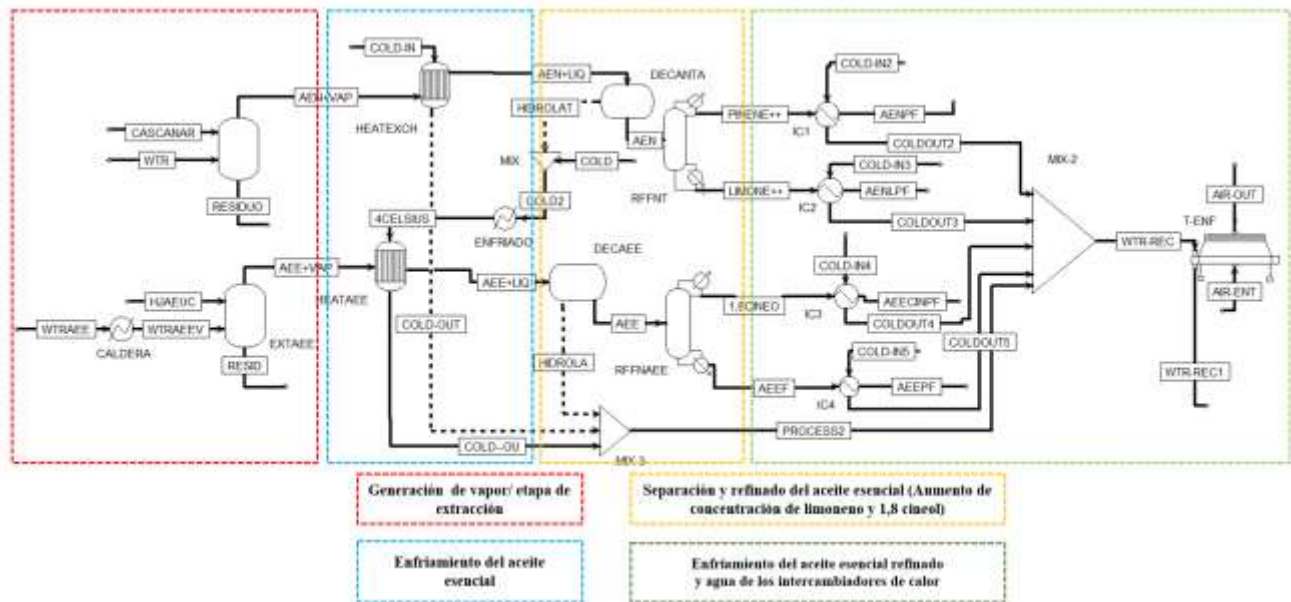


Figura 34. Diagrama del proceso para la extracción de aceites esenciales delimitado por etapa en ASPEN PLUS®.

En la primera etapa de extracción (sección con delimitación en rojo) el equipo de hidrodestilación (EXTAEN) opera a 140 °C y 1 atm, se alimenta con 40 kg/h de cáscara de naranja y 240 kg/h de agua a 25 °C. En el caso de la extracción del AEE, la caldera convierte el flujo de agua en vapor saturado (800 kg/h), que se suministra al extractor (EXTAEE) en condiciones de funcionamiento de 125 °C y 1 atm de presión para separar el AEE. La alimentación de hoja de eucalipto es de 100 kg/h.

En la segunda etapa del proceso (sección delimitada de azul), se alimentan 3,223 L/h de agua de enfriamiento (COLD-IN) para condensar la corriente (AEN+VAP), hasta llevar la mezcla a la salida del condensador (AEN+LIQ) a 40 °C. Se utiliza el hidrolato (HIDROLAT) proveniente de la decantación del AEN, como corriente de enfriamiento en el intercambiador de calor (HEATAEE) que se encuentra en el proceso de extracción del AEE junto con 8,227 L/h de agua fresca (COLD). De esta forma se aprovecha el agua en ambos procesos para su posterior almacenamiento tal como se muestra en la Figura 32. Ambos condensadores tienen un funcionamiento similar al producir una salida del agua de enfriamiento a 60 °C.

En la etapa de decantación y refinado (sección delimitada con amarillo), ambos procesos requieren una columna de destilación, cuya finalidad es aumentar la concentración de limoneno y 1,8 cineol. Los decantadores (DECANT) y (DECAEE) operan a condiciones ambientales y logran separar el agua presente en la mezcla, el aceite esencial se separa del agua debido a su baja miscibilidad con el solvente, diferencia de densidad y viscosidad. El hidrolato (fase acuosa) obtenido posee una pequeña concentración de los compuestos solubles del aceite esencial (fase orgánica), lo cual le otorga un ligero aroma semejante al AEN.

La columna que se utilizó en la refinación de limoneno (RFNTT), trabaja con 21 etapas, la alimentación se encuentra en la etapa 10, con una relación de reflujo de masa de 3.5 y una relación de destilado a alimentación de 0.225. La segunda columna de destilación (RFNAEE) utilizada para refinar 1,8 cineol trabaja con 10 etapas, se alimenta en la etapa 4 con una relación destilado a alimentación de 0.25 y un reflujo molar de 0.13. Este parámetro se obtuvo considerando el 1,8 cineol como el compuesto más volátil y el ácido láurico el menos volátil.

En la sección delimitada de color verde en la Figura 33, se realizan varias operaciones de enfriamiento al aceite esencial, con el fin de que se pueda obtener a 25 °C, para su posterior almacenamiento. Ambos procesos de extracción se conectan a una torre de enfriamiento que contribuye al proceso de enfriamiento. En la Tabla 5 y 6 se indica la descripción de los equipos y la nomenclatura de los flujos de la Figura 33.

Tabla 5. Descripción de la operación de cada equipo con flujos detallados de entrada y salida para extracción de cáscara de naranja. Elaboración propia.

Nombre	Equipo Descripción	Nombre	Corriente Descripción
EXTAEN	FLASH: El modelo matemático del separador constante de las ecuaciones de equilibrio de masa y energía en estado estacionario; relaciones de equilibrio, termodinámicas y molares. En este equipo ocurre la separación del aceite esencial de la cáscara de naranja mediante hidrodestilación.	CASCANAR	Flujo de alimentación de cáscara de naranja.
		AEN+VAP	Vapor de arrastre con aceite esencial que ingresa al intercambiador de calor.
		WTR	Flujo de agua que se agrega al equipo extractor.
HEATEXCH	HEATX: Intercambiador de calor se pueden realizar cálculos de clasificación simplificados (cálculos de balance de calor y materia) si la geometría del intercambiador es desconocida. Equipo utilizado para condensar la mezcla de aceite esencial y agua.	COLD-IN	Agua de enfriamiento
		COLD-OUT	Salida del agua de enfriamiento
DECANT	DECANTER: Separación de líquidos no miscibles. Se obtendrán dos corrientes, una rica en aceite esencial y otra llamada hidrolato.	AEN+LIQ	Flujo condensado que ingresa al DECANTER.
		AEN	Aceite esencial de naranja
		HIDROLAT	Agua separada por decantación
RFFNT	RADFRACC: Simulación rigurosa de equipos desde etapas de equilibrio. Útil para columnas de destilación simple o columnas con extracciones intermedias. En esta parte, el aceite decantado se introduce para obtener un aceite alto en limoneno y otro con compuestos de interés.	PINENE++	Aceite esencial con alta concentración de sabinene y pinene.
		LIMONE++	Aceite esencial con limoneno al 95%
IC1 IC2	HEATX: Intercambiador de calor se pueden realizar cálculos de clasificación simplificados (cálculos de balance de calor y materia) si la geometría del intercambiador es desconocida. Equipo utilizado para condensar la mezcla de aceite esencial y agua.	-COLD-IN2 -COLD-IN3	Agua de enfriamiento del aceite esencial
		-AENPF -AENLPF	Aceites esenciales obtenidos después de la refinación

Tabla 6. Descripción de la operación de cada equipo con flujos detallados de entrada y salida para extracción de hoja de eucalipto. Elaboración propia.

Equipo		Corriente	
Nombre	Descripción	Nombre	Descripción
EXTAEE	FLASH: El modelo matemático del separador consta de las ecuaciones de equilibrio de masa y energía en estado estacionario; relaciones termodinámicas y molares.	HJAEUC	Flujo de alimentación de hoja de eucalipto.
		AEE+VAP	Vapor de arrastre con aceite esencial que ingresa al intercambiador de calor.
		WTR AEE	Flujo de agua necesaria ingresada al proceso.
		RESID	Residuo obtenido de la etapa de extracción.
HEATEXCH	HEATX: Se pueden realizar cálculos de simplificados (cálculos de balance de calor y materiales) si la geometría del intercambiador es desconocida o no es importante. Equipo utilizado para condensar la mezcla de aceite esencial y agua.	COLD-IN	Agua de enfriamiento
		AEE+LIQ	Aceite esencial condensado mezclado con solvente (agua)
		COLD-OUT	Salida de agua de enfriamiento
DECANT	DECANTER: Separación de líquidos no miscibles. Se obtendrán dos corrientes, una rica en aceite esencial y otra denominada hidrolato.	HIDROLAT	Agua separada por decantación.
		AEE	Aceite esencial con alta pureza.
RFFNAEE	RADFRACC: Simulación rigurosa de equipos desde etapas de equilibrio. Útil para columnas de destilación simple o columnas con extracciones intermedias. En esta parte, el aceite decantado se introduce para obtener un aceite alto en limoneno y otro con compuestos de interés.	AEEF	Aceite esencial con alta concentración de sabinene y pinene.
		1,8 CINEOL	Aceite esencial con 1,8 cineol al 95%
IC3 IC4	HEATX: Intercambiador de calor se pueden realizar cálculos de clasificación (cálculos de balance de calor y materia) si la geometría del intercambiador es desconocida. Equipo utilizado para condensar la mezcla de aceite esencial y agua.	COLD-IN4	Agua de enfriamiento del aceite esencial
		COLD-IN5	
		AEECINPF AEEPF	Aceites esenciales obtenidos después de la refinación

La adición de energía solar tiene como objetivo ayudar al desarrollo de actividades más eficientes en el sector industrial, en particular para la generación de calor y electricidad para una amplia variedad de procesos. El simulador TRNSYS® permite crear el diseño de tecnología solar para recolectar, concentrar y utilizar la energía en un proceso de extracción de aceites esenciales. Los componentes principales son: un colector solar, un medio de transferencia de calor, un sistema de control así como se muestra en la Figura 35. La energía solar se aprovecha para calentar un medio

seleccionado (generalmente agua) que se usa para satisfacer la demanda de agua caliente en el proceso de extracción de aceite esencial de hoja de eucalipto presentado en la Figura 34.



Figura 35. Diagrama esquemático de un sistema solar para calentamiento de agua con tanque de almacenamiento.

En condiciones climáticas históricas de la ciudad de Mexicali, se analiza la temperatura de entrada y salida del colector, la radiación solar total y el cambio de eficiencia en la captación de calor en el colector de tubos evacuados. Estos parámetros se simularon en el software TRNSYS® con el type 15-2. La Figura 36 muestra la radiación anual incidente en la Ciudad de Mexicali (Latitud: 32.64, Longitud: -115.44° 38' 49" Norte, 115° 26' 46" Oeste).

