16.

FECHA	viernes, 19 de junio de 2020

Señores
UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
BIBLIOTECA
Ciudad

UNIDAD REGIONAL	Seccional Girardot
TIPO DE DOCUMENTO	Trabajo De Grado
FACULTAD	Ciencias Agropecuarias
NIVEL ACADÉMICO DE FORMACIÓN O PROCESO	Pregrado
PROGRAMA ACADÉMICO	**Ingeniería Ambiental**

El Autor(Es):

APELLIDOS COMPLETOS	NOMBRES COMPLETOS	No. DOCUMENTO DE IDENTIFICACIÓN
Tovar Oliveros	Laura Valentina	1070624809

Director(Es) y/o Asesor(Es) del documento:

APELLIDOS COMPLETOS	NOMBRES COMPLETOS
Sandoval Valencia	John Jairo

TÍTULO DEL DOCUMENTO
Una Revisión Bibliográfica De Las Aplicaciones Del Dióxido De Carbono(CO_2) Como Fluido Supercrítico

SUBTÍTULO (Aplica solo para Tesis, Artículos Científicos, Disertaciones, Objetos Virtuales de Aprendizaje)

TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Aplica para Tesis/Trabajo de Grado/Pasantía
Ingeniero Ambiental

AÑO DE EDICION DEL DOCUMENTO	NÚMERO DE PÀGINAS
23/09/2020	125

DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS (Usar 6 descriptores o palabras claves)	
ESPAÑOL	INGLÉS
1. $scCO_2$	$scCO_2$
2. Punto crítico	Critical point
3. Densidad	Density
4. Presión	Pressure
5. Biomimesis industrial	Industrial biomimesis

RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS (Máximo 250 palabras – 1530 caracteres, aplica para resumen en español):
La presente revisión se enfoca en comprender el uso de dióxido de carbono (CO_2) supercrítico en diversas aplicaciones industriales para reducir su concentración en la atmosfera como un precursor del efecto invernadero, fenómeno relacionado con el cambio climático. Teniendo presente que las emisiones de CO_2 han aumentado

vertiginosamente desde la revolución industrial ocasionando un continuo ascenso en la atmosfera, por el contrario,el uso de fluidos supercríticos como una técnica de extracción de aceites vegetales para la producción de biocombustible, plásticos, energías alternativas, entre otros; para la sustitución de solventes orgánicos con el finde obtener una mayor concentración, grado de pureza y rendimiento del extracto. El desarrollo de este escrito, comprende tres capítulos; el primero aborda el potencial del CO_2 como un fluido supercrítico de acuerdo a las ventajas de sus propiedades fisicoquímicas frente otros disolventes; elsegundo se busca interferir en el desarrollo del $scCO_2$ como un insumo de producción sostenible, y el tercer capítulo se infiere en el papel del $scCO_2$ enla industria Colombiana conllevando a la conservación de los servicios ecosistemicos encaminados en la reducción de la huella de carbono en el territorio. Se presenta una compilación de los datos extraídos de artículos científicos y documentos encontrados en las bases de datos Redalyc,Dialnet, Scielo, ScienceResearch, Scopus, Cern Document Server y ScienceDirect.

This review focuses on understanding the use of supercritical carbon dioxide (CO_2) in various industrial applications to reduce its concentration inthe atmosphere as a precursor to the greenhouse effect, a phenomenon related to climate change. Bearing in mind that CO_2 emissions have increased rapidly since the industrial revolution causing a continuous rise in the atmosphere, on the contrary, the use of supercritical fluids as a techniquefor extracting vegetable oils for the production of biofuel, plastics, alternativeenergy, among others; for the substitution of organic solvents in order to obtain a higher concentration, degree of purity and yield of the extract. The development of this writing, includes three chapters; the first addresses the potential of CO_2 as a supercritical fluid according to the advantages of its physicochemical properties over other solvents; the secondseeks to interfere in the development of $scCO_2$ as an input for sustainable production, and the third chapter infers on the role of $scCO_2$ in Colombian industry leading to the conservation of ecosystem services aimed at reducingthe carbon footprint in the territory. A compilation of the data extracted from scientific articles and documents found in the Redalyc, Dialnet, Scielo, ScienceResearch, Scopus, Cern Document Server and ScienceDirect databases is presente

AUTORIZACION DE PUBLICACIÒN

Por medio del presente escrito autorizo (Autorizamos) a la Universidad de Cundinamarca para que, en desarrollo de la presente licencia de uso parcial, pueda ejercer sobre mí (nuestra) obra las atribuciones que se indican a continuación, teniendo en cuenta que, en cualquier caso, la finalidad perseguida será facilitar, difundir y promover el aprendizaje, la enseñanza y la investigación.

En consecuencia, las atribuciones de usos temporales y parciales que por virtud de la presente licencia se autoriza a la Universidad de Cundinamarca, a los usuarios de la Biblioteca de la Universidad; así como a los usuarios de las redes, bases de datos y demás sitios web con los que la Universidad tenga perfeccionado una alianza, son:
Marque con una “X”:

AUTORIZO (AUTORIZAMOS)	SI	NO
1. La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer.	x	
2. La comunicación pública por cualquier procedimiento o medio físico o electrónico, así como su puesta a disposición en Internet.	X	
3. La inclusión en bases de datos y en sitios web sean éstos onerosos o gratuitos, existiendo con ellos previa alianza perfeccionada con la Universidad de Cundinamarca para efectos de satisfacer los fines previstos. En este evento, tales sitios y sus usuarios tendrán las mismas facultades que las aquí concedidas con las mismas limitaciones y condiciones.	X	
4. La inclusión en el Repositorio Institucional.	x	

De acuerdo con la naturaleza del uso concedido, la presente licencia parcial se otorga a título gratuito por el máximo tiempo legal colombiano, con el propósito de que en dicho lapso mi (nuestra) obra sea explotada en las condiciones aquí estipuladas y para los fines indicados, respetando siempre la titularidad de los derechos patrimoniales y morales correspondientes, de acuerdo con los usos honrados, de manera proporcional y justificada a la finalidad perseguida, sin ánimo de lucro ni de comercialización.

Para el caso de las Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, de manera complementaria, garantizo(garantizamos) en mi(nuestra) calidad de estudiante(s) y por ende autor(es) exclusivo(s), que la Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía en cuestión, es producto de mi(nuestra) plena autoría, de mi(nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi(nuestra) creación original particular y, por tanto, soy(somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro (aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos de la Tesis o Trabajo de Grado es de mí (nuestra) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.

Sin perjuicio de los usos y atribuciones otorgadas en virtud de este documento, continuaré (continuaremos) conservando los correspondientes derechos patrimoniales sin modificación o restricción alguna, puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún

caso conlleva la enajenación de los derechos patrimoniales derivados del régimen del Derecho de Autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, *"Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores"*, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables. En consecuencia, la Universidad de Cundinamarca está en la obligación de RESPETARLOS Y HACERLOS RESPETAR, para lo cual tomará las medidas correspondientes para garantizar su observancia.

NOTA: (Para Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía):

Información Confidencial:

Esta Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, contiene información privilegiada, estratégica, secreta, confidencial y demás similar, o hace parte de la investigación que se adelanta y cuyos resultados finales no se han publicado.
SI _x__ **NO** ___.
En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos), en carta adjunta tal situación con el fin de que se mantenga la restricción de acceso.

LICENCIA DE PUBLICACIÒN

Como titular(es) del derecho de autor, confiero(erimos) a la Universidad de Cundinamarca una licencia no exclusiva, limitada y gratuita sobre la obra que se integrará en el Repositorio Institucional, que se ajusta a las siguientes características:

a) Estará vigente a partir de la fecha de inclusión en el repositorio, por un plazo de 5 años, que serán prorrogables indefinidamente por el tiempo que dure el derecho patrimonial del autor. El autor podrá dar por terminada la licencia solicitándolo a la Universidad por escrito. (Para el caso de los Recursos Educativos Digitales, la Licencia de Publicación será permanente).

b) Autoriza a la Universidad de Cundinamarca a publicar la obra en formato y/o soporte digital, conociendo que, dado que se publica en Internet, por este hecho circula con un alcance mundial.

c) Los titulares aceptan que la autorización se hace a título gratuito, por lo tanto, renuncian a recibir beneficio alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente licencia y de la licencia de uso con que se publica.

d) El(Los) Autor(es), garantizo(amos) que el documento en cuestión, es producto de mi(nuestra) plena autoría, de mi(nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi (nuestra) creación original particular y, por tanto, soy(somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro(aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos es de mí (nuestro) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.

e) En todo caso la Universidad de Cundinamarca se compromete a indicar siempre la autoría incluyendo el nombre del autor y la fecha de publicación.

f) Los titulares autorizan a la Universidad para incluir la obra en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

g) Los titulares aceptan que la Universidad de Cundinamarca pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

h) Los titulares autorizan que la obra sea puesta a disposición del público en los términos autorizados en los literales anteriores bajo los límites definidos por la universidad en el “Manual del Repositorio Institucional AAAM003”

i) Para el caso de los Recursos Educativos Digitales producidos por la Oficina de Educación Virtual, sus contenidos de publicación se rigen bajo la Licencia Creative Commons: Atribución- No comercial- Compartir Igual.

j) Para el caso de los Artículos Científicos y Revistas, sus contenidos se rigen bajo la Licencia Creative Commons Atribución- No comercial- Sin derivar.

Nota:
Si el documento se basa en un trabajo que ha sido patrocinado o apoyado por una entidad, con excepción de Universidad de Cundinamarca, los autores garantizan que se ha cumplido con los derechos y obligaciones requeridos por el respectivo contrato o acuerdo.

La obra que se integrará en el Repositorio Institucional, está en el(los) siguiente(s) archivo(s).

Nombre completo del Archivo Incluida su Extensión (Ej. PerezJuan2017.pdf)	Tipo de documento (ej. Texto, imagen, video, etc.)
1. Una Revisión Bibliográfica De Las Aplicaciones Del Dióxido De Carbono (CO2) Como Fluido Supercrítico.pdf	Texto
2.	
3.	
4.	

En constancia de lo anterior, Firmo (amos) el presente documento:

APELLIDOS Y NOMBRES COMPLETOS	FIRMA (autógrafa)
Tovar Oliveros Laura Valentina	

21.1-51.20

Una Revisión Bibliográfica De Las Aplicaciones Del Dióxido De Carbono (CO2) Como Fluido Supercrítico

LAURA VALENTINA TOVAR OLIVEROS

CODIGO. 363215173

UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL

GIRARDOT

2020

Una Revisión Bibliográfica De Las Aplicaciones Del Dióxido De Carbono (CO2) Como Fluido Supercrítico

Laura Valentina Tovar Oliveros

Director

John Jairo Sandoval Valencia

Ph. D en Química

Monografía sometida a evaluación para optar al título de Ingeniera de Ambiental

UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL

GIRARDOT

2020

Dedicatoria

Los días pasarán, los años vendrán, pero en mi corazón siempre estarás; para mí estrella fugaz, mi ángel guardián y el rey de mi corazón mi abuelo Gilberto. El mejor abuelo y padre del mundo, sus enseñanzas y lecciones quedaran plasmadas en mi memoria, doy gracias a Dios por el tiempo que compartí contigo y el honor de ser tu nieta. A mi abuelita Bibiana, la mujer más valiente, fuerte y audaz con un amor incondicional de madre para luchar contra la propia vida, aunque los recuerdos se borren siempre ese amor te traerá de vuelta. Ni mil rosas o el canto de mil toches me alcanzaran para darte las gracias por ser una excelente madre para mí. Gracias a Dios por concederme el honor de tener a mis abuelos, ambos prometieron que el día que uno faltara en vida, el otro resistiría cualquier enfermedad para acompañarme y enorgullecerse de mis logros. A mi mamá, una mujer maravillosa que inspira fuerza, valentía y tenacidad; el tesoro más valioso que tengo, la luz de mis días, la promotora de todos mis logros y metas, nunca me alcanzara el tiempo para devolver todo el amor y los sacrificios que has realizado desde que nací para convertirme en lo que soy hoy, gracias por creer en mí siempre, tenerme paciencia e impulsarme a ser mejor ser humano y profesional todos los días.