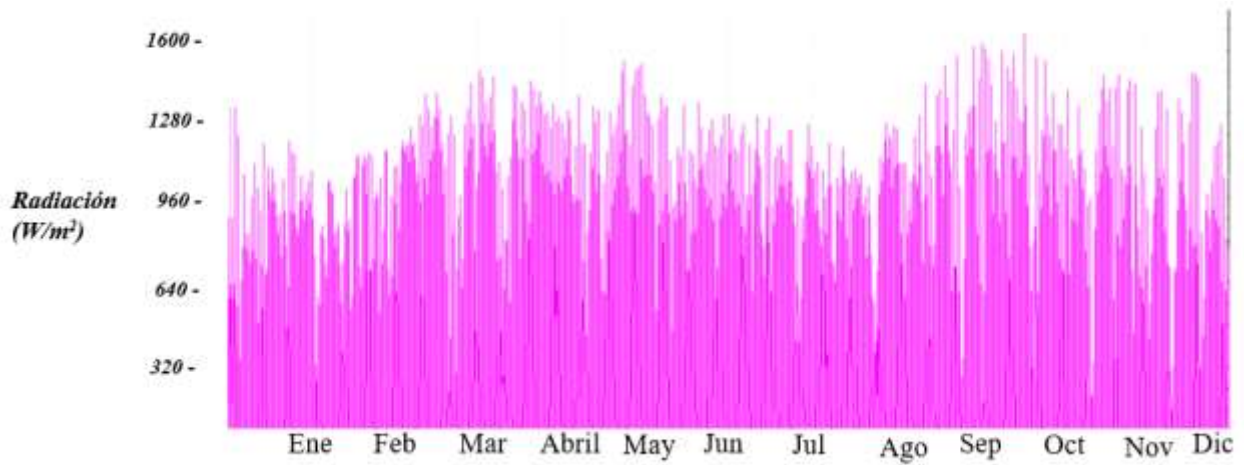


Figura 36. Radiación solar en la ciudad de Mexicali Baja California. Obtenido en software TRNSYS®

El modelo de simulación TRNSYS® para el desempeño térmico del sistema receptor de tubo de vacío queda descrito en la Figura 37.

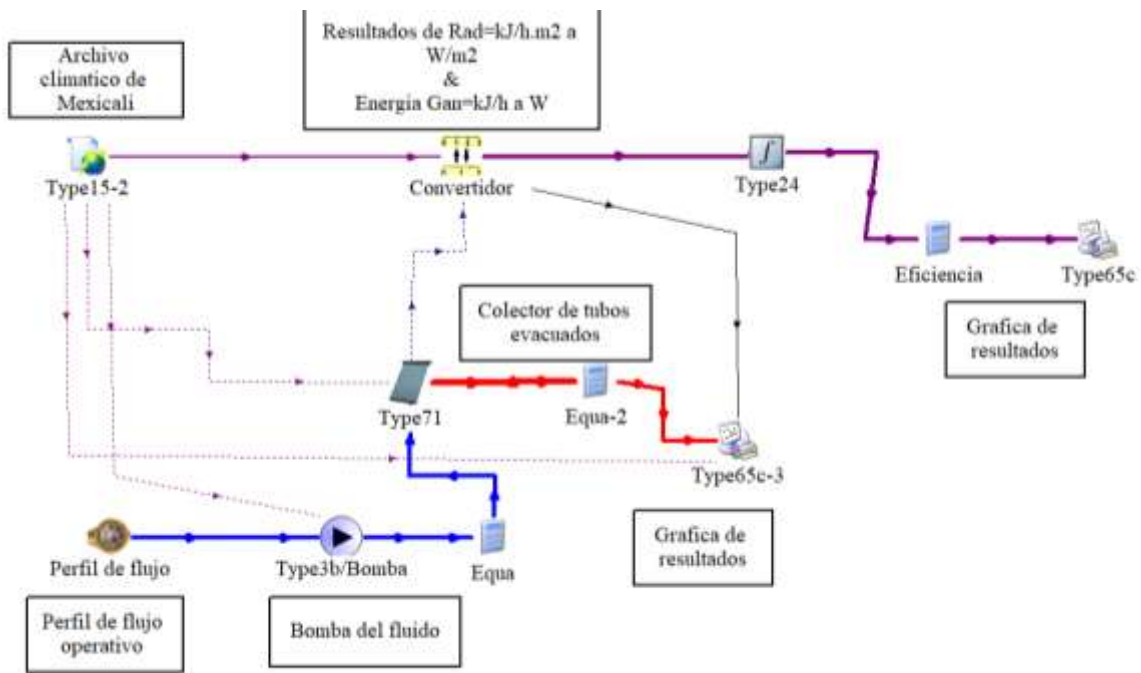


Figura 37. Diagrama esquemático del calentamiento térmico del agua para el proceso de extracción de aceites esenciales en un colector de tubo evacuado. TRNSYS®.

Para la elaboración del sistema del colector solar de tubos evacuados se utiliza un concentrador TRNSYS® “type538” como equipo principal del diseño. El “type 71” (colector de tubo de vacío)

recibe el fluido de trabajo del “Type 3d” (bomba) y la temperatura de bulbo seco es obtenido del “type 15.2”, donde se carga un archivo con los datos horarios históricos de la ciudad de Mexicali, Baja California México, el “type 65d” imprime los datos de salida como “Sistema” y “Colector”. Se utiliza una bomba como “type 3b” y un controlador como “type 2b”. La Figura 34 y 35 guardan relación en el sistema, ambos explicando el funcionamiento de la generación de vapor mediante un colector de tubos evacuados.

Los resultados obtenidos de la simulación en Aspen Plus[®] se tomaron como base de cálculo en el software TRNSYS[®], considerando procesar 800 kg de hoja de eucalipto por día, durante un año equivalente a 8,760 horas. Los parámetros utilizados para el colector de tubos evacuados quedan descritos en la Tabla 7.

Tabla 7. Parámetros del colector de tubos evacuados.

Parámetro nombrado en TRNSYS [®]	Valor	Unidad
Marca del modelo	Suntask/SHC ₂₄	-
Tipo de colectores	Tubos evacuados con CPC	-
Número de colectores	25	-
Área del colector	4.41	M ²
Tested flow rate per unit area	80	kg/h.m ²
Eficiencia óptica (a ₀)	0.668	-
Coefficiente de eficiencia de primer orden (a ₁)	1.496	W/m ² .K
Coefficiente de eficiencia de segundo orden (a ₂)	0.005	W/m ² .K
Fluido	Agua	-
Flujo de masa	0.02	Kg/m ² .s
Numero en serie	5	-
Numero en paralelo	6	-

4. Resultados

Se estudió la relación que tiene la razón de solvente: material vegetal (MV) en el rendimiento de extracción. El efecto de las proporciones de agua es una consideración importante para lograr la máxima capacidad de extracción. Además, si se utilizan volúmenes de agua más pequeños, puede que la extracción sea incompleta. Por lo tanto, dentro del tiempo de extracción de la simulación, es necesario definir la proporción adecuada de agua a MV para procesar 40 kg/h de cáscara de naranja y 100 kg/h de hoja de eucalipto. El máximo rendimiento de aceite esencial de naranja se obtuvo en razones de 1:6, esto se debe a que el gradiente de concentración entre la fase líquida y las cáscaras de naranja se vuelve mayor y por ello mejora la transferencia de masa. Por encima de esta razón el aumento del AEN no es significativo. Las Figuras 38 y 39 muestran la cantidad en mL de AEE/AEN en diferentes proporciones de solvente (agua) a sólido (hoja de eucalipto/cáscaras de naranja).

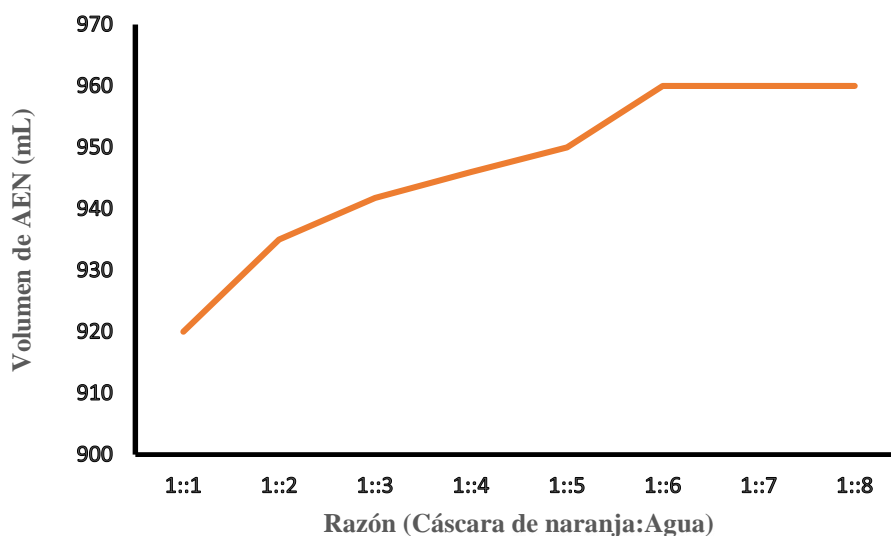


Figura 38. Efecto de la proporción de agua a hojas de eucalipto sobre la cantidad de aceite esencial de naranja obtenido.

En el caso del proceso de arrastre de vapor para la extracción de AEE la razón se refiere a la cantidad de vapor de agua que pasa por el MV en el equipo extractor. La tendencia de este comportamiento fue lineal y se seleccionó una razón de 1:8, como se observa en la Figura 38.

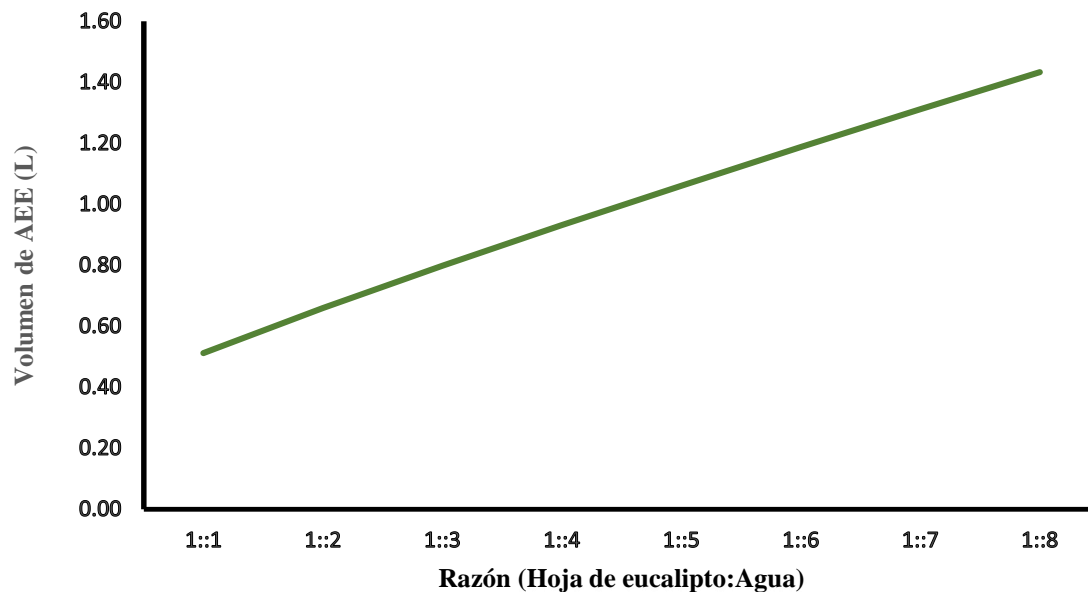


Figura 39. Efecto del agua utilizada en el proceso de arrastre de vapor.

La razón seleccionada es de 1:8 debido a que flujos de vapor de entrada por encima de 800 kg/h provocan una mayor extracción de ácido láurico y por consecuencia la concentración de 1,8 cineol en el aceite esencial disminuye, tal como se muestra en la Figura 40.