Agradecimientos

Primero que todo a Dios, a la Virgen santísima y Jesús, “Refugio mío, baluarte mío, mi Dios, en quien confió, salmo 91” su amor eterno, compasivo y fiel es la esperanza de este mundo. Nuestro pastor de rebaño, el faro que guía de la oscuridad a la luz, nuestra fortaleza al caminar y el único sendero para seguir, siempre nos encontrara como a una oveja cuando se pierde, porque su amor es tan grande que en sus alas nos protegerá. Desde pequeña he tenido dos personas que siempre me han apoyado, empujado, consentido y como no olvidar sus llamados de atención, mi tío Carlos Rene no tengo palabras sino un infinito amor y agradecimiento, en nuestro lema: Ohana “la familia nunca se abandona”, German, desde pequeña has estado para mí en papel de tío, cuando cometo un error tus llamados de atención me hacen entrar en razón motivándome a ser mejor; a mis dos soportes, los únicos que les doy razón en mi familia. Mi tío Gilberto y mi tía Lyda, mil gracias por escucharme siempre, mis guías, consejeros y aliados en el camino, gracias por enseñarme y brindarme tanto amor, sacarme sonrisas, retarme a superarme todos los días a seguir aprendiendo constantemente; mis dos personas extraordinarias, gracias por enseñarme a ver este mundo de otra manera.

También agradezco el amor infinito de madre de mis tías, Doris, Olga, Ana Ruth; gracias por empujarme, cuestionarme, corregirme y apoyarme en cada decisión que he tomado, gracias por mostrarme el valor ante la vida y estar siempre a mi lado. Mi tío Lisandro, gracias por acompañarme en cada paso, te devolveré aquella manilla que un día ataste a mi mano cuando inicie esta etapa, nuestra promesa cumplida. A mis primos, Ronald, Tatiana, Luisa, Daniel y Camilo por ser mi ejemplo a seguir, cada uno con cualidades únicas y excepcionales. En singular a mis compañeros de aventuras y confidentes, Camilo, Anderson, Omar, Giancarlo y Angélica cada uno un mundo diferente pero especial, una luz en días oscuros.

Agradezco a mi tutor John Jairo Sandoval Valencia, sus palabras, sus lecciones, su paciencia; un gran profesional y ser humano. En especial, a la profesora Vanessa Silenia García Cuello, es muy cierto, que las palabras generan grandes cambios de perspectiva de vida e incentivan a una fuerza personal para un cambio.

Contenido

pág.

Resumen 21

Abstract 22

Introducción 23

Planteamiento del Problema 28

Justificación 31

Objetivos 33

Objetivo General 33

Objetivos Específicos 33

Metodología 34

Estado del Arte 35

Capítulo I: Características Fisicoquímicas del CO_2 Supercrítico 38

1.1 La capacidad del CO_2 como solvente inorgánico 43

1.2 Densidad y Solubilidad. 46

1.3 Difusividad. 48

1.4 Viscosidad. 50

1.5 Constante dieléctrica 51

1.6 Polaridad. 51

1.8 Influencia de la presión sobre la velocidad de reacción 53

1.9 Efectos catalíticos 54

1.10 Reacciones enzimáticas en fluidos supercríticos 55

1.11 Instrumentación básica para procesos de extracción con CO_2 supercrítico 55

Capítulo II: Uso del CO_2 como Insumo en Procesos de Producción Sostenible 61
2.1 Producción de Copolímeros 62
2.2 Obtención de Fármacos 76
2.2.1 *Extracción de Taxus brevifolia con CO_2sc* 77
2.2.2 *Extracción de salicina con CO_2sc* 82
2.2.3. *Extracción de solanesol con CO_2sc* 84
2.2.4 *Obtención de ácidos grasos a partir de semillas frutales con CO_2sc* 87
2.3 Producción de Biocombustible 91
2.3.1 *Obtención de Biodiesel.* 92
2.3.2 *Obtención de Biogás* 97
2.3.3 *Obtención de Bioetanol* 99
Capítulo III: Potencial que Presenta el CO_2sc en Colombia para el Manejo Sostenible de Recursos Naturales 105
3.1 *Extracción de Aceite de Cannabidiol* 106
3.2 *Extracción En Suelos Contaminados Empleando CO_2sc* 112
3.2 *Purificación De Aguas Residuales Empleando CO_2sc* 120
Conclusión 127
Recomendaciones 128
Lista de referencias 129
Apéndice 148
Apéndice A. Empresas comercializadoras de equipos de extracción de supercrítica 148

Lista de tablas

pág.

Tabla 1. Propiedades críticas de los disolventes 41

Tabla 2. Comparación de las propiedades FSC con los líquidos y gases 42

Tabla 3. Ventajas y Desventajas de los fluidos supercríticos 45

Tabla 4. Aplicaciones de copolímeros de policarbonatos alifáticos basados en CO_2sc 71

Tabla 5. Tipos de Contaminación del Suelo 113

Tabla 6. Extracción de PHA's con CO_2sc de Suelos Contaminados 115

Tabla 7. Estudios de procesos de recuperación de suelos con CO_2sc 118

Tabla 8. Procesos de extracción y purificación de aguas residuales con CO_2sc 125

Tabla 9. Empresas que comercializan CO_2sc en distintos procesos industriales 148

Lista de figuras

pág.

Figura 1. Producción por año de investigación con base en fluidos supercríticos 24

Figura 2. Países con más producción bibliográfica de co_2 supercrítico 25

Figura 3. Áreas de estudio para aplicación de fluidos supercríticos 26

Figura 4. El CO_2 un insumo esencial para cumplir los principios de la química verde 36

Figura 5. Diagrama de fases..... 40

Figura 6. Variación de la difusividad en CO_2 en función de temperatura a varias presiones 49

Figura 7. Etapas Operacionales Para El Proceso De Extracción de CO_2sc FSC 56

Figura 8. Pasos del proceso de extracción con FSC con CO_2 59

Figura 9. Propiedades Fisicoquímicas del CO_2..... 60

Figura 10. Extracción de PHA producido por bacterias a través de CO_2sc 65

Figura 11. Estructura de quercetina que muestra la presencia de grupos fenólicos..... 68

Figura 12. Estructura Química de PLA (n) veces 71

Figura 13. Copolímeros obtenidos a partir del CO_2..... 75

Figura 14. Estructura química de la molécula de taxol $C_{47}H_{51}NO_{14}$ 78

Figura 15. Diagrama de fases para la obtención de paclitaxel con CO_2sc 81

Figura 16. Estructura química del Ácido acetilsalicílico ($C_9H_8O_4$)..... 83

Figura 17. Diagrama de extracción de salicina con CO_2sc 84

Figura 18. Estructura química de solanesol ($C_{45}H_{74}O$)..... 85

Figura 19. Obtención de Fármacos utilizando CO_2sc enmarcado en unos procesos de producción sostenible..... 90

Figura 20. Diagrama de extracción de Biodiesel con CO_2sc 94

Figura 21. Proceso de obtención de etanol a partir de caña de Azúcar y CO_2sc..... 102

Figura 22. Proceso de obtención de THC con CO_2sc 109

Figura 23. Ventajas del Cannabis en Colombia..... 111

Figura 24. Proceso de purificación de suelos contaminados con CO_2sc 117

Figura 25. Descripción del CO_2sc frente a la contaminación de aguas residuales 122

Figura 26. Purificación de aguas residuales con CO_2sc..... 124

Lista de apéndices

pág.

Apéndice A. Empresas Comercializadoras de Equipos de Extracción Supercrítica.....146

Resumen

La presente revisión se enfoca en comprender el uso de dióxido de carbono (CO_2) supercrítico en diversas aplicaciones industriales para reducir su concentración en la atmosfera como un precursor del efecto invernadero, fenómeno relacionado con el cambio climático. Teniendo presente que las emisiones de CO_2 han aumentado vertiginosamente desde la revolución industrial ocasionando un continuo ascenso en la atmosfera, por el contrario, el uso de fluidos supercríticos como una técnica de extracción de aceites vegetales para la producción de biocombustible, plásticos, energías alternativas, entre otros; para la sustitución de solventes orgánicos con el fin de obtener una mayor concentración, grado de pureza y rendimiento del extracto.

El desarrollo de este escrito, comprende tres capítulos; el primero aborda el potencial del CO_2 como un fluido supercrítico de acuerdo a las ventajas de sus propiedades fisicoquímicas frente otros disolventes; el segundo se busca interferir en el desarrollo del $scCO_2$ como un insumo de producción sostenible, y el tercer capítulo se infiere en el papel del $scCO_2$ en la industria Colombiana conllevando a la conservación de los servicios ecosistemicos encaminados en la reducción de la huella de carbono en el territorio. Se presenta una compilación de los datos extraídos de artículos científicos y documentos encontrados en las bases de datos Redalyc, Dialnet, Scielo, ScienceResearch, Scopus, Cern Document Server y ScienceDirect.

Palabras Clave: $scCO_2$, Punto crítico, Densidad, presión, Biomimesis industrial.

Abstract

This review focuses on understanding the use of supercritical carbon dioxide (CO2) in various industrial applications to reduce its concentration in the atmosphere as a precursor to the greenhouse effect, a phenomenon related to climate change. Bearing in mind that CO2 emissions have increased rapidly since the industrial revolution causing a continuous rise in the atmosphere, on the contrary, the use of supercritical fluids as a technique for extracting vegetable oils for the production of biofuel, plastics, alternative energy, among others; for the substitution of organic solvents in order to obtain a higher concentration, degree of purity and yield of the extract.

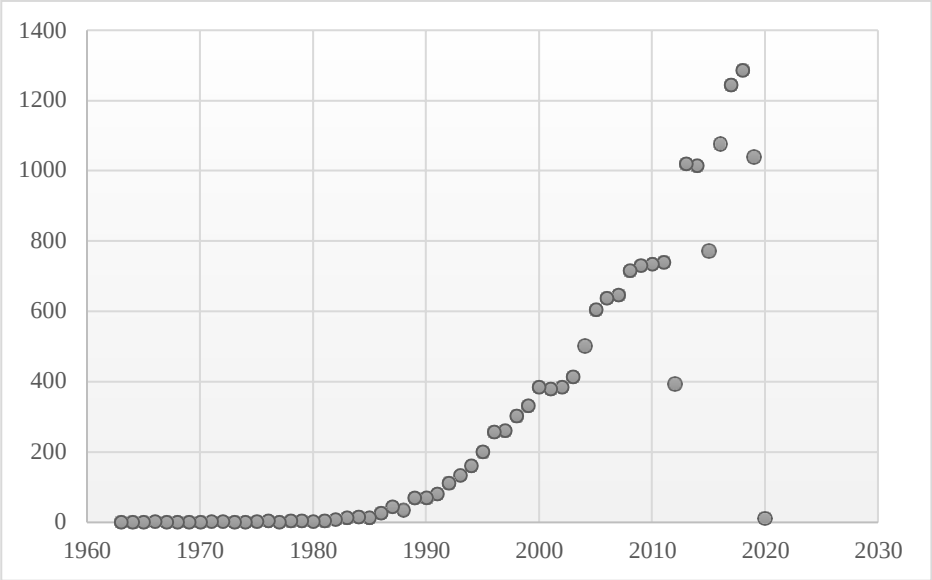
The development of this writing, includes three chapters; the first addresses the potential of CO2 as a supercritical fluid according to the advantages of its physicochemical properties over other solvents; the second seeks to interfere in the development of scCO2 as an input for sustainable production, and the third chapter infers on the role of scCO2 in Colombian industry leading to the conservation of ecosystem services aimed at reducing the carbon footprint in the territory. A compilation of the data extracted from scientific articles and documents found in the Redalyc, Dialnet, Scielo, ScienceResearch, Scopus, Cern Document Server and ScienceDirect databases is presented.

Key Words: scCO2, Critical point, Density, pressure, Industrial biomimesis.

Introducción

Un gas de efecto invernadero (GEI) se explica como el aumento en la absorción de energía de radiación ocasionada por la existencia de gases en la atmósfera como nitrógeno (N_2), oxigeno (O_2), argón (Ar), dióxido de carbono (CO_2) y otros en menor proporción provocando el calentamiento global a causa de las actividades antropogénicas. El contenido de CO_2 en la atmosfera aumenta en un porcentaje del 1% por año, con un nivel actual de 400 partes por millón (ppm), es decir, un 0.040% del volumen total del aire. (Xiaoding y Moulijn, 1996). En la actualidad, el desarrollo industrial de los últimos años ha incrementado la demanda de energía procedente de fuentes fósiles, dicho lo anterior, en relación con el objetivo número tres de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que busca "Satisfacer las necesidades actuales, sin comprometer la capacidad de recursos para las futuras generaciones"; Se deben plantear alternativas viables a partir de la investigación para disminuir la concentración del CO_2 en la atmosfera y su aprovechamiento como materia prima en los diversos procesos industriales.

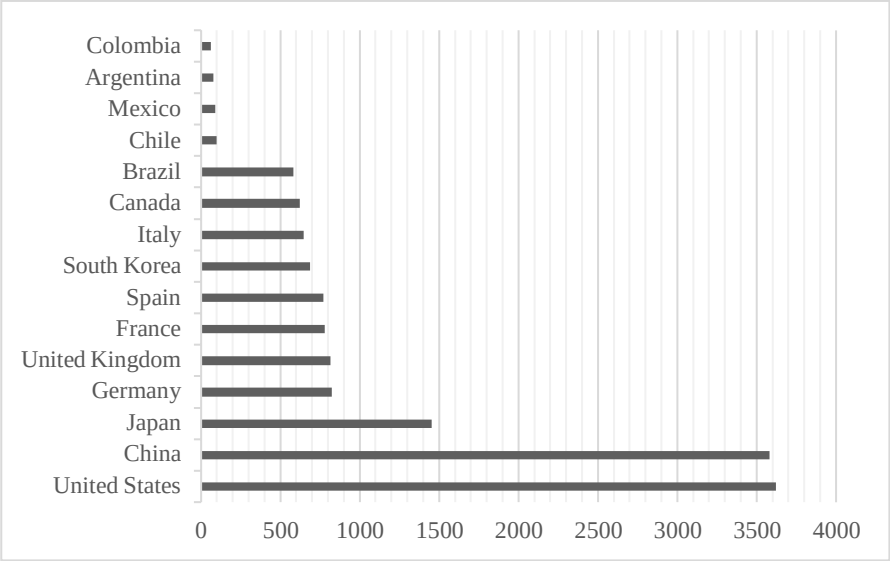
El día 01 de octubre de 2019, en la base de datos Scopus con el título de "supercritical CO_2" aparecen 16896 documentos, de los cuales se obtiene el siguiente análisis, desde el año 1989 como se puede observar en la Figura 1, se inicia de manera constante la generación de conocimiento entorno a esta temática, siendo el año anterior (2018) que presentó mayor productividad científica.



Fuente: Base de datos Scopus. Búsqueda: "supercritical CO_2. 01 de octubre de 2019.

Figura 1. Producción por año de investigación con base en fluidos supercríticos.

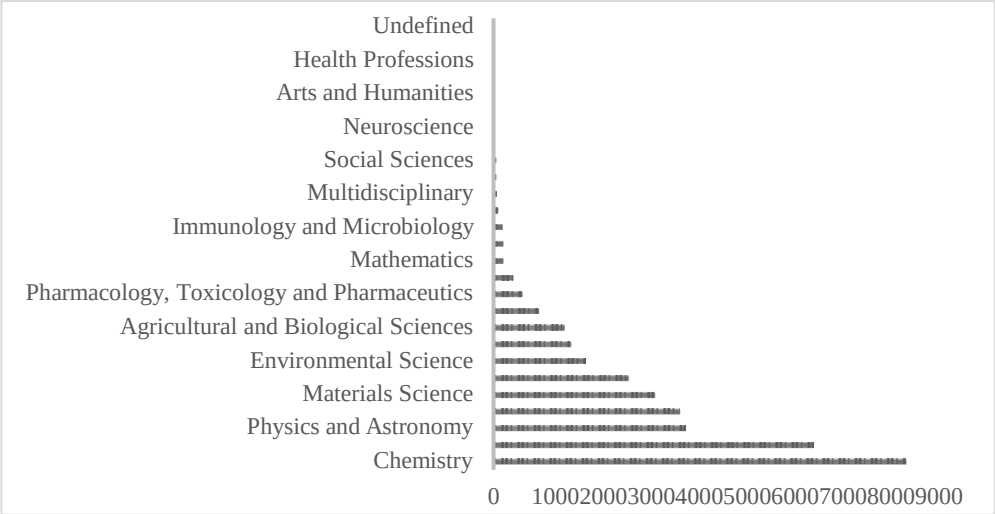
En la siguiente Figura 2, se ilustra un análisis de los países con más producción bibliográfica de CO_2 supercrítico, resaltando Estados Unidos y China, como los países que más publican (21.4 y 21.2% respectivamente), su producción en dicha temática representa aproximadamente el 43% a nivel mundial. En cuanto a los países latinoamericanos la productividad es baja comparada con los países desarrollados, por ejemplo, Brasil presenta el 3,4% y Colombia 0,37%, estos datos indican que existe la necesidad de investigar e implementar el uso del CO_2 en los diversos procesos productivos en países en vía de desarrollo y ricos en biodiversidad.



Fuente: Base de datos Scopus. Búsqueda: "supercritical CO_2. 01 de octubre de 2019.

Figura 2. Países con más producción bibliográfica de co_2 supercrítico.

Como se observa en la Figura 3 a medida que el tiempo avanza las ramas de estudio se van desglosando rumbo diferentes temas de investigación sin poderse limitar a un solo campo de acción, como se puede observar en la gráfica el área de estudio y aplicación de los fluidos supercríticos por parte de la ingeniería ambiental deriva en un 18% presentando una recopilación bibliográfica de 6.385 escritos. En los últimos diez años las investigaciones equivalen a un 80,4% en done las editoriales aportan un 0,5% de información y un 0,92% instituciones chinas como, Academia China de Ciencias, Universidad Xi'an Jiaotong, China del petróleo, Zhejiang, entre otras.



Fuente: Base de datos Scopus. Búsqueda: "supercritical CO_2. 01 de octubre de 2019.

Figura 3. Áreas de estudio para aplicación de fluidos supercríticos.

Según lo anterior, la utilización del CO_2 en los últimos años se ha visto potencializada por sus características fisicoquímicas, permitiendo ser un disolvente a condiciones de temperatura y presión supercríticas. Dada las características del CO_2, se ha planteado en potencializar su uso y sustituir otros compuestos usados en la industria de la refrigeración, tal como los clorofluorocarbonados (CFC), que presentan un considerable efecto en el calentamiento global y hacen parte de aquellas sustancias agotadores del ozono. También el CO_2 podría actuar como disolvente y evitar el uso de compuestos orgánicos volátiles (COVs) como la acetona, el acetonitrilo, el hexano, el metanol, el estireno, el tolueno, entre otros. En este mismo

orden, esta revisión bibliográfica se centra en comprender la importancia del CO_2 supercrítico como un insumo para el desarrollo de diversos procesos industriales y su posible potencial en Colombia como país rico en recursos naturales.

Planteamiento del Problema

En la década de 1960, se manifiesta una sociedad crítica ante el crecimiento económico poblacional e industrial, considerando efectos secundarios de una producción masiva de bienes y servicios, entre ellos, posibles escenarios ambientales motivadores a un cambio del metabolismo de la sociedad (Lianghu et al., 2014). Un reto importante se basa en convertir las economías industrializadas en sistemas industriales sustentables demandando la integración de las actividades humanas con los sistemas fisicoquímicos y biológicos del planeta. Teniendo presente la cronología de las industrias a nivel global, desde la era de hierro la época que marco un cambio y aceleró el desarrollo de la humanidad hacia una revolución industrial, conocida directamente por el incremento en la producción y transporte, pero principal responsable de la disminución de la calidad del aire.

El nacimiento del pensamiento biotecnológico en el desenvolvimiento de las industrias en un contexto social global y cambiante determinado por un estado de incertidumbre en lo que se refiere a la cuarta revolución industria en relación con el desarrollo de una biomimesis industrial, una tecnología inspirada en la naturaleza. En ese mismo contexto, la necesidad de procesos limpios y productos seguros se recalca dentro de los ocho objetivos del milenio, garantizar la sostenibilidad y el equilibrio de

las tres esferas para ser viable un desarrollo social, económico y medioambiental (Torres y Mújica, 2004). Actualmente, las emisiones de CO_2 siguen incrementando al mismo tiempo de posibles escenarios futuros con el modelamiento de fenómenos climáticos que deducen una temperatura media de la superficie de la tierra con intervalos que abarca desde 1,1 °C a 6,4 °C (Galán y Garrido, 2012, p.15). Afirma Stocker et al. (2013) que para el año 2100 la temperatura superficial aumente en un valor promedio entre 1 ºC y 3,5 ºC, con una elevación asociada del nivel del mar de 15 cm a 95 cm; es decir, presentando una dilatación térmica, en otras palabras el agua al calentarse por el incremento de temperatura producirá que los océanos ocupen más espacio induciendo el aceleramiento del cambio global. A su vez, la destrucción de la capa de ozono estratosférico, por la reactividad a la luz ultravioleta que poseen las moléculas de cluorofluorocarbonados (CFS) o solventes halogenados como el cloformo, tricloroetileno, clorobenceno, entre otros; dichas sustancias permanecen largo tiempo en la troposfera sin sufrir modificaciones hasta llegar a la estratosfera donde reaccionan con el ozono y aceleran su descomposición. Dichas moléculas, además del vapor de agua, el CO_2 y otros gases en menor proporción contribuyen con el efecto de invernadero y el calentamiento global, los gases atmosféricos absorben las radiaciones infrarrojas emitidas por el sol impidiendo el enfriamiento natural del planeta.

Un país en vía de desarrollo es considerado a causa de una economía en estado de transición; sin embargo, cualquier país debe presentar un alto crecimiento de su economía mediante la explotación moderada de sus recursos naturales. Rangel (2005) afirma “la biodiversidad es una fuente significativa de riquezas potenciales en campos como la salud, la agricultura y la biotecnología” (p. 293), en este contexto, la simbiosis industrial es un término que debe ser considerado y puesto en práctica que versa sobre el aprovechamiento total de la materia y la energía para la generación de bienes y servicios indiferentemente si se trata de un subproducto o residuo de un proceso. Por ejemplo, Colombia genera un 0,25% de emisiones de GEI a nivel global (Posada, 2007, p.78) y dichas sustancias, en este caso el CO_2 podría ser utilizado como carbono C1 para la síntesis de moléculas o como disolvente en procesos de extracción, de esta manera: ¿El uso del CO_2sc puede llegar a ser un precursor para el desarrollo de procedimientos sostenibles en Colombia?

Justificación

La propuesta opción de grado en la modalidad monografía, se realizará con el fin de condensar datos de las aplicaciones del CO_2 como fluido supercrítico como un proceso vital para el desarrollo de la humanidad en virtud de solventar un mundo vacío en uno saturado con el fin de equilibrar el impacto ambiental exhibiendo un sistema global de demanda (Riechmann, 2005). Un claro ejemplo es el uso del el CO_2sc para remplazar solventes orgánicos como el pentano, hexano, esteres, halogenados y otras sustancias apolares empleados en la elaboración del el ácido acetilsalicílico (aspirina) o el ácido ascórbico (vitamina C) limitando la generación de residuos y contribuyendo a la obtención de ciclos de producción limpia.

Por ello, es importante realizar investigaciones relacionadas con los fluidos supercríticos aplicados a la industria, en particular utilizando CO_2, con el fin de una disminución del uso de disolventes provenientes del petróleo en procesos de extracción de aceites esenciales, pigmentos, carotenoides antioxidantes, antimicrobianos y sustancias relacionadas que se utilizan para el tratamiento de aguas residuales o la extracción de contaminantes en el suelo (Beckman, 2004). Por tanto, la presente revisión bibliográfica resalta la importancia que presentaría el CO_2sc en la reducción de la concentración de CO_2 si se implementa las tecnologías mencionadas y enfatiza la contribución del el CO_2sc para el desarrollo sostenible en Colombia y el

correcto aprovechamiento de los recursos naturales, particularmente de la flora y la extracción de metabolitos para distintas aplicaciones.

Objetivos

Objetivo General

Estudiar teóricamente el potencial del dióxido de carbono (CO_2) como fluido supercrítico.

Objetivos Específicos

1) Realizar una exploración teórica de las características fisicoquímicas del CO_2.
2) Analizar de forma teórica el uso del CO_2 como insumo en procesos de producción sostenible.
3) Definir el potencial que presenta el CO_2 en Colombia para el manejo sostenible de recursos naturales.

Metodología

La presente revisión se concibió desde un enfoque cualitativo con un alcance exploratorio, de acuerdo con la recopilación de datos mediante el uso de buscadores bibliográficos como Redalyc, Dialnet, Scielo, ScienceResearch, Scopus, Cern Document Server y ScienceDirect. Por otra parte, se utilizó las bases de datos institucionales, los servicios de la biblioteca, tal como el repositorio institucional, búsqueda de libros físicos y electrónicos ubicados en la Seccional Girardot o mediante la solicitud de préstamo de ejemplares entre sedes o instituciones aliadas. La información se administró con el gestor bibliográfico Mendeley de libre acceso. Toda la búsqueda e interpretación de la bibliografía, se concentra en tres apartados: El capítulo I describe las características fisicoquímicas del CO_2 supercrítico. Seguidamente, es importante identificar los usos convencionales del CO_2 (en la industria moderna) como insumo en procesos de producción sostenible, por último, es necesario indicar el potencial que presenta el CO_2sc en Colombia para el Manejo Sostenible de Recursos Naturales.