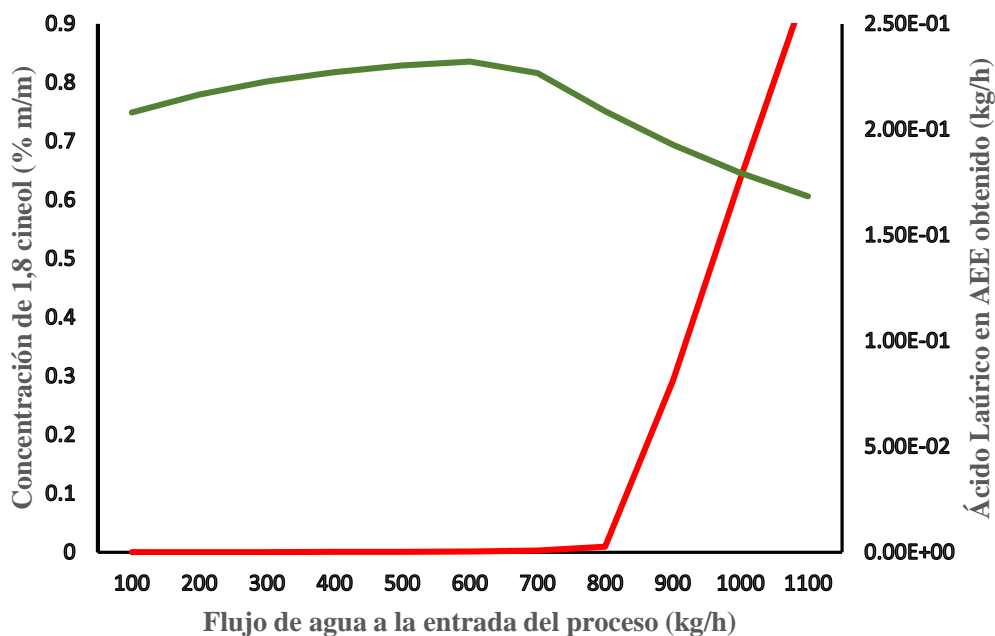


Figura 40. Comportamiento de la concentración de 1,8 cineol y ácido láurico presente en el AEE obtenido en función de la cantidad agregada al proceso como solvente. Línea roja (presencia de ácido láurico).

Al equipo hidroddestilador (EXTAEN) del proceso de AEN se le suministran 192 kW para la extracción, con 3,223.62 kg/h de agua de enfriamiento. Con estos datos de entrada se obtienen 0.95 L/h de aceite esencial de naranja cuya concentración de limoneno es de 92%. La adición de una columna de destilación permite incrementar la concentración de limoneno en el AEN hasta el 97% con un flujo de 0.91 L/h.

El índice energético total (IET) para este proceso resultó de 202.1 kWh/L de aceite esencial, tal índice toma en cuenta el gasto energético del hidroddestilador y de la columna de destilación. Para aumentar la concentración de limoneno a 97%, se utilizó una columna de destilación que requiere de 0.146 kW para cumplir con la concentración requerida.

En el proceso de AEE la energía necesaria para generar el vapor de arrastre a 125 °C mediante una caldera a 1 atm es de 584 kW. Este vapor se hace pasar por 100 kilogramos de hoja de eucalipto, para obtener 5.6 L/h de AEE al 18% de 1,8 cineol. Para enfriar la mezcla de vapor y aceite esencial se combinan la corriente de agua floral del proceso de AEN y agua de la red, que sumados son 8,487.59 kg/h de agua a 4 °C. Esta condición se logró al retirar 202 kW de este mezclado. Para elevar la concentración de 1,8 cineol al 75% se requirió suministrar 0.94 kW a una columna de destilación. Se obtuvieron 1.408 L/h de aceite esencial con una concentración de 75% de 1,8 cineol en la salida superior de la columna (1,8 CINEOL). Básicamente la función de esta columna es remover el ácido láurico. El índice que representa la energía requerida para generar un kilogramo de vapor es 0.73 kW/kg de vapor. El IET, que contempla la energía de la caldera, el gasto energético del equipo extractor, equipo enfriador y la columna de destilación fue de 579 kWh/L de aceite esencial.

El agua de enfriamiento utilizada se recircula por cada extracción durante el día operativo, el enfriamiento es mediante aire en una torre de enfriamiento, la cual requiere de 475 kW para enfriar 12,566.5 kg/h de agua.

En la Figura 41 se muestra el gráfico de superficie-respuesta tridimensional, en el que se observa el efecto de las variables razón agua-material y temperatura sobre el volumen de AEN. El análisis de sensibilidad en ASPEN PLUS[®] permitió estudiar rangos de razón agua-material de 40 a 200 kg/h y temperaturas de 110-150°C con 5 puntos de estudio. El comportamiento del perfil de ambas variables es similar mostrando la zona de máxima extracción de color amarillo de la Figura 42 con

una temperatura de 140 °C y una razón de 5:1 de agua-material vegetal. Por lo anterior se tomaron estas condiciones como la entrada en la simulación.

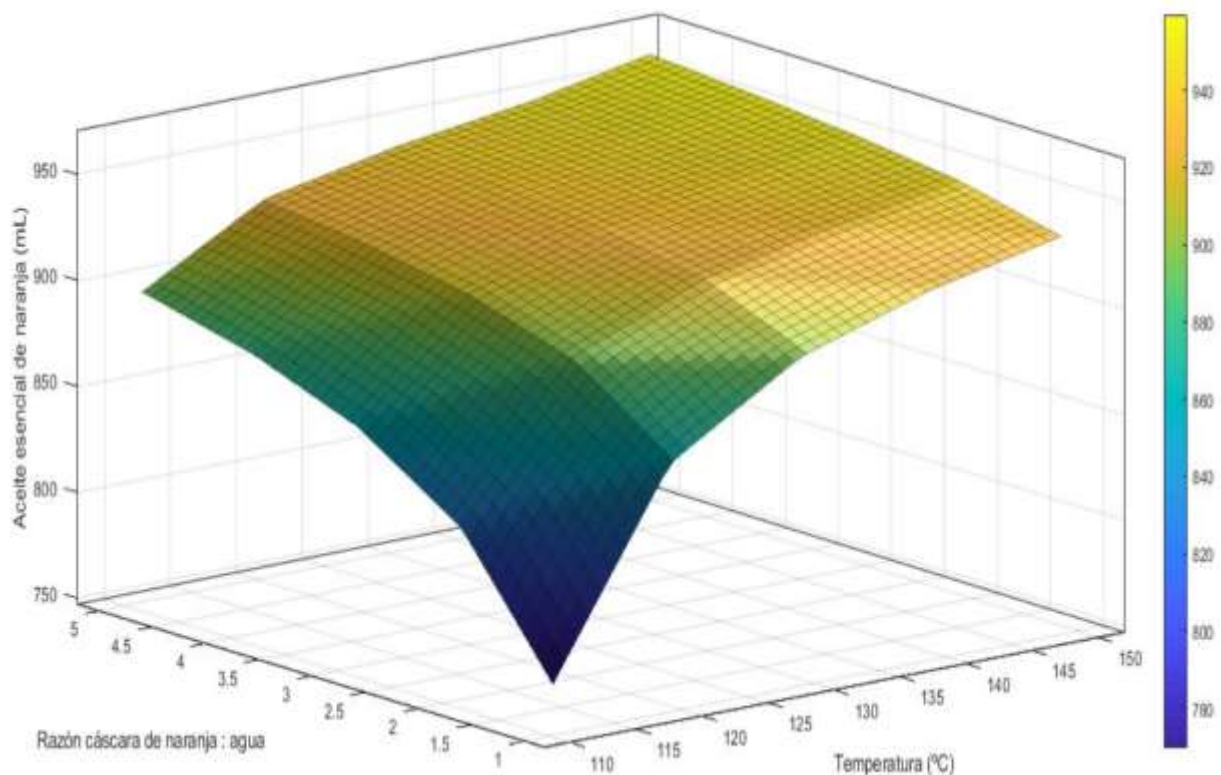


Figura 41. Gráfico de superficie-respuesta para el proceso de extracción de AEN. Elaborado en MATLAB.

En la Figura 42 se muestra el gráfico de superficie-respuesta, en el que se observa el efecto de las variables razón agua-material y temperatura sobre el volumen de AEE. El análisis de sensibilidad en ASPEN PLUS® permitió estudiar rangos de razón agua-material de 100 a 800 kg/h y temperaturas de 105-140°C con 8 puntos de estudio. El comportamiento del perfil de ambas variables es similar mostrando la zona de máxima extracción en color amarillo de la Figura 39, con una temperatura de 125°C y una razón de 8:1 de agua-material vegetal. Por lo anterior se tomaron estas condiciones como la entrada en la simulación.

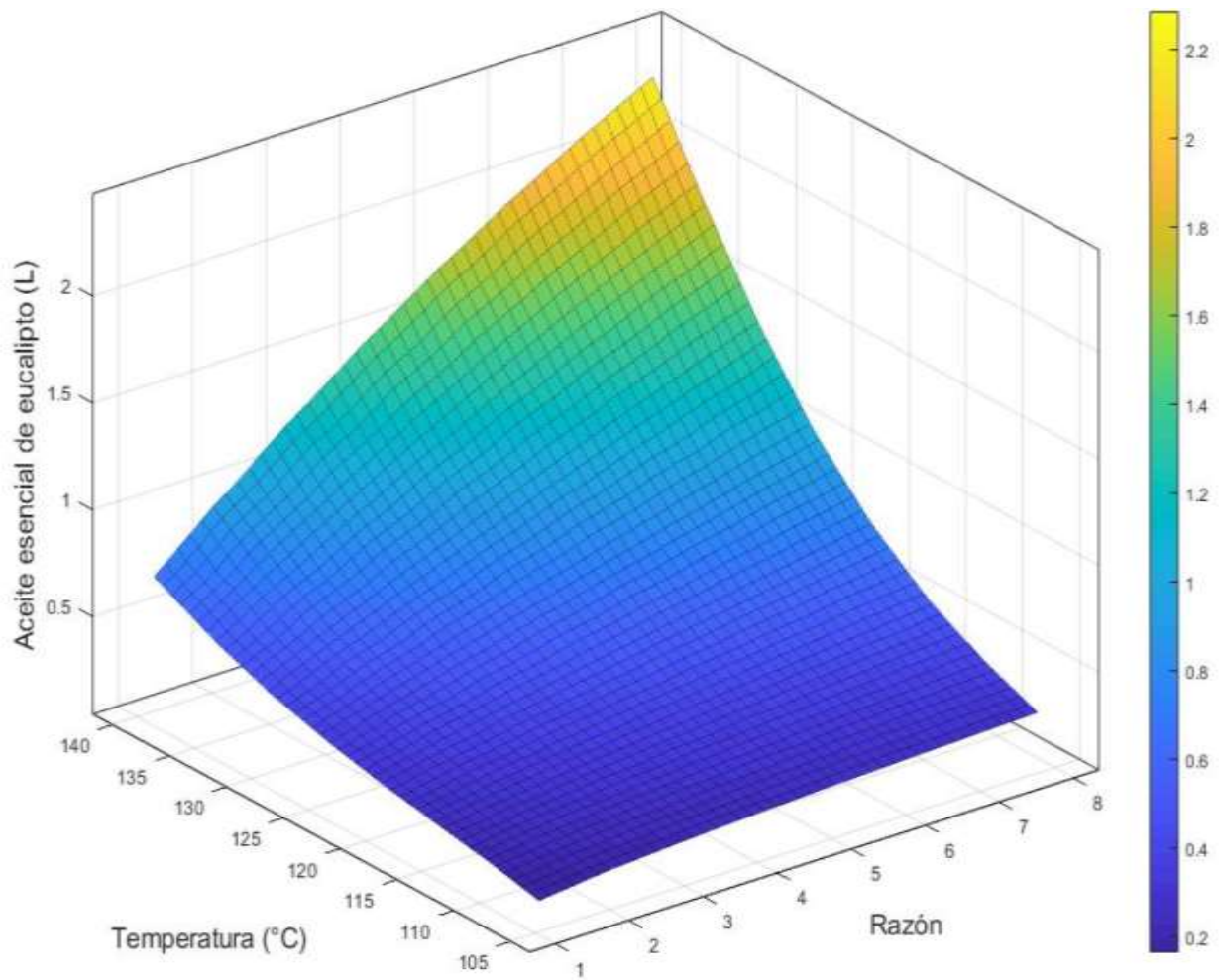


Figura 42. Gráfico de superficie-respuesta para el proceso de extracción de AEE. Elaborado en MATLAB.

En la Figura 43 se observa que el IET más favorable se presenta cuando el hidroddestilador opera a 140 °C. A medida que aumenta la temperatura desde 110 °C, el IET disminuye hasta el punto de 140 °C.