La recopilación de dichas temáticas tiene como objetivo realzar las virtudes del dióxido de carbono como insumo y no como una constante problemática ambiental. Por lo tanto, las ciencias aplicadas y la ingeniería ambiental juegan un papel determinante para la correcta gestión de la materia en todos sus aspectos.

Estado del Arte

En las últimas tres décadas, la química verde se convierte en un papel clave para la investigación y establecimiento de las condiciones necesarias para alcanzar un desarrollo sustentable a través de la disminución de las fuentes de contaminación como combustibles fósiles, pesticidas, residuos industriales o domésticos promoviendo procesos limpios como el CO_2 que va enlazado al cumplimiento de los doce principios verdes, como se ilustra en la Figura 4, presentando distintas ventajas, desde la eliminación de solventes en las reacciones hasta la mayor selectividad en la formación de productos como solución a los desafíos del desarrollo industrial (Prado, 2003). Actualmente, se exploran muchas alternativas en el remplazo de metodologías convencionales como, por ejemplo, la obtención de fármacos u otras materias primas para la disminución de residuos en sus procesos. Teniendo presente que cada año, se emiten a la atmósfera más de veinte millones de toneladas de residuos de disolventes orgánicos (Farias, Cavalcante y Ufrj, 2019, p.2), lo que provoca, la potenciación de GEI, como los clorofluorocarbonos (CFCs), principales causantes del agujero en la capa de ozono troposférico.

Por lo tanto, reducir el uso de solventes orgánicos o reemplazarlos con otros menos tóxicos hace parte del objetivo número tres de la química verde. Cabe señalar

que los solventes de los procesos petroquímicos aún tienen costos comparativamente más bajos, sin embargo, los solventes verdes se han convertido en una alternativa viable para reemplazar los solventes orgánicos y minimizar los impactos socioambientales. Las propiedades inherentes de los fluidos en particular de CO_2 le confieren la característica de un solvente limpio; es una molécula de gran valor para obtener ingredientes (colorantes naturales, aromas, esencias) y principios activos (vitaminas, antioxidantes, aceites esenciales, etc.) a partir de fuentes naturales, con índices de pureza y rendimiento altísimos.

Fuente: autoría propia

Figura 4. El CO_2 un insumo esencial para cumplir los principios de la química verde.

El CO_2sc es una herramienta esencial para el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) encaminados por la química verde; se puede decir, que es

la molécula del futuro, contribuyendo a la creación de nuevas rutas sintéticas con un bajo impacto ambiental promoviendo una economía circular a nivel industrial. En un país, en vía de desarrollo como Colombia y potencia de recursos naturales, presentaría un papel crucial para la conservación y regulación de los servicios ecosistemicos en el territorio, sin afectar a las generaciones futuras.

Capítulo I: Características Fisicoquímicas del CO_2 Supercrítico

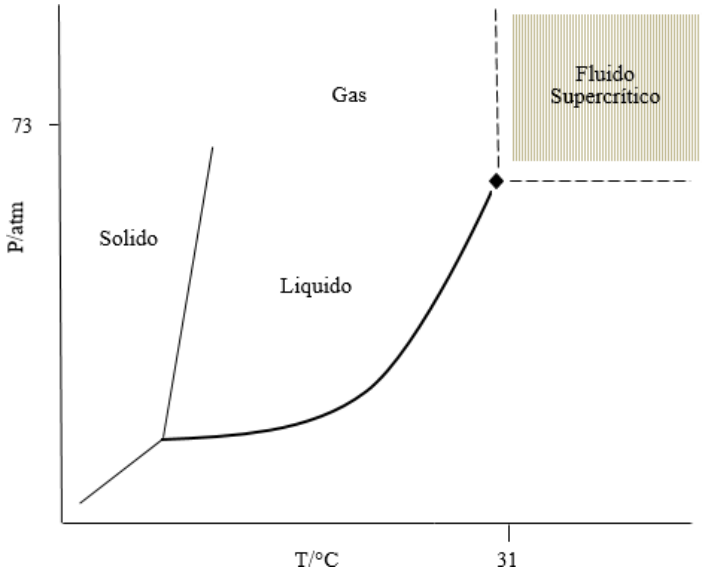
A lo largo del tiempo se ha realizado investigaciones, acerca de la captura, transporte y almacenamiento de CO_2 (CACs), como resultado de la separación del CO_2 producido en distintos procesos hasta obtener una corriente de gases con una concentración elevada de CO_2 para comprimirlo y transportarlo hasta el lugar donde vaya a ser almacenado de forma definitiva. Esta estrategia incluye, entre otras, la utilización industrial del CO_2 y la fijación del CO_2 en biomasa, mediante procesos naturales o a través de novedosos procesos, centrados en la química verde, una dirección para minimizar el impacto ambiental causado por las actividades industriales que generan algún tipo de desecho sin un tratamiento adecuado al final de la línea de producción (Lenardão et al., 2003). Por ejemplo, la fotosíntesis en las plantas, que consiste principalmente en fijar el carbono para producir carbohidratos y oxígeno, es entonces el CO_2 una potencial materia prima para generar otras sustancias de interés industrial. Así entonces, la biomímesis logra aportar elementos significativos para la preservación de los ecosistemas y por supuesto garantizando la calidad de vida de los seres humanos. (Iguarán y Ramirez, 2016).

Según lo anterior, la utilización del CO_2 en los últimos años se ha visto potencializada debido a la incursión en la técnica de extracción con fluidos supercríticos (SFE) por los científicos Hogarth y Hannay (1879) observando las

propiedades fisicoquímicas como solventes mediante un estudio de solubilidad de sólidos en los gases. En el año 1960, esta técnica comenzó a ser investigada como una alternativa de los métodos convencionales por el químico alemán *Ludwing Roselius* para remplazar el cloruro de metileno en la extracción de café utilizando dióxido de carbono en estado supercrítico (CO_2sc). Y uno de sus estudios se basó en la extracción de resinas de lúpulo "*Humulus lupulus*", componentes responsables del sabor amargo de la cerveza (Sahena et al., 2009)

Un fluido supercrítico (FSC), se considera un cuasi-estado de la materia por el comportamiento de sus propiedades simulando dos estados de agregación. En la Figura 5, se ilustra el equilibrio de fases de los tres estados de la materia separados por líneas representando los equilibrios: fusión (solido-liquido, solido-gas), sublimación (liquido-gas) o de vaporización; coexistiendo en un punto triple en donde conviven estos estados brindando la capacidad como solvente verde. Es decir, cuando un compuesto está confinado a un espacio específico, el gas y el líquido están en equilibrio entre sí. Al calentar el sistema, las propiedades intrínsecas de ambos convergen en el mismo punto hasta que son idénticas (Carrilho, Tavares y Lanças, 2001), por ejemplo, densidad, viscosidad, conductividad térmica, etc. Este punto se llama punto crítico y finaliza la interfaz gas-líquido, ya que desde este punto hay una sola fase supercrítica. A nivel industrial, son aquellos que no requieren presiones ni

temperaturas demasiado elevadas, y por lo tanto costosas de alcanzar (Meng et al., 2019).



Fuente: tomado de (Carrilho, Tavares y Lanças, 2001).

Figura 5. Diagrama de fases

En la Tabla 1, se presentan las propiedades críticas de solventes observando cómo varían los parámetros críticos, tanto la temperatura como la presión y la densidad crítica para las diferentes sustancias. La mayoría de estas sustancias tienen temperaturas críticas muy por encima de la temperatura ambiente, excepto CO_2, N_2O y C_2H_6, lo que hace que su manejo como FSC sea más complejo. En todos los casos las presiones críticas son siempre superiores a la presión atmosférica. Como en el caso de los disolventes halogenados, con una densidad crítica bastante pareja, aunque

su presión crítica es bastante variable en comparación con los disolventes orgánicos, donde aumenta su temperatura crítica, pero con una densidad semejante. Se interfiere que una gran parte de los disolventes como los hidrocarburos mantienen una densidad crítica a un mismo nivel, al igual que la presión crítica mientras que la temperatura crítica aumenta claramente el número de carbonos (Sala, 1996, p.32).

Tabla 1. Propiedades críticas de los disolventes

	Disolvente	**Tc (°C)**	**Pc (bar)**	**ρC (g/mL)**
	NO_2	158	98,7	0,27
	SO_2	157	76,8	0,52
Inorgánico	N_2O	36,5	70,6	0,45
	CO_2	**304.18**	**7.380**	**10.6**
	NH_3	132,5	110	0,23
	H_2O	374,2	215	0,32
Hidrocarburos	Metano(CH_4)	-82	46	0,169
	Etano(C_2H_6)	32,3	47,6	0,2
	Propano(C_3H_8)	96,7	42,4	0,22
	Hexano	234,2	28,9	0,23
	Benceno	288,9	98,7	0,302
	Tolueno	319	41,1	0,292
Alcoholes	Metanol(CH_4O)	239	78,9	0,27
	Etanol(C_2H_6O)	243,4	72	0,276
	Acetona(CH_3COCH_3)	235	47	0,25
Esteres	Dietileter	193,6	63,8	0,267
	Etilmetileter	164,7	47,6	0,272
Hidrocarburos Hal	Trifluorometano	26	46,9	0,52

Disolvente	Tc (°C)	Pc (bar)	ρC (g/mL)
Diclorodifluorometano	111,7	109,8	0,558

Fuente: tomado de (De Castro, Valcárcel y Tena, 1994).

De acuerdo con la Tabla 2, se deduce un rango de densidad de 100 a 1000 veces menor de los FSC en comparación al estado gaseoso; estos fluidos posen un alto coeficiente de difusión y viscosidad más baja que los líquidos generando una ausencia de tensión superficial permitiendo una extracción rápida al momento de la penetración en el interior de los poros de la matriz. De manera semejante la selectividad durante el proceso de extracción se alcanza a manipular dada la variación de las diferentes condiciones de temperatura y presión, afectando la solubilidad de varios componentes en el fluido supercrítico. Al usar CO_2 como disolvente, que simplemente se evapora después de la separación, se reduce el desperdicio de solvente y, por lo tanto, se minimizan los costos para la eliminación de desperdicios orgánicos. Al mismo tiempo, la ventaja de la purificación preparativa o posterior aclaración de la estructura es que los compuestos aislados usando FSC solo se concentran en pequeñas cantidades de líquido. Esto significa que la evaporación costosa y lenta de los aislamientos se puede completar mucho más rápido.

Tabla 2. Comparación de las propiedades FSC con los líquidos y gases

Propiedad	Gas	FSC	Liquido
Densidad, (Kg/m^{-3})	$(6 – 20) \times 10^{-3}$	200 – 900	600 – 1600

Propiedad	Gas	FSC	Liquido
Coeficiente de difusión, (m2 /s)x109	0,1 – 0,4	(0.2 – 0.7) $\times 10^{-3}$	(0.2 – 2.0) $\times 10^{-5}$
Viscosidad 10^{-3} Pa .s	(1 – 3) $\times 10^{-2}$	(1 – 9) $\times 10^{-2}$	0.2 – 3.0

Fuente: tomado de (Kröber y Teipel, 2003).

Aclarando que los procesos que emplean FSC son, en general, más caros que los convencionales debido al costo de la etapa de compresión y del confinamiento. Sin embargo, es parcialmente compensado en el caso del CO_2 debido a su bajo costo en el resultado de su abundancia, facilidad de obtención y recuperación, compensando en parte los mayores costos del equipamiento necesario para comprimirlo y retenerlo en ese estado.