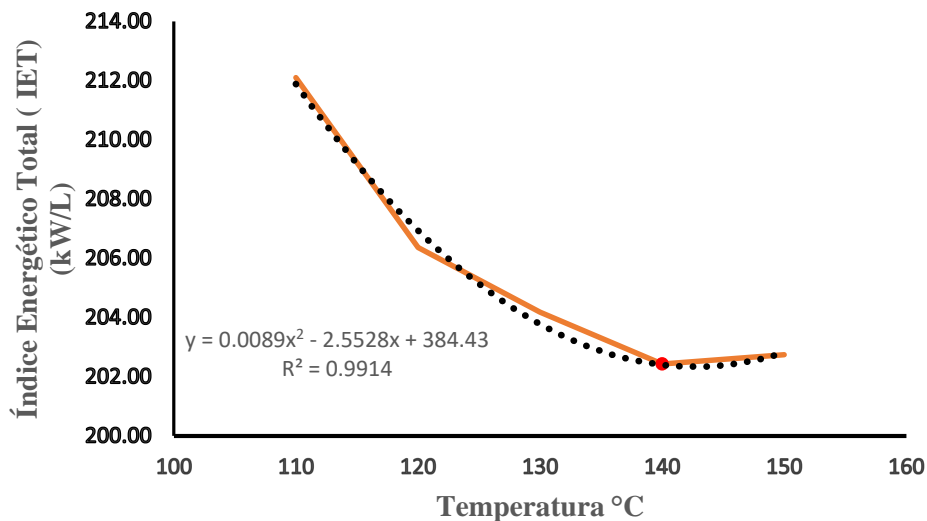


Figura 43. Perfil del índice energético total (IET) en el proceso de extracción de AEN.

En el trabajo experimental de Bustamante, J. et al., 2016 se observa como el rendimiento se encuentra ligeramente por abajo con 0.0192 litros de AEN por kilogramo de CN frente a 0.02175 litros de AEN por kilogramo de CN obtenido en la simulación. El IET del trabajo citado se encuentra en 553.84 kWh/L. Esto se puede explicar debido a que utilizan menor relación de agua como solvente (1:3.5). El nivel seleccionado de relación MV: Agua en el trabajo citado fue menor que el propuesto en la simulación. De manera análoga, en la Figura 44 se observa que el IET es favorable a la temperatura de 125 °C, por ello fue el dato de entrada en las condiciones de la caldera en el proceso de extracción de AEE.

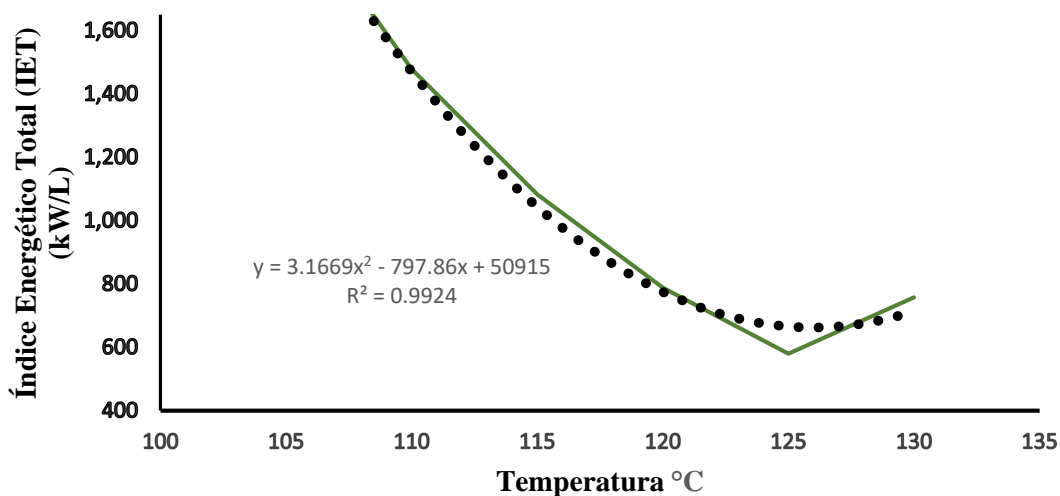


Figura 44. Perfil del índice energético total (IET) en el proceso de extracción de AEE.

En el caso del proceso de obtención de AEE se tiene como referencia a Romdhane, M. et al., 2019, donde se calculó un IET de 368 kWh/L de AEE, el cual se encuentra por debajo del obtenido en la simulación. Esto se puede explicar debido a que en dicho trabajo el agua de enfriamiento se encuentra a 25 °C y en la simulación la corriente equivalente se encuentra a 4 °C. El rendimiento del trabajo citado se encuentra en 0.0434 litros de AEE por kilogramo de hoja de eucalipto (HE). Con el fin de comparar resultados, si se procesaran 100 kg/h con idéntica metodología y rendimiento del trabajo de referencia, se obtendrán 4.34 litros de AEE al 25% de 1,8 cineol. La producción de AEE del trabajo de Romdhane, M. et al., 2019 es un 67% más que en la simulación para 100 kg/h (1.408 litros al 75 % de 1,8 cineol). Esto se explica debido a que en la simulación se incorporó una columna de destilación para llevar el AEE al 75 % en 1,8 cineol.

En la Figura 45 se observa el comportamiento de la temperatura de salida del agua de enfriamiento en el intercambiador de calor (HEATEXCH) en función de la variación del flujo másico. Con este análisis de sensibilidad se obtuvieron 3,223 kg/h de agua entre 50-65 °C. Para el análisis de sensibilidad se definió que la mezcla de AEN y agua debe de salir a 45 °C. Los parámetros de diseño del intercambiador de calor resultaron en un área de transferencia de 4.45 m² y un coeficiente global de transferencia de calor U de 3,785.28 J/s-K.

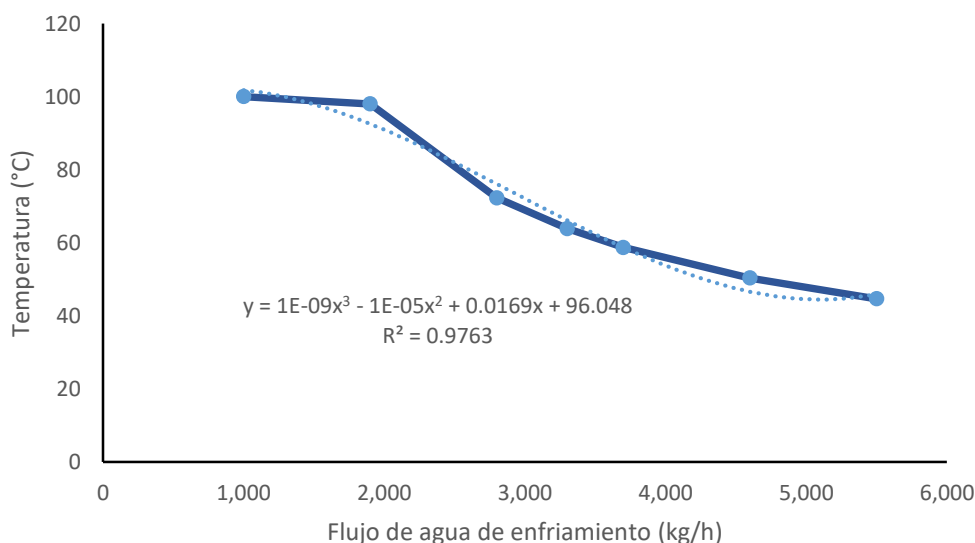


Figura 45. Perfil de la temperatura en función del flujo de enfriamiento del condensador (HEATEXCH) del proceso de AEN.

En la Figura 46 se observa que el gasto energético del equipo (ENFRIADOR) es directamente proporcional a la temperatura ambiental de Mexicali, que oscila entre 4-42 °C.

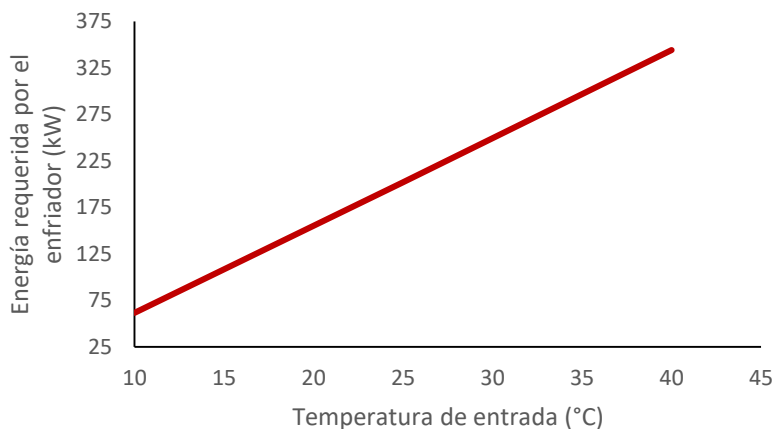


Figura 46. Gasto energético del equipo enfriador (ENFRIADO) en función de la temperatura del agua de entrada para la extracción de AEE.

El comportamiento del equipo HEATAEE es similar al condensador del proceso de AEN, donde a menor temperatura requerida del condensado, mayor es el flujo de enfriamiento que se requiere.

La destilación fraccionada es un método ampliamente conocido y utilizado para separar mezclas líquidas en sus constituyentes o aumentar la concentración de un compuesto presente. Para la separación de aceites esenciales el proceso consiste en calentar una mezcla de sustancias con diferentes puntos de ebullición, donde inicialmente se separa la sustancia con el punto de ebullición más bajo, hasta finalmente la que tiene el punto de ebullición más alto. La fase de vapor se enriquece con el componente más volátil cuando alcanza la parte superior de la columna. En la Figura 47 se observa que la concentración de limoneno deseada (97%) se alcanza con una relación de destilado con respecto a la alimentación (D/F) entre 0.2-0.3 y en un rango de relación de reflujo de 2.5-4.5, esto se obtiene definiendo el número de platos en 21 etapas a la temperatura establecida de operación como se muestra en la Figura 48.

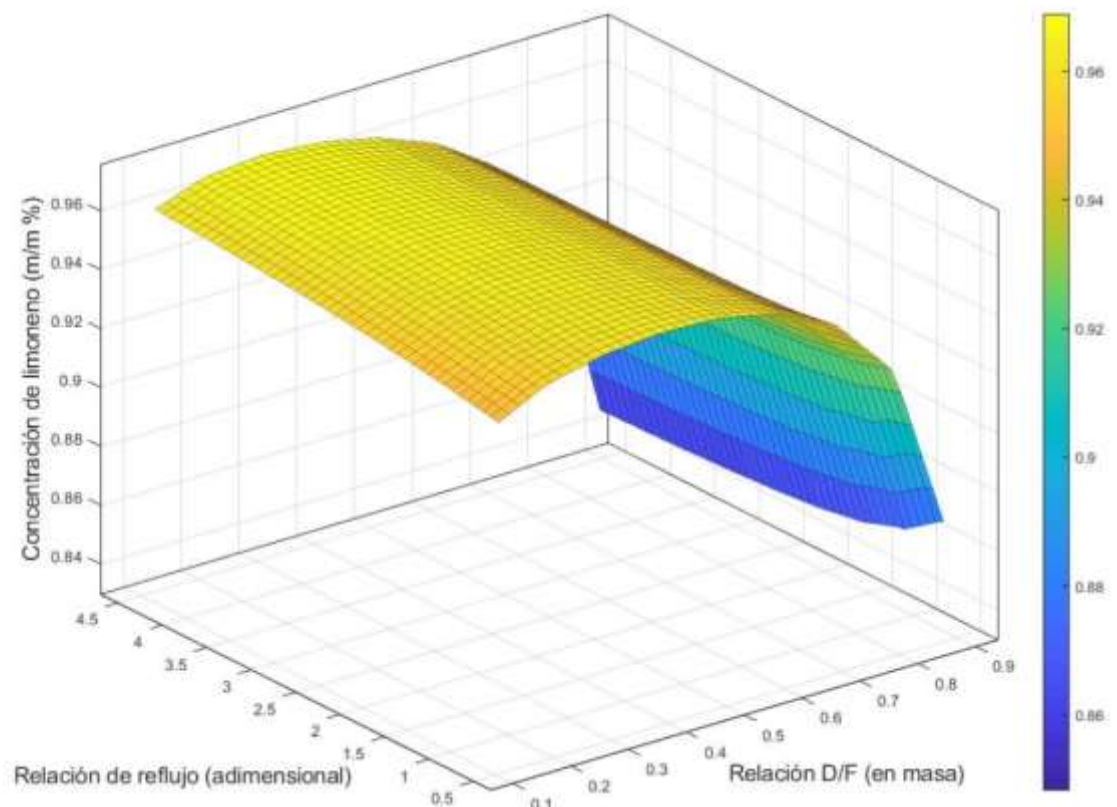


Figura 47. Gráfico de superficie respuesta para la columna de destilación de limoneno.