1.1 La capacidad del CO_2 como solvente inorgánico.

La evolución de los disolventes orgánicos, comienza con los hidrocarburos (derivados del petróleo y de los alcoholes) presentando inaccesibles costos, limitaciones por su alta inflamabilidad siendo muchas veces no eficaces al momento de extraer un compuesto. Así como los hidrocarburos, los alcoholes presentan riesgos para la salud humana y un impacto ambiental debido a su toxicidad y reactividad, requieren un alto consumo de energía para su aislamiento o síntesis, por ejemplo, la producción de alcohol etílico mediante fermentación y posterior destilación, la síntesis de halogenuros de carbono (cloroformo y cloruro de carbono), entre otros. A pesar de la obtención de nuevos disolventes seguían presentando toxicidad, como una segunda opción la industria utilizo los fluorocarbonados (CFC) a causa de su degradación en la troposfera y volatilidad capaz de llegar a la estratosfera, filtrando la

mayor parte de radiación ultravioleta, generando radicales libres con un elevado potencial de oxidación capaz de destruir la capa de ozono. El CO_2 se consideró como un disolvente inorgánico debido a sus enlaces C-O cabe aclarar, que no es considerado como un disolvente orgánico debido a su estructura de enlace C-C o C-H considerando que el CO_2 se vaporiza en un tiempo menor.

En la Tabla 3, se presenta una lista de compuestos considerados precursores para ser manipulados como FSC, con las ventajas y limitaciones que presentan los disolventes inorgánicos con los orgánicos. También, las ventajas del CO_2sc al ser un gas inerte; no presenta toxicidad, inflamabilidad y corrosividad para ser utilizado como solvente verde frente a los retos del siglo XXI para reducir la concentración de CO_2 como GEI, en busca de generar nuevas alternativas en el camino de obtención de bienes y servicios. La única limitación que presenta el CO_2 es su polaridad, pero con el uso de un cosolvente, favorece al momento de efectuar la extracción. Debido, a las ventajas que presenta no es necesario procesos de limpieza subsecuentes al proceso de extracción, puede ser reciclado y ser utilizado nuevamente desde el punto de vista químico. Cabe señalar que es fácilmente separable de solutos. Como infiere Othmer (2000) la distribución de cargas es distorsionada por el campo eléctrico proporcionando información sobre la estructura interna de la molécula, siendo necesario la fuerza de van de Waals para la estabilización molecular con respecto a la fuerza del solvente CO_2 (p.51).

Tabla 3. Ventajas y Desventajas de los fluidos supercríticos

	Inorgánicos				Orgánicos		
Propiedades	**CO_2**	NH_3	H_2O	N_2O	CFC	Hidrocarburos	Alcoholes
Toxicidad	1	0	1	0	1	1	0
Inflamabilidad	1	0	1	0	1	0	0
Coste	1	0	1	1	1	1	1
Reactividad	1	0	0	0	1	1	0
Facilidad de alcanzar condiciones supercríticas	1	0	0	1	1	1	0
Agresividad Medioambiental	1	0	0	0	0	0	0
Gas en condiciones ambientales	1	0	0	1	1	1	0
Polaridad	0	1	0	1	1	0	1
1	Ventaja						
0	Desventaja						

Fuente: adoptado de (Sala, 1996).

Entre los disolventes mencionados anteriormente, para emplearse como un solvente, por ejemplo, la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA), Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA), Administración de Drogas y

Alimentos (GRAS) permitiendo una optimización a los diferentes procesos industriales.

1.2 Densidad y Solubilidad.

La densidad del CO_2 depende directamente de su presión y temperatura, de esta manera, cuando el CO_2 alcanza su punto crítico, tienden a aumentar estos dos últimos componentes, aunque su temperatura permanece constante (isoterma) al inicio disminuyendo la densidad por el aumento de temperatura a una presión constante. Es decir, un pequeño aumento de presión resulta en un fuerte aumento en la densidad del solvente, el poder de disolución de un fluido depende de su densidad, como se explicaba anteriormente incluso aunque se conoce que la densidad de un fluido es altamente influyente en el soluto (Castillo-Peinado y Luque de Castro, 2017).

El poder de disolución de un solvente orgánico es esencialmente independiente de su presión debido a la densidad del líquido no es afectado por esta variable; por otro lado, la densidad de un FSC en este caso CO_2 según (Abdel-Gawwad et al., 2019) puede ser alterado en un amplio rango cambiando la presión, temperatura o ambos debido a estrecha relación entre solubilidad-densidad a una temperatura constante de la disolución de analitos no polares y escasamente polares se verá favorecida por la presión mientras que la de los solutos polares de alto peso molecular será más fácil a altas presiones. Esto permite la extracción secuencial de

grupos o familias de compuestos similares, es un factor a tener en cuenta a la hora de mejorar su selectividad de modo esquemático se pueden citar los siguientes grupos funcionales de los solutos y su efecto beneficioso o adverso sobre su solubilidad (De Castro, Valcárcel y Tena, 1994) como:

Aumentan la solubilidad

- Insaturaciones, es decir, aquella molécula orgánica que contiene al menos un doble enlace carbono.
- Ramificaciones, es decir, el átomo de carbono requiere de cuatro uniones (tetravalencia) a otros átomos, es posible que algunos compuestos se formen con uniones en las que dos átomos de carbono están unidos al mismo átomo.
- Esterificación, es proceso por el cual se sintetiza un éster.

Disminuyen la Solubilidad

- Aumento del Peso Molecular
- Aromaticidad
- Hidroxilos
- Carboxilos
- Halógenos
- Aminas
- Nitroderivados

Con respecto al primer punto, La ley del gas ideales puede usarse para relacionar la presión y la densidad del CO_2sc a una temperatura dada (Brown, Lemay, Bursten y Burdge, 2004). Por lo tanto, la densidad de un fluido supercrítico bajo condiciones de presión y temperatura dadas puede obtenerse de la siguiente expresión:

$$PV = Z \times R \times T \quad \rightarrow \quad P = \frac{M}{V} \quad \rightarrow \quad P = \frac{MP}{RT}$$

Donde:

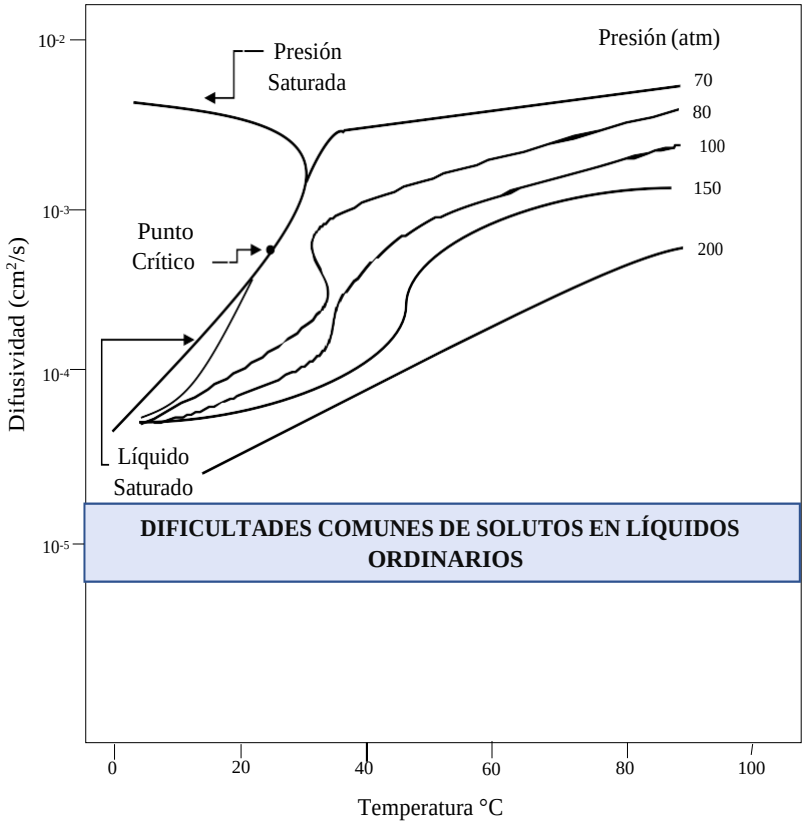
- ✓ V es el volumen molar
- ✓ Z el factor de compresibilidad
- ✓ R el gas constante
- ✓ p la densidad
- ✓ $Z = Z^0 + WZ^1$M el peso molecular

El factor de comprensibilidad Z viene dado por para determinar la densidad basado en el peso del fluido contenido en una celda de extracción de volumen conocido a diversas presiones y temperaturas.

1.3 Difusividad.

En los fluidos supercríticos, se considera que cuanto mayor es el coeficiente de difusión más rápido será la transferencia de masa, además esta propiedad se destaca sobre los líquidos permitiendo un óptimo rendimiento de lixiviación "leaching" y separación cromatografía (Keskin, Kayrak-Talay, Akman, y Hortaçsu,

2007). En la Figura 6, se aprecia la variación de la difusividad del CO_2 en función de temperatura a varias presiones.



Fuente: adoptado de (De Castro, Valcárcel y Tena, 1994).

Figura 6. Variación de la difusividad en CO_2 en función de temperatura a varias presiones.

De acuerdo con la Figura 6, se puede concluir que:

I. La difusividad en un FSC como el CO_2 disminuye con el aumento de la presión.

II. Si aumenta la temperatura, la difusividad también en proximidad del punto crítico.

III. Las pendientes de difusividad-temperatura de acuerdo con las isobaras aumentan al disminuir la temperatura y la presión.

1.4 Viscosidad.

Un fluido (gas, líquido o FSC) depende directamente de la temperatura, mientras que la presión tiene bajo efecto en la viscosidad de los líquidos, pero ocurre lo contrario en los FSC. En el caso del CO_2sc, siempre presentara una variación de la viscosidad acorde a la presión a diferentes grados de temperatura, es decir, a una temperatura constante dada, la viscosidad aumenta con la presión pero sí en cambio disminuye con el aumento de la presión pasando su estado crítico se podría decir que a bajas temperaturas, el aumento de las presiones también resulta en un aumento de la viscosidad del CO_2 en estado supercrítico, llevando a la disminución de la difusión de solutos y fenómenos de transporte, pero también en una mayor solubilidad a través de una menor densidad (Rowlison, 1983, P.138).

1.5 Constante dieléctrica.

La constante dieléctrica es una de las propiedades fisicoquímicas más relevantes para definir la solubilidad en fluidos supercríticos en cambio, en el agua tiene una constante dieléctrica relativamente alta (78 °C a 25 ° C y 1 atm) facilitando la disolución de las cargas de los compuestos iónicos a temperatura ambiente porque disminuye con el aumento de la temperatura y la disminución de la presión; es decir, el agua protege débilmente el potencial electrostático entre iones, por lo que los iones disueltos pueden formar libremente pares de iones (Bruno y Ely,1985). En estas condiciones, el agua supercrítica se comporta como un solvente no polar en lugar de polar, estas propiedades explican en parte su capacidad para disolver compuestos orgánicos no polares. En segunda instancia la constante dieléctrica del CO_2 aumenta con la presión al igual que su densidad (De Castro, Valcárcel y Tena, 1994) pero si se encuentra en un estado muy denso (200 bar y 40°C) en un rango de aprox. 1.5, se asimilaría a un disolvente altamente no polar que es apropiado para disolver sustancias no polares.

1.6 Polaridad.

La polaridad es una de las propiedades más influyentes en la solubilidad, se considera una propiedad física de las moléculas representando la separación de cargas eléctricas dependiendo el número y enlaces que posea (polar o apolar). Según, De Castro, Valcárcel y Tena (1994) cuando se presentan dos cargas de la misma magnitud, una de esas moléculas actúa como un dipolo, en el caso del CO_2, el cual presenta cero dipolos por lo tanto su polaridad es nula. De acuerdo con lo anterior, los FSC se pueden clasificar en: disolventes apolares y poco polares manteniendo temperaturas criticas moderadas, por ejemplo, el N_2O, CO_2, etano, propano, xenón, entre otros presentan un poder de disolución limitado para solutos de alta polaridad o peso molecular, aunque estos solutos son altamente solubles en fluidos polares como el NH_3, cuyo uso puede estar limitado por otros factores como una alta toxicidad o reactividad (p.55).

La escala n*, utilizada para conocer la bipolaridad y polarización, acidez (enlace de hidrogeno-donante, basicidad receptor del enlace hidrogeno), junto las propiedades del disolvente correlacionadas con diferentes interacciones soluto-solvente desarrollado por (Krygowski, Milczarek y Wrona, 1980). También varios fluidos como: CO_2, N_2O, MeOH se han utilizado para comparar las tasas y recuperaciones logradas en la extracción de fluidos supercríticos (SFE) de acuerdo con los resultados iniciales. En conclusión, la polaridad del fluido es el parámetro influyente en la recuperación para la extracción de hidrocarburos aromáticos

policíclicos (HAP), policlorobifenilos (PCB) y nitro-aromáticos (Ashraf-Khorassani, Taylor, y Zimmerman 1990).

1.8 Influencia de la presión sobre la velocidad de reacción.

La dependencia del CO_2 en la presión es directamente proporcional a la velocidad de reacción, presentando dos efectos individuales.

I. La constante de velocidad de reacción *K*

II. Concentración de reactivos

Para una reacción como:

$$A + B \Leftrightarrow M^{*} \rightarrow productos$$

La mayoría de soluciones liquidas requieren cambios de presión para producir cambios grandes en la reacción, sin embargo, pequeños cambios en la presión en las soluciones de CO_2sc dan lugar a variaciones en la constante de velocidad por encima de $30cm^3/mol$ (Bruno y Ely, 1985, p.46). Donde el volumen refleja las diferencias del tamaño molecular entre los reactivos en su estado original y el estado de transición junto con el número de enlaces formados en el estado de transición solvente. En segunda instancia, el efecto de la presión sobre la constante de velocidad está relacionado con el efecto de la presión, la densidad del CO_2sc, así como su difusividad, viscosidad, constante dieléctrica y el poder de disolución (efecto pro-

solvente) donde las perturbaciones permiten aumentar o disminuir *K* (constante de velocidad) para ajustar el conjunto de velocidad o selectividad de la reacción ajustando las propiedades físicas. El comportamiento de *K* se explica por del desplazamiento de M en estado excitado (equilibrio) a un estado de transición, donde la estabilidad juega el rol de aumentar la polaridad del disolvente o codisolvente, como es el caso del CO_2 estabilizando A y B.

1.9 Efectos catalíticos.

El origen de la velocidad de la reacción de los efectos catalíticos se origina de acuerdo con las propiedades del CO_2sc poco comunes por las interacciones con reactivos y el estado de transición, estos sistemas suelen ser “asimétricos” influyendo en el tamaño molecular del solvente y los de los solutos generalmente son bastante diferentes. Al igual que las fuerzas intermoleculares entre el soluto y las moléculas del solvente, pero la relación solvente-molécula son las mismas. Anteriormente, se utilizaba la palabra “cluster” para describir un efecto catalítico debido que las propiedades promedio son consideradas diferentes a los FSC debido a que hay variación alrededor de la molécula de soluto; por ser dinámica al entrar continuamente y salir las moléculas del CO_2 sin aumentar la densidad local. Una ventaja es la agrupación de moléculas presentada por todos los FSC pudiendo alterar

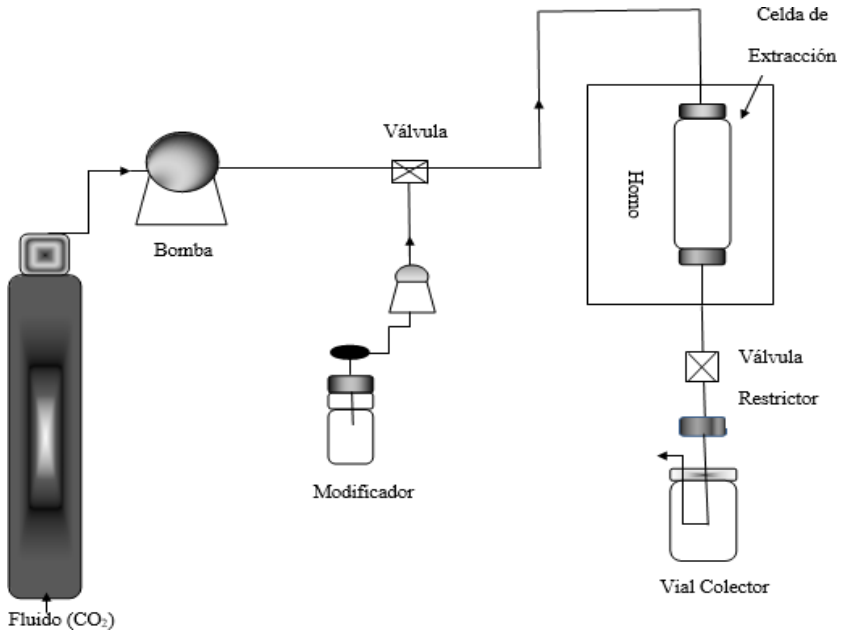
una reacción mediante la reducción de su energía; es decir; mediante la introducción de un catalizador.

1.10 Reacciones enzimáticas en fluidos supercríticos.

Actualmente, el uso de solventes distintos al agua (H_2O) se está evaluando con el CO_2 con relación a la catálisis enzimática; evaluando la interacción en su entorno natural de una enzima en un solvente no acuoso. El CO_2, es considerado más efectivo y reactivo que un solvente acuoso causando una separación más sencilla y enzimas mejoradas permitiendo el procesamiento de sustancias orgánicas termolábiles que se alteran con facilidad por la acción del calor, sin un riesgo de desnaturalización o descomposición térmica reaccionando con un analito para producir algún derivado; es necesario, identificar y cuantificar para evitar un error. Un ejemplo, es la remoción de pesticidas en el suelo y plantas, Ashraf-Khorassani, Taylor, y Zimmerman (1990) afirman que intentar utilizar el N_2O no es aconsejable debido a sus propiedades altamente explosivas en presencia de pequeñas cantidades de compuestos orgánicos, inmediatamente se descompondrá, siendo más factible el uso de CO_2 para ciertos procesos industriales por sus propiedades explicadas anteriormente (p.1179).

1.11 Instrumentación básica para procesos de extracción con CO_2 supercrítico.

La instrumentación necesaria para realizar una extracción con fluidos supercríticos consta esencialmente de un sistema de extracción con una bomba de alta presión, una celda de extracción, una zona para la descomprensión del fluido y un sistema para la recolección de analitos. Como afirma, Valverde (2002) la extracción de FSC con CO_2sc se realiza de forma dinámica o estática (p.148). En la Figura 7, se ilustra un sistema estático debido al proceso desarrollado en la celda de extracción que presuriza el fluido con la válvula de salida cerrada del extractor, una vez finalizada la extracción, la válvula es abierta pasando el fluido con los analitos al colector.



Fuente: adoptado de (Esquível y Bernardo-Gil, 1993).

Figura 7. Etapas Operacionales Para El Proceso De Extracción de CO_2sc FSC.

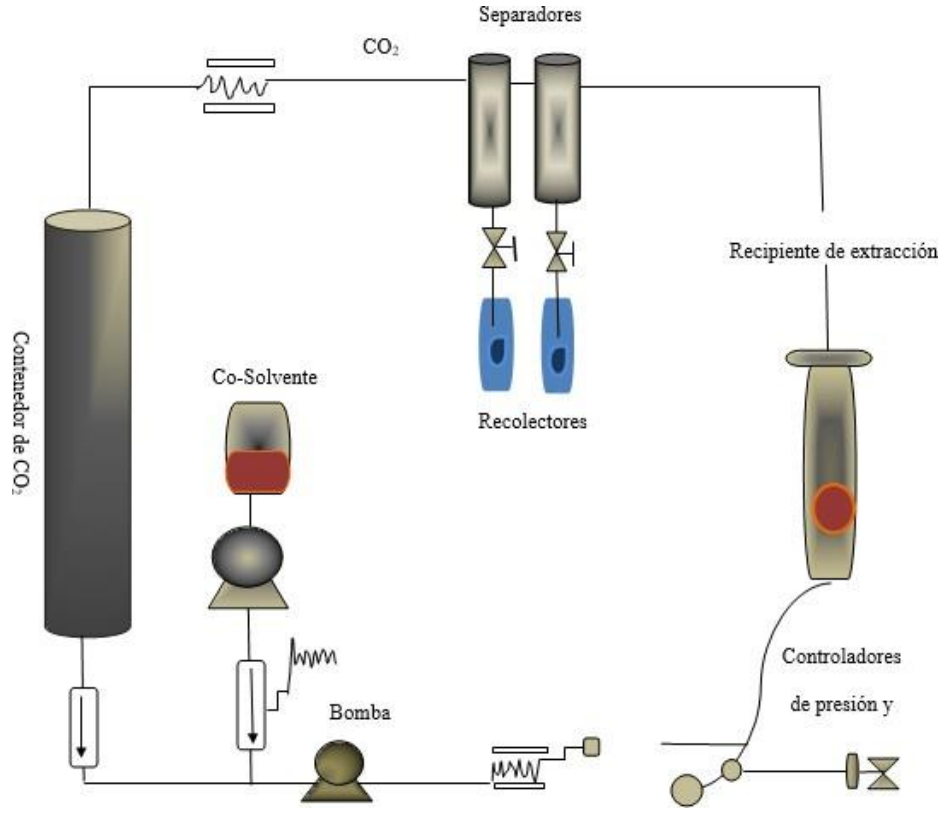
A continuación, se menciona las etapas necesarias para extracción:

Etapa de Presurización: Se utiliza una bomba o un compresor para alcanzar la presión necesaria del solvente, en este caso CO_2sc.

- Etapa de Ajuste de Temperatura: El fluido comprimido a través de remoción o adición de energía térmica por resistencias térmicas.
- Etapa de Extracción: El recipiente de extracción se encuentra con alta presión, en donde el fluido entra en contacto con la matriz y arrastra el soluto deseado.
- Etapa de Separación: El proceso de separación supercrítica se presuriza el CO_2 a una presión por encima al compuesto a extraer después se calienta por encima de la temperatura crítica para separar la sustancia extraída del solvente.

El modelo dinámico, se ilustra en la Figura 8 en donde el FSC con CO_2sc interactúa de forma continua con las válvulas de entrada y salida abiertas a través de la celda de extracción durante el periodo de extracción. En donde, la materia prima es situada en un recipiente de extracción manteniendo las condiciones de extracción deseadas (presión y temperatura). En la segunda parte el recipiente es presurizado con el fluido y los compuestos solubilizados anteriormente se transportan a los separadores. Por último, una válvula ubicada en la parte inferior de los separadores se encarga de recolectar los compuestos extraídos apartando el fluido recirculado para liberarlo al entorno. (Schacht, Zetzl, y Brunner, 2008, p.299)**,** afirman que la

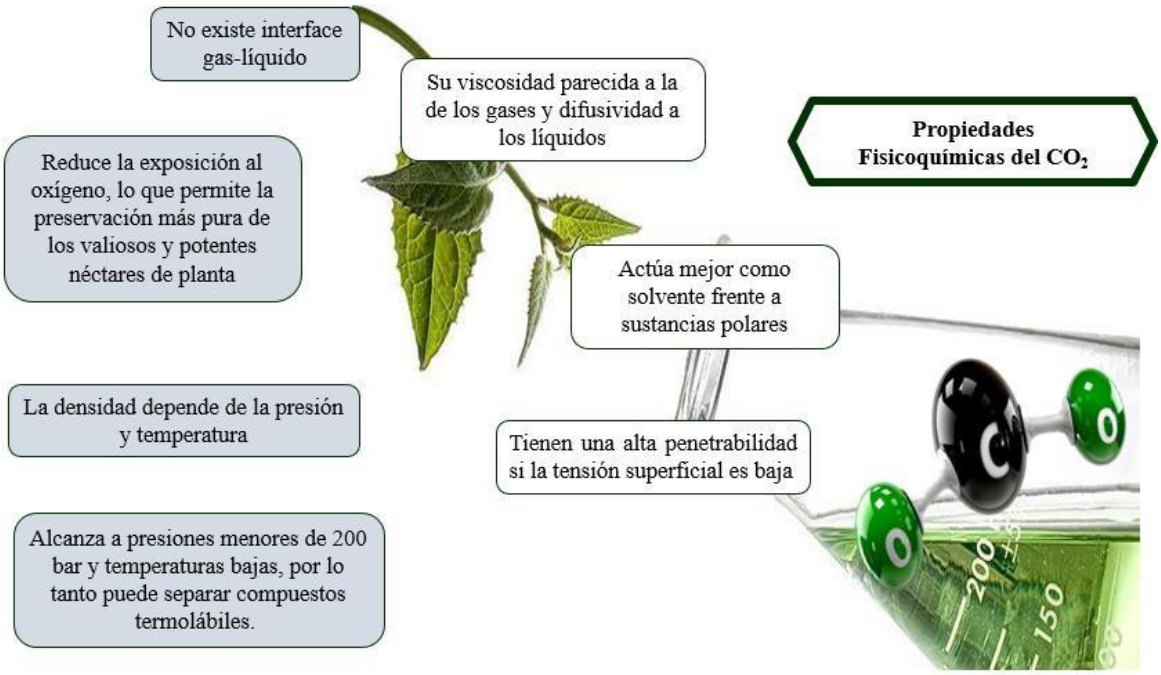
separación dinámica produce mejores y más rápidas recuperaciones durante el proceso para la continua renovación que entra en contacto con la muestra. Sin embargo, la extracción estática permite una mayor penetración del fluido en los poros de la muestra, permitiendo alcanzar el equilibrio de entre analito-matriz y el fluido. Por esta razón la técnica de extracción estática en la práctica más empleada, seguida por una extracción dinámica corta, donde se recolecta el compuesto de interés.