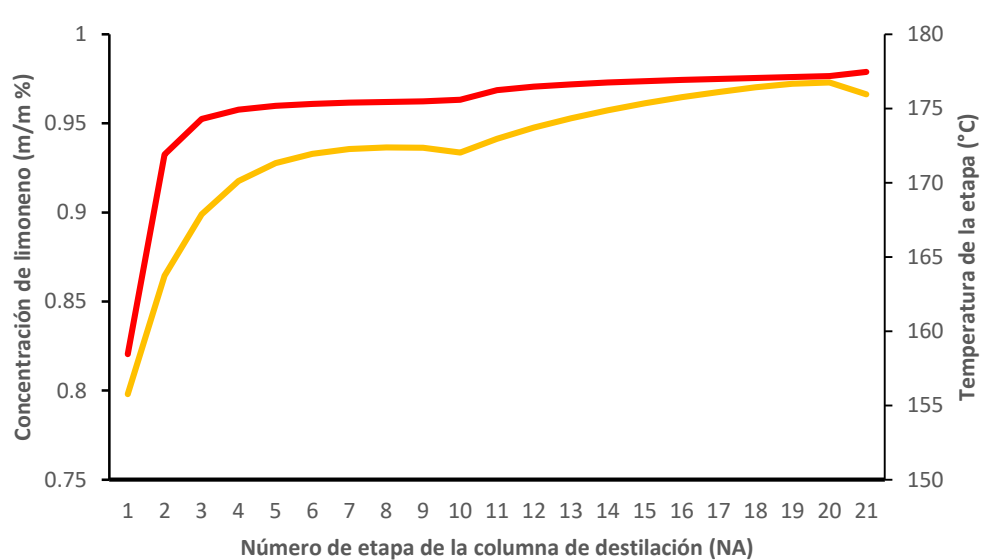


Figura 48. Perfil de temperatura en la columna de destilación y concentración de limoneno por etapa. Temperatura (Línea roja), Concentración de limoneno (Línea amarilla).

Para refinar el 1,8 cineol también se incorporó una columna de destilación donde la concentración de dicho compuesto se elevó hasta 75%. Los valores favorables fueron 0.13 para la relación de reflujo y 0.185 para la relación D/F, como se muestra en la Figura 49.

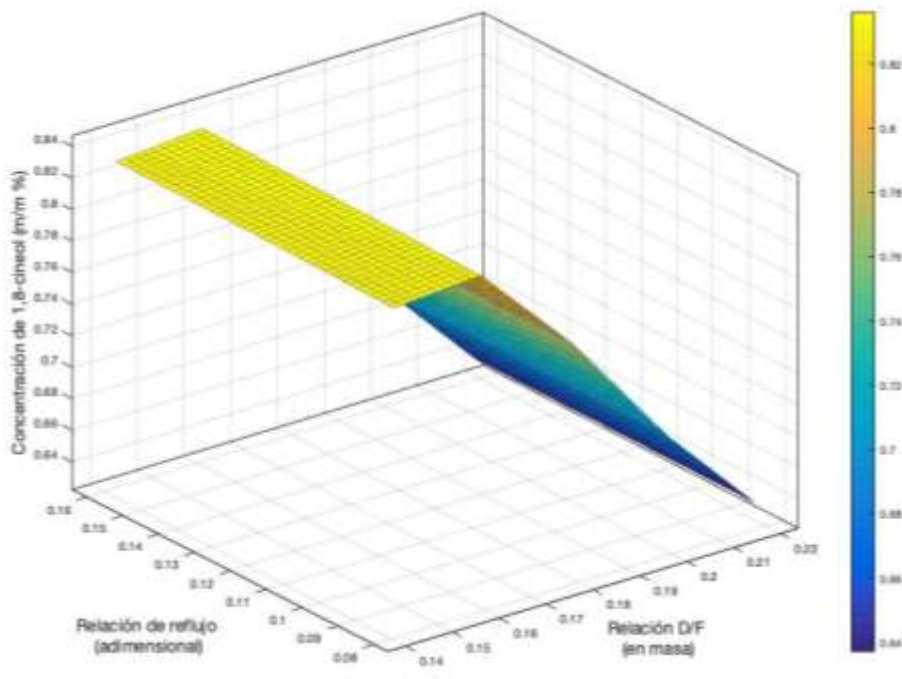


Figura 49. Gráfico de superficie respuesta en la columna de destilación de 1,8 cineol.

En la refinación de 1,8 cineol, los componentes presentan rangos de temperatura de ebullición amplios, por ello es más fácil su separación y se requiere menor número de etapas, como se observa en la Figura 50. El perfil de concentración por etapa es diferente al del limoneno ya que en este caso el 1,8 cineol es el más volátil y su participación en los fondos de la columna es nula.

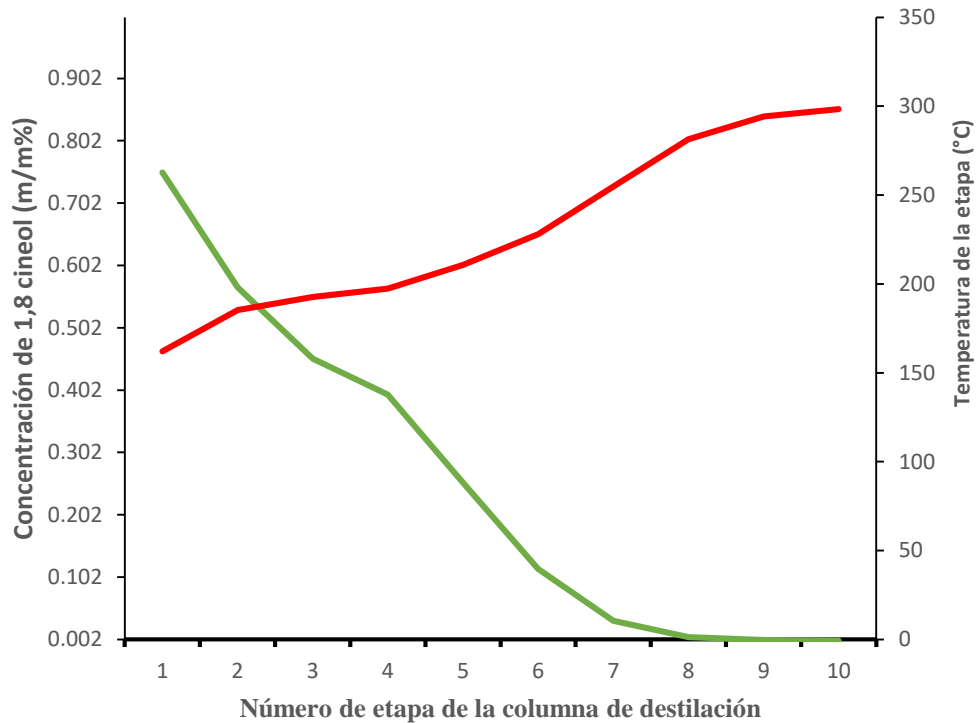


Figura 50. Perfil de temperatura en la columna de destilación y concentración de 1,8 cineol por etapa. Temperatura (Línea roja), Concentración de 1,8 cineol (Línea Verde).

Los captadores solares simulados en TRNSYS® son de tubos evacuados con reflector parabólico en la parte inferior y están conectados en seis conjuntos en paralelo con cinco captadores en serie, dando un total de 110.25 m² de área de captación solar. El diagrama del diseño de implementación queda descrito en la Figura 51.

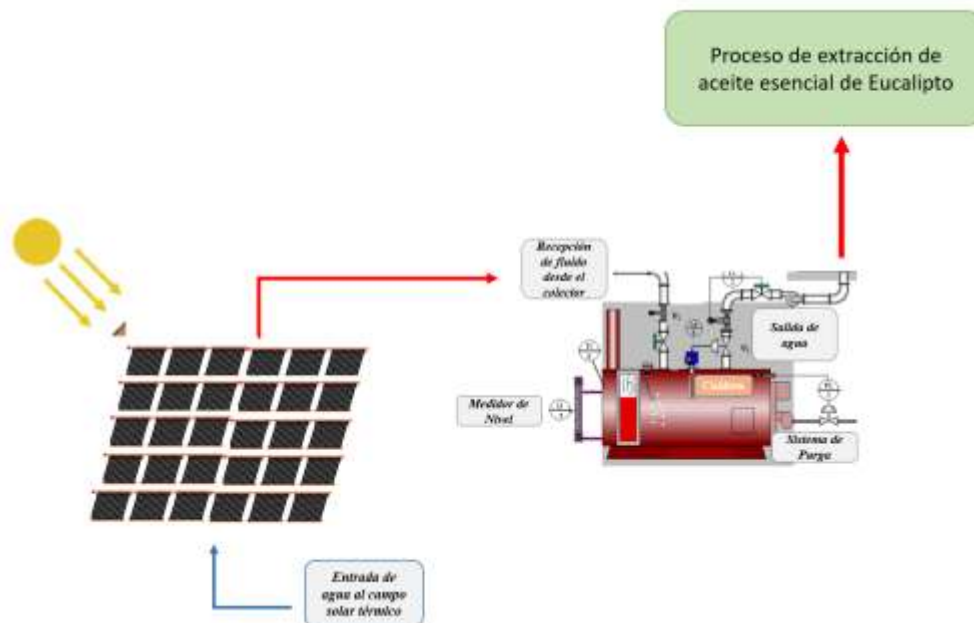


Figura 51. Diagrama esquemático del sistema de colectores solares para apoyo energético de la caldera.

En el análisis del sistema de colectores se simularon 4 puntos de estudio, los cuales consistieron en 4 días en diferentes etapas del año: 30 de enero, 10 de mayo, 27 de agosto y 5 de diciembre. Los días seleccionados se muestran en las barras internas de la Figura 52, abarcando un periodo desde 6:00 a.m. hasta 8:00 p.m., el cual coincide con el tiempo operativo del proceso. Los 4 días seleccionados abarcan el espectro de temperaturas desde muy fría a 7 °C hasta tórrida a 40 °C.