Fuente: adoptado de (Kröber y Teipel, 2003).

Figura 8. Pasos del proceso de extracción con FSC con CO_2.

En la Figura 9, se ilustra las principales ventajas de las propiedades fisicoquímicas de la tecnología verde como su: difusividad, viscosidad, densidad, temperatura o presión como un potencial de extractos naturales para la obtención de materia prima, sin causar un impacto en el medio ambiente en comparación con los métodos convencionales que son ecotóxicos y liberación de compuestos orgánicos volátiles (COV's).



Fuente: autoría propia

Figura 9. Propiedades Fisicoquímicas del CO_2.

Desde el punto para la ingeniería ambiental, se presenta como una propuesta prometedora ante un consumo reducido de energía, la no generación de efluentes orgánicos ni acuosos, evitando tratamientos y gestiones de residuos posteriores. La aplicación del futuro, para la obtención de biocombustible, biopolímeros, biorremedación de suelos contaminados con hidrocarburos, extracción de plaguicidas en suelos, entre otros, el CO_2 se presenta como un insumo en procesos de producción sostenible. Una propuesta ética como la biomimesis industrial reorientando la ingeniería por los senderos de la sustentabilidad.

Capítulo II: Uso del CO_2 como Insumo en Procesos de Producción Sostenible

En la última década, se comprende un camino de transición de insostenible a sostenible introduciéndose como proceso evolutivo para la circulación de materias dentro de un sistema de producción (Chertow, 2000, p.314). Al mismo tiempo, el reciclaje de CO_2 puede convertirse en un elemento clave para la gestión sostenible de recursos empleándolo como extractor o reactivo que provee átomos de carbono (C1) para la síntesis de otras moléculas de interés industrial, como lo afirmaba Georges Olah acreedor del premio nobel en 1994 describiendo el CO_2 como una pieza clave para impulsar sistemas productivos, como por ejemplo, el desarrollo de una pila de combustible para la generación de electricidad empleando metanol (CH_4O) formado a partir de CO_2 e H_2 como una materia prima de las biomoléculas en el origen de la vida (Amouroux et al., 2014). El CO_2sc se predestina como un papel pionero para la producción de diferentes gamas de plástico en el año 2030 establecido en la agenda política internacional con el énfasis de "Convertir CO_2 de nuevo a hidrocarburos" según el científico Ducan Graham-Rowen reiterando la necesidad de un cambio, lo cual depende de la administración y suministro de fuentes de energía, alimentos y productos químicos (Quadrelli, Armstrong y Styring, 2015).

2.1 Producción de Copolímeros.

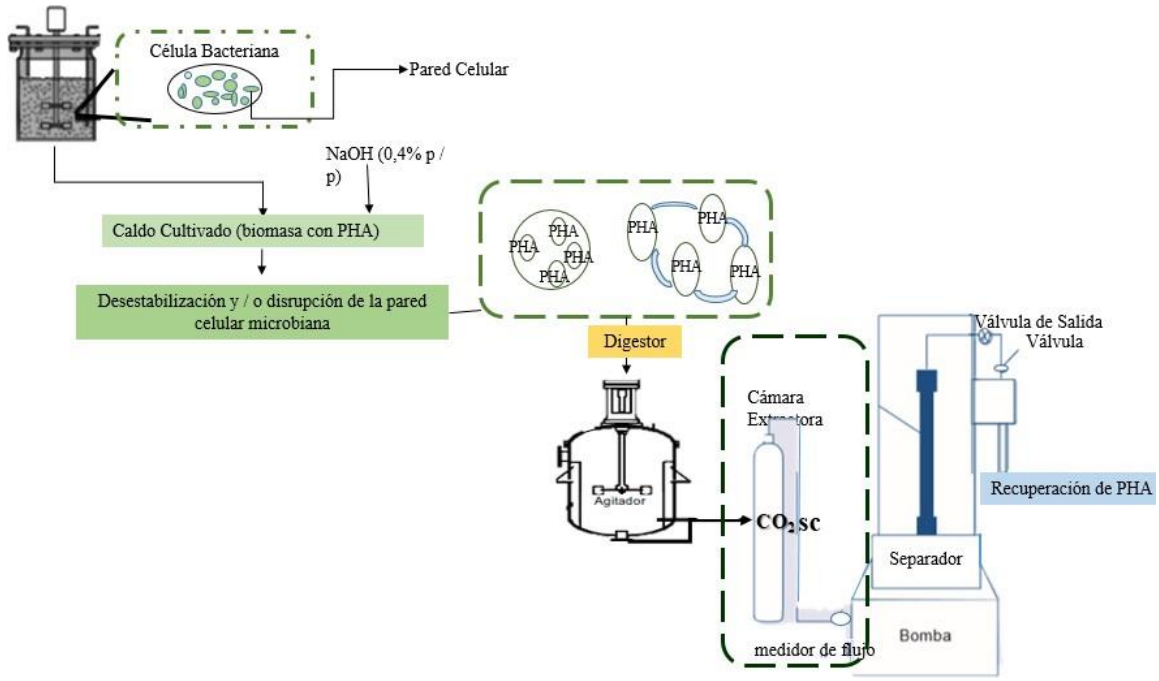
El concepto de huella de carbono se ha establecido especialmente en los últimos años como la evaluación del ciclo de vida basada en el indicador "emisiones de dióxido de carbono"(Foro minorista para la sostenibilidad, 2015), como un estándar para controlar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por efecto directo o indirecto de un individuo, organización, evento o producto. Mulcahey, Hedrick y Taylor (1991) afirman que aprovechando la emisión de gases emitidos por materiales biodegradables se debe considerar como una ventaja al obtener buena fuente de energía (p.2230). En el año 2017, la producción de bioplásticos se estimaba en un ritmo anual del 20%. Hoy en día, Asia es el centro de producción de más del 50% polímeros bioinspirados. La Comisión Europea (CE, 2018) afirma que para el año 2021 en Europa se producirá bioplásticos en base a la tecnología supercrítica, impulsada por empresas como: PepsiCo, Danone, Nestlé Waters *y* Marks y Spencer con el apoyo de la unión europea (EA) desarrollando el proyecto *EUROPHA* con el objetivo de producir e investigar los biopolímeros como polihidroxialcanoatos (PHA) sustitutos de materiales derivados del petróleo; se puede describir sus aplicaciones

como bioplástico para envases alimentarios, películas o espumas compostables aprovechando los residuos generados por la industria agroalimentaria.

El ácido poliláctico (PLA) y los polihidroxialcanoatos (PHA), son considerados como los impulsores en el Siglo XXI en el campo de los bioplásticos, debido a sus propiedades biodegradables a base de agua para la toma de conciencia de la huella de carbono. La producción de PHA por cultivos microbianos (residuos con altos niveles de glucosa) presenta cuatro etapas: fermentación acida, selección de cultivos, bioacumulación y extracción de PHA obteniendo flexibilidad para la formulación del compuesto adicionando plastificantes, estabilizadores de rayos UV, todos estos aditivos son productos biológicos y aptos para estar en contacto con alimentos, como lo señala (Sánchez, 2016). En la Figura 10, se ilustra un estudio de métodos para la extracción de polihidroxialcanoatos de biomasa bacteriana realizado por (Quines, Schmidt, Zanfonato, Schmidell y Aragão, 2015), en donde, utilizan el NaOH como una base y catalizador para desestabilizar la pared celular (sp. microbiana Ralstonia eutropha) facilitando el rompimiento de las células en la fase de extracción con CO_2sc empleando una presión de 200 bar y una temperatura 30°C en un tiempo de 100 min presentando una recuperación de PLA del 81% con una alta pureza. Se debe agregar que la viabilidad económica del proceso, es debido a la alta inversión requerida para instalar una unidad de extracción de fluidos supercríticos que

corresponde principalmente a los equipos y accesorios de acero inoxidable para resistir a altas presiones (Jacquel, Lo,Wei, Wu y Wang, 2008, p.1211).

Entre las diferentes alternativas de extracción utilizando esta tecnología también se han presentado como una alternativa de producción de PHA a partir de jarabes obtenidos de materias primas renovales como la harina de yuca y banano. En la actualidad, se están desarrollando diferentes investigaciones para la producción de PHA a partir de agua residual de la industria cervecera mediante el empleo de CO_2sc, como afirman, (Zacharof y Lovitt, 2015, p.476) a pesar de ser una grave limitación ambiental, son una fuente de productos valiosos del agua residual que produce la cerveza caracterizada por un alto contenido de materia orgánica fácilmente biodegradable.



Fuente: adoptado de (Quines et al., 2003).

Figura 10. Extracción de PHA producido por bacterias a través de CO_2sc.

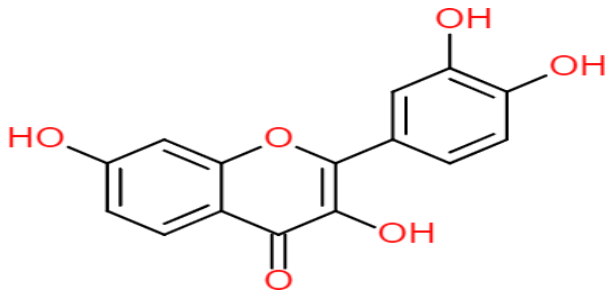
Un proceso aerobio similar al ilustrado en la Figura 10, compuesto de tres etapas de producción de PHA empleando cultivos bacterianos. La primera etapa de enriquecimiento de cultivos en bacterias con alta capacidad acumuladora de PHA es realizada por cortos períodos de tiempo con exceso de carbono alternados con largos períodos de ausencia de carbono. Cuando los microorganismos son sometidos a condiciones alternas de disponibilidad y ausencia de sustrato, convierten la mayor parte de sustrato en reservas internas de PHA (García, 2015). En la segunda etapa el

reactor es alimentado de forma constante en un ciclo de doce horas, lo que favorece la capacidad de almacenamiento de PHA en el lodo; en donde el polímero almacenado en el interior de la célula será consumido por el crecimiento celular evitando la saturación de la célula y obteniendo la acumulación del polímero conectándose con la tercera etapa donde se encuentra almacenado el CO_2sc en un cilindro controlado por un medidor de flujo (presión y temperatura) y una bomba que regula la presión del aire aplicada para generar que el flujo del CO_2sc se caliente a una temperatura elevada controlando la presión ejercida en la cámara de extracción por medio de válvulas.

En condiciones supercríticas, el aumento de temperatura influye en la solubilidad del extracto. La porción restante del extracto se dirige a través de una manguera extremadamente corta con el fin que el extracto no bloquee las tuberías logrando así una alta velocidad de flujo al entrar al separador facilitando la separación centrífuga del extracto PHA con el flujo de gas (CO_2sc). Cabe señalar, que el CO_2 pasa a través de la válvula de control de presión y luego a un segundo separador. La presión dentro del segundo separador se mantiene con un regulador de contrapresión para ser reciclado. Hay que mencionar, además, que el CO_2sc no solo actúa como solvente; también puede absorber y desorberse (fase de vapor a líquido), así como también hinchar y relajar matrices de polímeros para permitir una rápida difusión de productos químicos en copolímeros. Como señalan Wenzel et al. (2019) en su

estudio: extracción de cascara de nuez negra en una película de polietileno (PE) utilizando CO_2sc por las propiedades del CO_2 como solvente supercrítico, puede hinchar películas de polímero para impregnar compuestos fenólicos en biopolímeros (p.2).

Para la extracción e impregnación simultánea de cáscaras de nuez, sustentan que se pesaron cantidades predeterminadas de cáscara de nuez y etanol (codisolvente). El CO_2 se presurizo a 19,4 MPa y se calentó a 60°C, durante 60 min. Al final se obtuvo la película de polímero para determinar los grupos funcionales presentes donde encontraron los grupos fenólicos como se ilustra en la Figura 11 conformados por un grupo OH en los antioxidantes y el enlace CO al igual que los enlaces C = C en el anillo aromático de átomos de hidrógeno. Estos son grupos funcionales que se encuentran en común con la molécula del polietileno compuesta por una unidad estructural de dos átomos de carbono y cuatro átomos de hidrógeno unidos todos por enlaces de tipo covalente (C-C y C-H). Adicionalmente, en el estudio encontraron antioxidantes fenólicos como la quercetina principal fuente de flavonoles su biosíntesis se produce a través de la fotosíntesis.