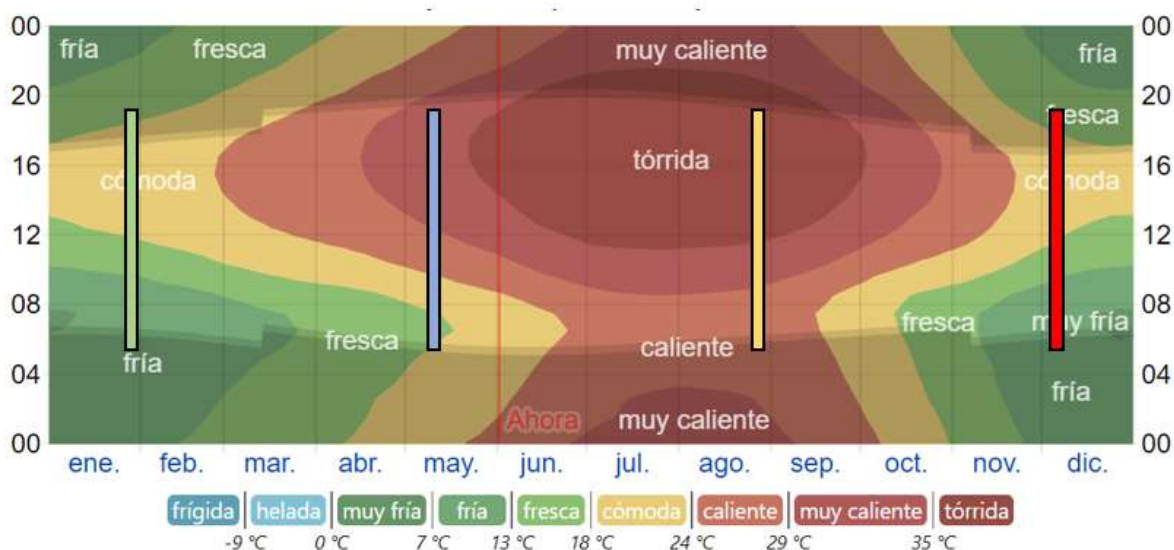


Figura 52. Perfil anual de temperatura en la ciudad de Mexicali. Línea Verde- 30 de enero, línea Azul-10 de mayo, línea Amarilla-27 de agosto, línea roja-5 de diciembre

En la Figura 53 se analizó el día 30 de enero. Se observa que la temperatura máxima alcanzada es de 92 °C. Mientras que la temperatura mínima es de 16 °C cuando la radiación es nula en horarios nocturnos. El promedio de temperatura en la sección donde está presente la radiación (706-715 horas) es de 74 °C con una radiación promedio de 615 W/m². El valor de la temperatura de salida del sistema de colectores solares que se obtuvo en TRNSYS®, se introdujo en ASPEN PLUS® para evaluar la disminución energética en la caldera. La implementación del campo de colectores solares disminuyó en 10% la energía requerida para la generación de vapor por cada extracción. Esto significó un ahorro de 456 kW diarios en los primeros meses del año, debido a que el proceso está planificado para 8 extracciones diarias.

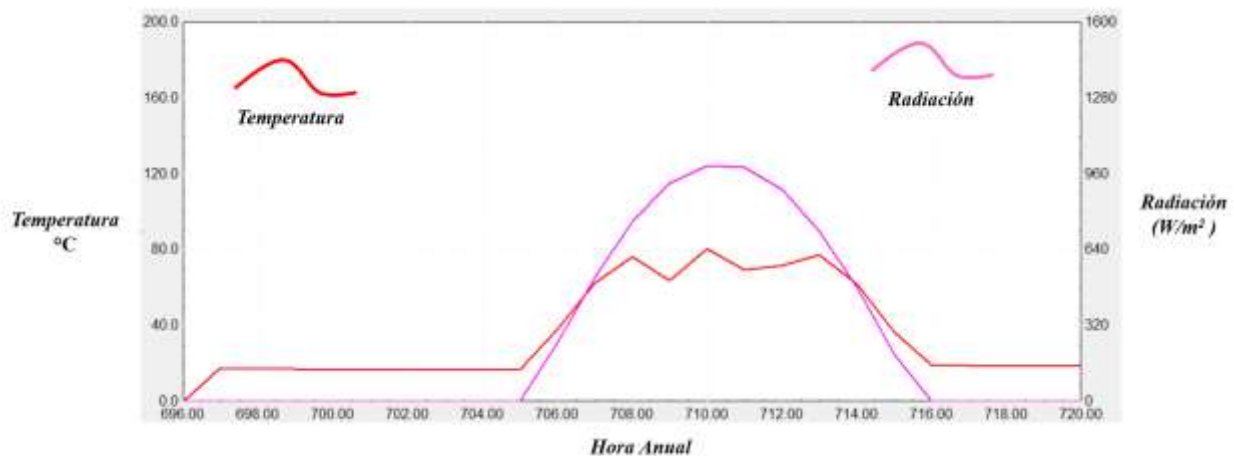


Figura 53. Perfil de temperatura del flujo de agua en la salida del colector solar y radiación incidente el día 30 de enero en Mexicali.

En la Figura 54 se observa que en el día 10 de mayo se presentan temperaturas más elevadas que en enero, pero también se produce una caída brusca de temperatura en el rango de radiación de 3106-3115 horas, con una temperatura promedio de 81 °C y una radiación promedio de 650 W/m². La disminución de energía en la caldera es del 9%, 1% menos en comparación con enero, esto se explica debido a que la temperatura ambiental del agua es de 24 °C en mayo y en enero es de 18 °C. Aunque en mayo se cuenta con mayor radiación y se alcanzan temperaturas más altas, la carga energética de la caldera es mayor en mayo con respecto a Enero, debido a que el gradiente de temperatura entre los flujos de entrada y salida de agua del colector es menor.

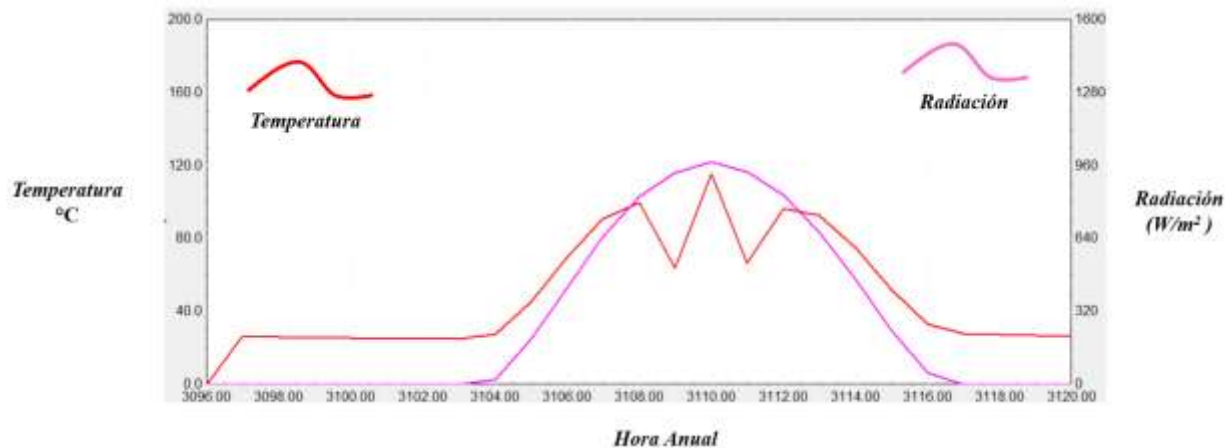


Figura 54. Perfil de temperatura del flujo de agua en la salida del colector solar y radiación incidente el día 10 de mayo en Mexicali.

En la Figura 55 se analiza el día 27 de agosto. Se obtiene una temperatura promedio de 85 °C con una radiación promedio de 606 kW/m² y una temperatura de entrada de agua de 33 °C. La temperatura máxima alcanzada es de 110 °C. La disminución de energía en la caldera es del 8.63%.

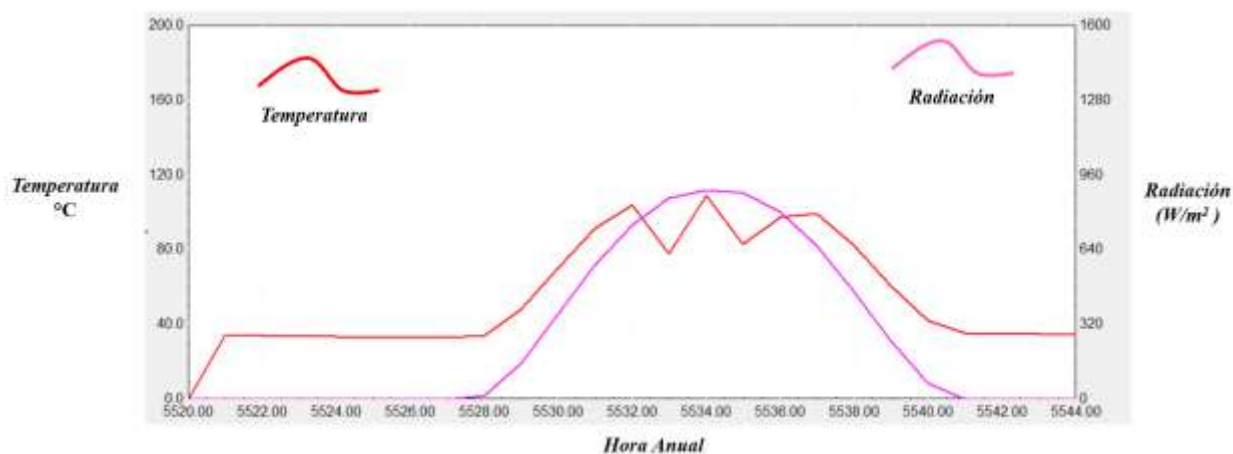


Figura 55. Perfil de temperatura del flujo de agua en la salida del colector solar y radiación incidente el día 27 de agosto en Mexicali.

En la Figura 56 se analiza el día 5 de diciembre. Se obtiene una temperatura promedio de 75 °C con una radiación promedio de 537 W/m² y una temperatura de entrada de agua de 21 °C. La

temperatura máxima alcanzada es de 107 °C. La disminución de energía en la caldera es del 8.64%.

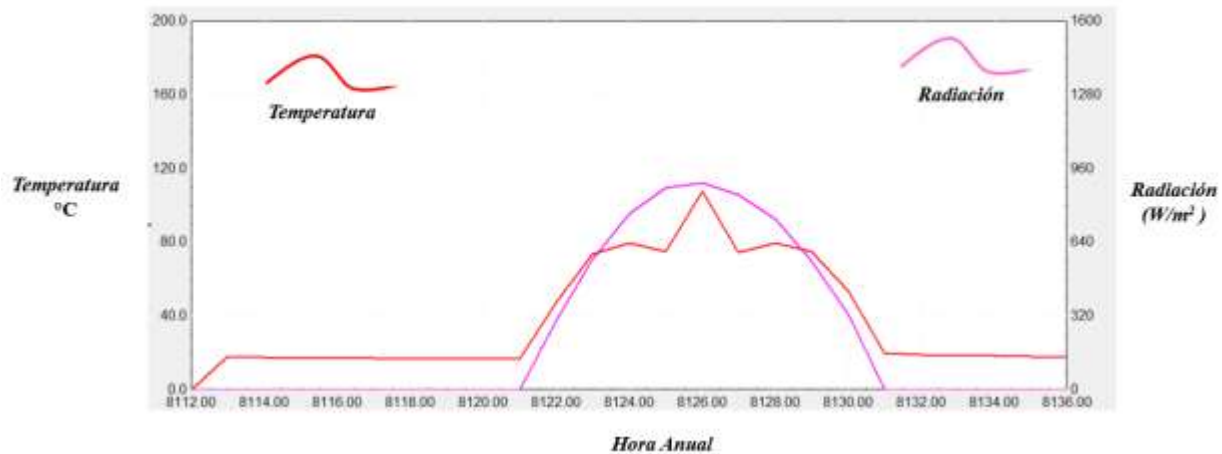


Figura 56. Perfil de temperatura del flujo de agua en la salida del colector solar y radiación incidente el día 5 de diciembre en Mexicali.

De acuerdo con Aguilar-Jiménez, J. A., el costo del colector solar de tubos evacuados es de \$134 USD/m². Con el área seleccionada el costo total del campo solar es de \$294,800 MXN. El ahorro promedio anual del 10 % en la caldera representan 166,440 kWh anuales, este valor se traduce en \$243,107.74 MXN, con la tarifa industrial de gran demanda media tensión horaria (GDMTH). Otro factor importante es que la demanda máxima disminuirá, lo cual de igual forma impacta en la tarifa. Sin considerar un análisis riguroso de ingeniería económica y contemplando únicamente el costo del área de captación, la amortización únicamente de los colectores solares se daría en un año operativo.

5. Conclusiones

En Baja California existen residuos tales como cáscara de naranja (CN) y hoja de eucalipto con potencial de utilización en forma de materia prima en un proceso de extracción de aceites esenciales. En 2019 se cosecharon 3,800 toneladas de naranja en el 2019, generando 1,330 toneladas de cáscaras de naranja con potencial de utilización.

Mediante la simulación en Aspen Plus[®] se estimó el procesamiento de 116.8 toneladas anuales de CN, que representa el aprovechamiento del 8.78 % del residuo de CN generado. Por otra parte, Baja California cuenta con 135 ha de árboles de eucalipto, que generan 553.5 toneladas anuales de hojas de eucalipto (HE), con el procesamiento de 292 toneladas anuales de HE, este residuo se aprovecha en un 53%.

El proceso en ASPEN PLUS[®] está constituido por recipientes de extracción, caldera, intercambiadores de calor, decantadores, columnas de destilación y una torre de enfriamiento. A dicho proceso se le alimentan 40 kg/h de cáscara de naranja y 100 kg/h de hoja de eucalipto para obtener 0.87 L/h de AEN al 97% en peso de limoneno y 1.408 L/h de AEE al 75% en peso de 1,8 cineol, respectivamente.

Por cada extracción realizada se suministran 3,223 L/h de agua de enfriamiento para condensar el AEN y 8,227 L/h para condensar el AEE. De estas corrientes se genera un calor residual que puede ser aprovechable, por ello el 9.7% del flujo se recircula como corriente de entrada al hidrodestilador de AEN en las siguientes extracciones, generando una reducción del gasto energético del 7.81% por extracción, esto se traduce en un ahorro de 105 kW diarios. El flujo restante posteriormente se enfría en una torre de enfriamiento para su continuo aprovechamiento en extracciones posteriores.

El IET del proceso de AEN fue de 202.1 kWh/L y 579 kWh/L para AEE. Las relaciones solvente/material vegetal que produjeron el mayor rendimiento de aceite esencial fueron de 6:1 para el proceso de AEN y 8:1 para AEE. La temperatura del hidrodestilador de AEN fue de 140 °C y 125 °C a la salida de la caldera del proceso de AEE. Los intercambiadores de calor logran que el aceite esencial alcance 40 °C a la entrada de los decantadores.

Los resultados en TRNSYS indican que el acoplamiento de 25 colectores solares (110 m² de captación solar) permite obtener las temperaturas promedio de 75-85 °C, donde esta variación se

encuentra en función de las condiciones climáticas del año. Con estos valores se obtiene un ahorro energético promedio anual del 10% en la caldera para la generación de vapor en el proceso de extracción de AEE. Se considera una alternativa atractiva para disminuir la carga energética del proceso.

Existen pocas publicaciones de simulaciones de procesos de extracción de aceite esencial con integración de energía solar. Por ello se hicieron comparaciones de índices energéticos totales y rendimientos de extracción con trabajos experimentales. Se observó que el rendimiento del trabajo de referencia se encuentra ligeramente por debajo del valor obtenido en la presente investigación, con 0.0192 litros de AEN por kilogramo de CN frente a 0.02175 litros de AEN por kilogramo de CN. EL IET del trabajo citado se encuentra en 553.84 kWh/L. En el caso del proceso de obtención de AEE se calculó un IET de 368 kWh/L que corresponden al trabajo de referencia. Dicho valor se encuentra por debajo del obtenido en la simulación, esto se puede explicar debido a que en dicho trabajo agregan el agua de enfriamiento a 25 °C y omiten la adición de un enfriador en la corriente de enfriamiento. El rendimiento del trabajo citado se encuentra en 0.0434 litros de AEE por kilogramo de hoja de eucalipto (HE). Con el fin de comparar resultados, si se decidiera procesar 100 kg/h con idéntica metodología y rendimiento del trabajo de referencia, se obtendrán 4.34 litros de AEE al 25% de 1,8 cineol. Lo anterior representa un 67% más que en la simulación para 100 kg/h (1.408 litros al 75 % de 1,8 cineol). Esto se explica debido a que en la simulación se incorporó una columna de destilación para llevar el AEE al 75 % en 1,8 cineol, dando como resultado un flujo de menor masa pero con una composición mayor de 1,8 cineol.

Como productos de alto valor agregado de las extracciones es posible obtener 2,004.48 litros por año de AEN al 97% de limoneno y 3,244.03 litros por año de AEE al 75% de 1,8 cineol. Lo anterior se traduce en un ingreso de 17,038.08 USD por año por la venta de este producto. En el caso del AEE es posible obtener una retribución de 38,928.36 USD por año.

El trabajo cumple con el objetivo principal, el cual consistió en el diseño de un proceso de extracción de aceite esencial de cáscara de naranja y hoja de eucalipto residual, mediante la simulación en Aspen Plus® con base en la disponibilidad de residuos agroindustriales en la región de Mexicali, Baja California. Así como evaluar la integración de energía solar térmica para satisfacer una fracción de la demanda energética del proceso de extracción de aceites esenciales.

La novedad de este trabajo consistió en el diseño e integración de dos procesos de extracción de aceite esencial simultáneos en Aspen Plus®, así como en la incorporación de un sistema de colectores de tubos evacuados para reducir la carga energética del proceso y la recirculación de agua mediante el software TRNSYS®.

6. Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos en el presente trabajo, se recomienda calcular los costos de capital y de operación, con el fin de obtener otros índices que ayuden a evaluar la escalabilidad y factibilidad económica del proyecto. Finalmente, se recomienda aprovechar el residuo obtenido en la etapa de extracción, como biomasa celulósica, para que con la adición de etapas como hidrólisis y fermentación sea posible la obtención de bioetanol.

7. Referencias

- Abed, K. M., & Naife, T. M. (2018, December). Extraction of Essential Oil from Iraqi Eucalyptus *Camadulensis* Leaves by Water Distillation Methods. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 454, No. 1, p. 012163). IOP Publishing.
- Arroyo Gámez, R. O., & León la Rosa, R. A. (2014). Densidad de carga y método de extracción en el rendimiento y calidad de aceite esencial de los flavedos de dos.
- Ayala, J., Montero, G., Campbell, H., Sagaste, C., León, J., Coronado, M., & Vázquez, A. Modelado para la extracción de aceites esenciales, con limoneno y 1, 8-cineol como productos refinados. *Acad Mex Inves y Doc Ing Quim.* 8 de Mayo del 2015.
- Banegas, D. P. P. (2017). Aprovechamiento de la energía eólica en ambientes urbanos (Doctoral dissertation).
- Barbieri, C., & Borsotto, P. (2018). Essential oils: Market and legislation. Potential of essential oils, 107-127.
- Barragán B, Téllez Y Laguna A. 2008. Utilización de residuos agroindustriales. *Revista Sistemas Ambientales*, 2(1):44-50.
- Batish, D. R., Singh, H. P., Kohli, R. K., & Kaur, S. (2008). Eucalyptus essential oil as a natural pesticide. *Forest ecology and management*, 256(12), 2166-2174.
- Bina, S. M., Jalilinasrabad, S., Fujii, H., & Pambudi, N. A. (2018). Classification of geothermal resources in Indonesia by applying exergy concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 499-506.
- Boukhatem, MN (2020). Hallazgos científicos: el asombroso uso de aceites esenciales y sus terpenos relacionados como conservantes naturales para mejorar la vida útil de los alimentos. *Ciencia de los alimentos. Nutr. Technol*, 5, 00021.
- Burt, S. (2004). Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods—a review. *International journal of food microbiology*, 94(3), 223-253.
- Bustamante, J., van Stempvoort, S., García-Gallarreta, M., Houghton, J. A., Briers, H. K., Budarin, V. L., & Clark, J. H. (2016). Microwave assisted hydro-distillation of essential oils from wet citrus peel waste. *Journal of cleaner production*, 137, 598-605.
- Bustamante, J., van Stempvoort, S., García-Gallarreta, M., Houghton, J. A., Briers, H. K., Budarin, V. L. & Clark, J. H. (2016). Microwave assisted hydro-distillation of essential oils from wet citrus peel waste. *Journal of cleaner production*, 137, 598-605.
- Capuzzo, A., Maffei, M. E., & Occhipinti, A. (2013). Supercritical fluid extraction of plant flavors and fragrances. *Molecules*, 18(6), 7194-7238.
- Cerdá, E. (2012). Energía obtenida a partir de biomasa. *Cuadernos económicos de ICE*, (83).

- Chang, J., Leung, D. Y., Wu, C. Z., & Yuan, Z. H. (2003). A review on the energy production, consumption, and prospect of renewable energy in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7(5), 453-468.
- Chemat, F., Lucchesi, M. E., Smadja, J., Favretto, L., Colnaghi, G., & Visinoni, F. (2006). Microwave accelerated steam distillation of essential oil from lavender: A rapid, clean and environmentally friendly approach. *Analytica Chimica Acta*, 555(1), 157-160.
- Chu, Y., & Meisen, P. (2011). Review and comparison of different solar energy technologies. Global Energy Network Institute (GENI), San Diego, CA.
- Corredor, Y. A. V., & Pérez, L. I. P. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 59-72.
- Da Porto, C., & Decorti, D. (2009). Ultrasound-assisted extraction coupled with under vacuum distillation of flavour compounds from spearmint (carvone-rich) plants: comparison with conventional hydrodistillation. *Ultrasonics sonochemistry*, 16(6), 795-799.
- Dangkulwanich, M. y Charaslertrangsi, T. (2020). Hidrodestilación y propiedades antimicrobianas del aceite de limoncillo (*Cymbopogon citratus*, Stapf): un ejercicio de laboratorio de pregrado que une la química y la microbiología. *Revista de educación en ciencias de los alimentos*, 19 (2), 41-48.
- Dumas, Á. A. (2010). Situación actual y alternativas de exploración y explotación en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC. *Geotermia*, 33.
- El Asbahani, A., Miladi, K., Badri, W., Sala, M., Addi, E. A., Casabianca, H., & Elaissari, A. (2015). Essential oils: from extraction to encapsulation. *International journal of pharmaceutics*, 483(1-2), 220-243.
- Fernández, L. G., & Cervantes, A. (2017). Proyecto de diseño e implementación de un sistema fotovoltaico de interconexión a la red eléctrica en la Universidad Tecnológica de Altamira. Altamira, México.
- Filly, A., Fernandez, X., Minuti, M., Visinoni, F., Cravotto, G., & Chemat, F. (2014). Solvent-free microwave extraction of essential oil from aromatic herbs: from laboratory to pilot and industrial scale. *Food chemistry*, 150, 193-198.
- García, C., Montero, G., Coronado, M. A., Valdez, B., Stoytcheva, M., Rosas, N., & Sagaste, C. A. (2017). Valorization of Eucalyptus leaves by essential oil extraction as an added value product in Mexico. *Waste and biomass valorization*, 8(4), 1187-1197.
- García-Gutiérrez, A., Martínez-Estrella, J. I., Ovando-Castelar, R., Canchola-Félix, I., & Jacobo-Galván, P. (2019, July). Balance de energía de la red de transporte de vapor del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, BC. In *Mexican Geothermal Congress*.
- González, J. Á., Murias, M. B., Merino, A., & Soalleiro, R. R. (2005). Estimación de la biomasa arbórea de *Eucalyptus globulus* y *Pinus pinaster* en Galicia. *Recursos Rurais*, (1), 21-30.

- Guerrero R y Valenzuela L. 2011. Agroindustria y medio ambiente. Trilogía. Ciencia Tecnología Sociedad, 23(33):63-83.
- IRENA, S. (2016). The power to change: solar and wind cost reduction potential to 2025.
- John, I., Muthukumar, K., & Arunagiri, A. (2017). A review on the potential of citrus waste for D-Limonene, pectin, and bioethanol production. *International Journal of Green Energy*, 14(7), 599-612.
- Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A., & Kim, K. H. (2018). Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 894-900.
- Kalmikov, A. (2017). Wind power fundamentals. In *Wind Energy Engineering* (pp. 17-24). Academic Press.
- Kannan, N., & Vakeesan, D. (2016). Solar energy for future world:-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1092-1105.
- Kanoğlu, M., Çengel, Y. A., & Cimbalá, J. M. (2020). *Fundamentals and Applications of Renewable Energy*. McGraw-Hill Education.
- Ladero, M. et al. Optimization of the Enzymatic Saccharification Process of Milled Orange Wastes. *Fermentation*, 3, 37 pp.1-14. DOI: 10.3390. MDPI, 2017.
- León Méndez, G., Osorio Fortich, M. D. R., & Martínez Useche, S. R. (2015). Comparación de dos métodos de extracción del aceite esencial de *Citrus sinensis* L. *Revista Cubana de Farmacia*, 49(4), 0-0.
- Leslie, A. D., Mencuccini, M., & Perks, M. (2012). The potential for Eucalyptus as a wood fuel in the UK. *Applied Energy*, 89(1), 176-182.
- Mahakarnchanakul, W., & Weiss, J. (2004). Antimicrobial activity of ultrasound-assisted solvent-extracted spices. *Letters in Applied Microbiology*, 39(5), 401-406.
- Mahato, N., Sharma, K., Koteswararao, R., Sinha, M., Baral, E. & Cho, M.H. (2017). Citrus essential oils: extraction, authentication and application in food preservation. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*.
- Mandal, V., Mohan, Y. y Hemalatha, S. (2007). Extracción asistida por microondas: una herramienta de extracción innovadora y prometedor para la investigación de plantas medicinales. *Revisión de farmacognosia*, 1 (1), 7-18.
- Mekhilef, S., Saidur, R., & Safari, A. (2011). A review on solar energy use in industries. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(4), 1777-1790.
- Morales, P., Gentina, J. C., Aroca, G., & Mussatto, S. I. (2017). Development of an acetic acid tolerant *Spathaspora passalidarum* strain through evolutionary engineering with resistance to inhibitors compounds of autohydrolysate of *Eucalyptus globulus*. *Industrial Crops and Products*, 106, 5-11.

- Moreno, J., López, G., & Jara, R. S. (2010). Modelación y optimización del proceso de extracción de aceite esencial de eucalipto (*Eucalyptus globulus*). *Scientia Agropecuaria*, 1(2), 147-154.
- Mossi, A. J., Astolfi, V., Kubiak, G., Lerin, L., Zanella, C., Toniazzo, G., & Restello, R. (2011). Insecticidal and repellency activity of essential oil of *Eucalyptus* sp. against *Sitophilus zeamais* Motschulsky (Coleoptera, Curculionidae). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(2), 273-277.
- Munir, A. (2010). Design, development and modeling of a solar distillation system for the processing of medicinal and aromatic plants (Doctoral dissertation).
- Nakamura, A., Hara, Y., & Kawano, T. (2017). Dewatering and extraction of hydrophilic solutes and essential oils from cryo-preserved lemon peels using liquefied dimethyl ether. *Solvent Extraction Research and Development, Japan*, 24(1), 37-45.
- Nielsen, T. R. (2005). Simple tool to evaluate energy demand and indoor environment in the early stages of building design. *Solar energy*, 78(1), 73-83.
- Onechi, C., Consumi, M., Donati, A., Leone, G., Magnani, A., Tamasi, G., & Rossi, C. (2017). Biomass: an overview. In *Bioenergy systems for the future* (pp. 3-42). Woodhead Publishing.
- Ortiz-Sanchez, M., Solarte-Toro, J. C., Orrego-Alzate, C. E., Acosta-Medina, C. D., & Cardona-Alzate, C. A. (2020). Integral use of orange peel waste through the biorefinery concept: an experimental, technical, energy, and economic assessment. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-15.
- Osório, T., Horta, P., & Collares-Pereira, M. (2019). Method for customized design of a quasi-stationary CPC-type solar collector to minimize the energy cost. *Renewable Energy*, 133, 1086-1098.
- P.M. Lemieux, C.C. Lutes y D.A. Santoianni (2004), "Emissions of organic air toxics from open burning: a comprehensive review", *Progress in Energy and Combustion Science*, núm. 30, pp. 1-32.
- Palavras, I., & Bakos, G. C. (2006). Development of a low-cost dish solar concentrator and its application in zeolite desorption. *Renewable Energy*, 31(15), 2422-2431.
- Pant, M., Dubey, S., Patanjali, P. K., Naik, S. N., & Sharma, S. (2014). Insecticidal activity of eucalyptus oil nanoemulsion with karanja and jatropha aqueous filtrates. *International biodeterioration & biodegradation*, 91, 119-127.
- Pornpunyapat, J., Chetpattananondh, P. y Tongurai, C. (2011). Modelización matemática para la extracción de aceite esencial de *Aquilaria crassna* por hidrodestilación y calidad del aceite de madera de agar. *Revista de Farmacología de Bangladesh*, 6, 18-24.
- Rafiq, S., Kaul, R., Sofi, S. A., Bashir, N., Nazir, F., & Nayik, G. A. (2018). Citrus peel as a source of functional ingredient: a review. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(4), 351-358.

- Rassem, H. H., Nour, A. H., & Yunus, R. M. (2016). Techniques for extraction of essential oils from plants: a review. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 10(16), 117-127.
- Rios, J. L. (2016). Essential oils: What they are and how the terms are used and defined. In *Essential oils in food preservation, flavor and Safety* (pp. 3-10). Academic Press. Thongson, C., Davidson, P. M.
- Romanik, G., Gilgenast, E., Przyjazny, A., & Kamiński, M. (2007). Techniques of preparing plant material for chromatographic separation and analysis. *Journal of biochemical and biophysical methods*, 70(2), 253-261.
- Romdhane, M., Bendaoud, H., Saadaoui, E., & Elfalleh, W. (2019). A new process for green extraction of essential oil from *Eucalyptus oleosa*: Microwave-assisted hydro distillation. *Arabian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 5(3), 35-46.
- Romdhane, M., Bendaoud, H., Saadaoui, E., & Elfalleh, W. (2019). A new process for green extraction of essential oil from *Eucalyptus oleosa*: Microwave-assisted hydro distillation. *Arabian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 5(3), 35-46.
- Ruiz Galán, J. (2019). Ingeniería básica de una planta de extracción de aceite esencial de “*Mentha arvensis L.*” por destilación de arrastre con vapor.
- Saval, S. (2012). Aprovechamiento de residuos agroindustriales: pasado, presente y futuro. *BioTecnología*, 16(2), 14-46.
- Shaaban, A. M., Antar, M. A., Khalifa, A. E., & El-Shaarawi, M. A. (2020). Analysis of Integrated H₂O–LiBr Absorption Cooling and Single-Effect Evaporation Desalination System. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-12.
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 13(2), 318-345.
- Twidell, J., & Weir, T. (2015). *Renewable energy resources*. Routledge.
- Valdez, I., & Reyes, J. C. (2017). Generación de productos de valor agregado a partir de residuos orgánicos. *Gaceta Instituto de Ingeniería, UNAM*, 1(124), 11-y.
- Vinatoru, M. (2001). An overview of the ultrasonically assisted extraction of bioactive principles from herbs. *Ultrasonics sonochemistry*, 8(3), 303-313.
- Vincekovic, M., Viskic, M., Juric, S. et al. (2017). Innovative technologies for encapsulation of Mediterranean plants extracts. *Trends in Food Science & Technology*, 69, 1–12
- Wilberforce, T., Baroutaji, A., El Hassan, Z., Thompson, J., Soudan, B., & Olabi, A. G. (2019). Prospects and challenges of concentrated solar photovoltaics and enhanced geothermal energy technologies. *Science of the Total Environment*, 659, 851-861.

Yepes, S. M., Naranjo, L. J. M., & Sánchez, F. O. (2008). Valorización de residuos agroindustriales-frutas-en Medellín y el sur del Valle de Aburrá, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín*, 61(1), 4422-4431.

Zheng, J., Tashiro, Y., Wang, Q., Sakai, K., & Sonomoto, K. (2015). Feasibility of acetone–butanol–ethanol fermentation from eucalyptus hydrolysate without nutrients supplementation. *Applied Energy*, 140, 113-119.

8. Otros productos académicos

- 1- Evidencia de registro de cartas de colaboración remunerada, en relación a la obra "Diseño de una planta de extracción de aceite esencial de cáscara de naranja y hoja de eucalipto residual", la cual se encuentra en trámite en INDAUTOR a través del departamento de propiedad intelectual y transferencia (**Autor**).



Mexicali, Baja California a 06 de enero de 2021.

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
PRESENTE. -**

Por este medio hago constar mi participación en la elaboración de la obra intitulada **Diseño de una planta de extracción de aceite esencial de cáscara de naranja y hoja de eucalipto residual** en la rama de obra *literaria*; realizada en coautoría con: **Gisela Montero Alpírez, Conrado García González, Marcos Alberto Coronado Ortega, José Ramón Ayala Bautista, Samuel Lepe de Alba**, misma que fue encomendada por la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) y elaborada en los términos del artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor aquí citada:

Artículo 83. - Salvo pacto en contrario, la persona física o moral que comisione la producción de una obra o que la produzca con la colaboración remunerada de otras, gozará de la titularidad de los derechos patrimoniales sobre la misma y le corresponderán las facultades relativas a la divulgación, integridad de la obra y de colección sobre este tipo de creaciones.

La persona que participe en la realización de la obra, en forma remunerada, tendrá el derecho a que se le mencione expresamente su calidad de autor, artista, intérprete o ejecutante sobre la parte o partes en cuya creación haya participado.

Así como lo dispuesto por los artículos 5, 6, 9, 11 y 23 del *Reglamento de Propiedad Intelectual de la Universidad Autónoma de Baja California*.

Por lo que reconozco que los derechos patrimoniales, así como los correspondientes a la divulgación, integridad de la obra y de colección les pertenecen a la UABC, en virtud de la remuneración que recibí de ésta para su realización.

Hago constar que el contenido de la obra es original, y que la UABC se libera de cualquier responsabilidad respecto de objeciones o controversias sobre la misma.

Firmo de conformidad la presente para los efectos legales y administrativos necesarios, sin que medie vicio alguno que impida su celebración, plena validez y existencia.

Jesús Manuel Armenta Gálvez
Instituto de Ingeniería, Campus Mexicali

- 2- Evidencia de registro de cartas de colaboración remunerada, en relación a la obra "Obtención y evaluación de extractos de la hoja de Neem (*Azadirachta indica*), para aplicaciones antimicrobianas en biodiesel" la cual se encuentra en trámite en INDAUTOR a través el departamento de propiedad intelectual y transferencia (**Coautor**).



Mexicali, Baja California a 06 de enero de 2021.

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
PRESENTE. -**

Por este medio hago constar mi participación en la elaboración de la obra intitulada "**Obtención y evaluación de extractos de la hoja de Neem (*Azadirachta indica*), para aplicaciones antimicrobianas en biodiesel**" en la rama de obra *literaria*, realizada en coautoría con: **Samuel Lepe de Alba, Conrado García González, Marcos Alberto Coronado Ortega, José Ramón Ayala Bautista**, misma que fue encomendada por la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) y elaborada en los términos del artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor aquí citada:

Artículo 83.- Salvo pacto en contrario, la persona física o moral que comisione la producción de una obra o que la produzca con la colaboración remunerada de otras, gozará de la titularidad de los derechos patrimoniales sobre la misma y le corresponderán las facultades relativas a la divulgación, integridad de la obra y de colección sobre este tipo de creaciones.

La persona que participe en la realización de la obra, en forma remunerada, tendrá el derecho a que se le mencione expresamente su calidad de autor, artista, intérprete o ejecutante sobre la parte o partes en cuya creación haya participado.

Así como lo dispuesto por los artículos 5, 6, 9, 11 y 23 del *Reglamento de Propiedad Intelectual de la Universidad Autónoma de Baja California*.

Por lo que reconozco que los derechos patrimoniales, así como los correspondientes a la divulgación, integridad de la obra y de colección les pertenecen a la UABC, en virtud de la remuneración que recibí de ésta para su realización.

Hago constar que el contenido de la obra es original, y que la UABC se libera de cualquier responsabilidad respecto de objeciones o controversias sobre la misma.

Firmo de conformidad la presente para los efectos legales y administrativos necesarios, sin que medie vicio alguno que impida su celebración, plena validez y existencia.

Jesus Manuel Armenta Galvez
Instituto de Ingeniería, Campus Mexicali