Fuente: autoría propia

Figura 11. Estructura de quercetina que muestra la presencia de grupos fenólicos.

Los flavonoides se caracterizan por su potencial antioxidante alto, su mecanismo de acción se debe a sus propiedades quelantes (capacidad de llegar al lugar donde se presenta una acumulación de metales) y compuestos pueden incorporarse a los alimentos de manera indirecta a través de la matriz polimérica del envase, para ser liberados de manera gradual durante su almacenamiento por difusión, disolución y procesos de equilibrio. (Cejudo Bastante et al., 2019), ha reportado la difusión de quercetina también en la extracción de tereftalato de polietileno (PET) y polipropileno (PP) a través de extractos de la hoja de cultivo de olivo utilizando CO_2sc presentando una técnica novedosa para la producción de envases activos. El empleo de materiales biodegradables, según la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación) busca alargar la vida útil de los alimentos por medio de la producción de recubrimientos con propiedades barrera y propiedades activas (antioxidantes y antimicrobianos). Estos recubrimientos activos-barrera reemplazarán a los recubrimientos metálicos actuales, que suponen un proceso de reciclaje complejo y costoso.

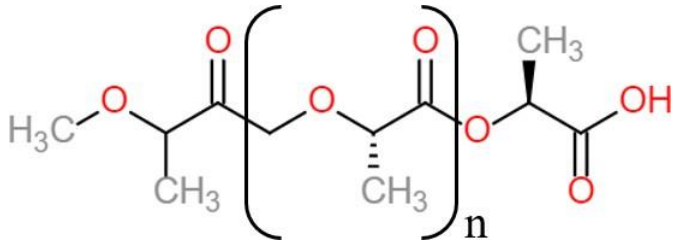
En el presente, la comisión federal de comercio en Estados Unidos ha aprobado la distribución transporte de los copolímeros entre los cuales, se encuentran el policarbonato de propileno (PPC), policiclohexano (PCHC), poliácido glicólico

(PGLA), polihidroxibutirato (PHB), polietilenglicol (PEG), policaprolactona (PCL), entre otros, de acuerdo a la IUPAC (Unión internacional de química pura y aplicada), son derivados de más de una especie de monómeros, con una masa molecular pequeña, similar a la glucosa (Jones et al., 2016). Entre los diferentes estudios que se presentan hoy en día para la obtención de polímeros bioinspirados, sobresale el uso de nanofilamentos de celulosa y nanofibras de lignina a partir de los residuos lignocelulósicos de la madera como una fuente de energía primaria renovable con un interés en la búsqueda de alternativas para la gestión y la utilización de los residuos derivados de las actividades forestales para la obtención de PHB (polihidroxibutirato) que presenta propiedades similares a los plásticos derivados del petróleo.

En el proceso las enzimas son catalizadores naturales para la separación de los componentes de la biomasa (madera) en la producción de nanofibras, Caraschi, Manzolli y Lopes (2002) describen el CO_2sc como un agente plastificante para la síntesis de materiales poliméricos logrando un equilibrio en la fase de presurización (p.1613). Puesto que los biopolímeros poseen una solubilidad baja para generar una reacción homogénea o heterogénea para una transición a un estado menos viscoso disminuyendo la temperatura durante el proceso de polimerización (Tsai y Wang, 2019). Adicionalmente, cabe explicar el mecanismo de dispersión que presenta el CO_2sc para emplearse como un surfactante, una mezcla estable de dos o más líquidos mantenidos en suspensión debido a pequeñas cantidades de emulsión (Polímeros de

hidratos de Carbono (C)), su función es envestir las superficies de las partículas de grasa o aceite dispersadas, evitando así la coalescencia como en el caso de los detergentes y los polímeros.

El CO_2sc mantiene primero una fase homogénea al inicio y al final de la reacción, la cual se somete a una separación, al contrario del mecanismo por precipitación que al inicio actúa de manera homogénea, conforme va creciendo el peso molecular del polímero, se precipita, obteniendo materiales bioadhesivos y biocompatibles con comportamientos antioxidantes y reducida actividad inflamatoria según lo descrito por (Fukuoka et al., 2010). En la Figura 12, se ilustra la estructura de un átomo de carbono asimétrico que compone al ácido poliláctico (PLA). En este sentido, se ha descrito la extracción de estos copolímeros por medio de fermentaciones aeróbicas o anaeróbicas o extractos naturales bajo condiciones supercríticas, en este caso, el PLA en los últimos años ha adquirido un gran valor en el sector floricultor debido a su uso como un plástico fotoselectivos o termoaislantes en función de mantener el nivel térmico más alto a comparación de los filmes normales para su producción se está estudiando la extracción de aceites naturales como la albahaca mediante la técnica de fluidos supercríticos.



Fuente: autoría propia

Figura 12. Estructura Química de PLA (n) veces.

En Colombia, el sector floricultor ha aumentado el uso, desarrollo y exportación de la fibra de este copolímero constituido en procesos de filmes agrícolas en un 90% del país; afirma (Serna, Rodríguez y Albán, 2011, p.21). En la Tabla 4, se especifica las aplicaciones e investigaciones que se han desarrollado en los últimos veintitrés años, utilizando la técnica de extracción con CO_2sc para la obtención de polímeros verdes liderando un cambio hacia la economía circular.

Tabla 4. Aplicaciones de copolímeros de policarbonatos alifáticos basados en CO_2sc

Biopolímero	***Aplicaciones***	***Cita***
Furanoato de Polietileno (PEF)	Polímero conductor de iones para electrolitos sólidos flexibles (baterías orgánicas, visores electrocrómicos, sensores químicos, diodos emisores de luz, aditivos anticorrosivos, entre otras). Lentes oculares, conexiones	(Takahashi y Kojima, 2003).

Biopolímero	*Aplicaciones*	*Cita*
	de tubos oxigenadores de sangre, dializadores, incubadoras de recién nacidos.	
	Aglutinante para polvo cerámico (cerámicas de berilio, alúmina, ferrita, titanato y circanatos).	(Kramer, Santangelo, Weber, 1988).
	Recubrimientos, pastas y tintas.	(Xie, Xu, Liu, Zhao y Li, 2020).
	Se utiliza para fabricar piezas técnicas de alta pureza (Fabricación de objetos con materiales refractarios, Fabricación de piezas metálicas porosas para utilizar como filtros para agua potable).	(Xie, Xu, Liu, Zhao y Li, 2020).
	Capa de barrera de película de envasado multicapa debido a su característica de barrera de bajo oxígeno o laminadas con foil de aluminio.	(Muthuraj y Mekonnen, 2018).
	Aplicaciones médicas (por ejemplo, para la liberación controlada de fármacos debido a su biodegradabilidad).	(Peng et al., 2018).
	Adhesivos temporales para la unión de obleas a oblea.	(Muthuraj y Mekonnen, 2018).
Carbonato de Propileno o Propileno (PPC)	Adhesivos termofusibles reactivos para plásticos (policarbonatos, acrilonitrilo butadieno, poli (metacrilato de metilo), metales de acero.	(Liu et al., 2018).
	Espumas de poliuretano para colchones, asientos de automóviles, reposabrazos, esponjas, amortiguación de muebles, láminas de espuma, etc.	(Reichel, Levis Jr, y Pizzini, 1984).
	Emulsiones de poliuretano a base de agua: se utilizó carbonato de polipropileno como segmento blando para aplicaciones de recubrimiento y películas.	(Xu et al., 2014).
	Adhesivos de poliuretano termoplástico como neveras, batidoras, secadores de pelo, hervidores eléctricos, máquinas de afeitar eléctricas, biberones, envases de alimentos y de bebidas, recipientes para calentar en el microondas.	(Valero-Valdivieso, Ortegón y Uscategui, 2013).

Biopolímero	*Aplicaciones*	*Cita*
	Material biomédico para andamios de tejidos, transportadores de medicamentos, telas no tejidas, prótesis de mama, etc.	(Welle et al., 2007).
	Película de envasado biodegradable funcional (por ejemplo, película antimicrobiana.	(Bahramian, Chrzanowski, Kondyurin, Thomas, y Dehghani, 2017).
	Alfombras de fibra electrohilada para materiales porosos.	(Ohlendorf et al., 2017).
	Polímero conductor de iones para electrolitos sólidos flexibles.	(Takahashi y Kojima, 2003).
	Adhesivos temporales para la unión de obleas a obleas.	(Muthuraj y Mekonnen, 2018).
Polihidroxibutirato (PHB)	Fundición de cintas, cuerdas y otras aplicaciones en las que la flexibilidad y la buena resistencia en verde son críticas.	(Muthuraj y Mekonnen, 2018).
	Aplicaciones biomédicas y medioambientales.	(Wu et al., 2015).
Poliácido Glicólico (PGLA)	Adhesivos temporales para la unión de obleas a obleas.	(Muthuraj y Mekonnen, 2018).
	Aglutinantes, electrónica, resinas de revestimiento, tensioactivos y espumas y otros.	(Xu et al., 2014).
	Hidrogeles	(Wu et al., 2015).
	Ventanas traseras, ventanas laterales fijas, parachoques, tablero de mandos.	(Valero-Valdivieso, Ortegón y Uscategui, 2013).
	Techos, ventanas, claraboyas, señales de tráfico, paneles de protección.	(Valero-Valdivieso, Ortegón y Uscategui,, 2013).
	Termoplásticos rígidos moldeables, como juguetes, utensilios, artículos relajantes, cascos, gafas de sol y seguridad industrial, boquillas para instrumentos musicales.	(Mekonnen, Misra y Mohanty, 2015).
	Formador de canal descomponible, Los teléfonos celulares, computadoras, máquinas de fax, cajas de distribución, enchufes.	(Muthuraj y Mekonnen, 2018).
Ácido Poliláctico (PLA)	En la Industria química, solubilizador y como agente controlador de pH	(Serna C. et al., 2011).

Biopolímero	*Aplicaciones*	*Cita*
	En las curtiembres es utilizado para remojar los cueros y desencalarlos.	(Serna C. et al,. 2011).
	En la producción de pinturas y resinas, puede ser utilizado como solvente y como removedor biodegradable.	(Serna C. et al., 2011).
	En la industria farmacéutica, las sales de hierro y calcio tienen un importante uso terapéutico en la producción de drogas.	(Serna C. et al., 2011).
	En la industria textil es ayudante en el teñido e impresión.	(Serna C. et al., 2011).
	En la agricultura se utiliza como acidulante.	(Serna C. et al., 2011).
Polietileno (PE) y Policaprolactona (PCL)	Encapsulación con eucalipto de medicamentos volátiles en micropartículas poliméricas sin afectar la bioactividad de la droga.	(Akolade et al., 2019) (Ye y Chi, 2018).

Fuente: autoría propia

El uso de CO_2sc emerge como una alternativa clave para la utilización de biomasa renovable y de residuos agroindustriales, un suministro prometedor para la conversión de problemas medioambientales al convertir desechos en energía o productos útiles. Significando un beneficio económico y ecológico en la reutilización de los desechos de la industria agronómica. En la Figura 13 se ilustran las resinas naturales (también llamados biopolímeros) tienen como base recursos renovables como el almidón, la celulosa, y los polihidroxialcanoatos (PHA) producidos por microorganismos. Otros polímeros, como las proteínas y las pectinas, pueden también utilizarse, potencialmente, para desarrollar plásticos y polímeros biodegradables. Los

polilácticos (PLA), es decir, poliésteres alifáticos formados por polimerización del ácido láctico, en donde, el monómero puede producirse por fermentación.

Fuente: autoría propia

Figura 13. Copolímeros obtenidos a partir del CO_2.

En este contexto, multinacionales como: ACME LEON, KeeperMate, Toyota, Hycail, Purac Biomaterial, PowerGel, Coca-Cola han desarrollado nuevos procesos para la obtención de copolímeros utilizando tecnologías verdes y renovables, entre las diferentes técnicas, el CO_2sc ofrece muchas oportunidades, por ejemplo, empaques biodegradables en función de protección mecánica, barrera de humedad, grasas y gases. Cabe señalar, las capacidades de los polímeros en la industria de automoción,

construcción, agricultura, aeronáutica, electricidad, entre otros campos presentando una mayor adaptabilidad.

2.2 Obtención de Fármacos.

La industria farmacéutica utiliza materias primas y energía para generar bienes socialmente deseables, pero también, sus procesos productivos arrojan al ambiente subproductos indeseables para los cuales, generalmente, no hay precios positivos ni mercados. Entre ellos están las emisiones de contaminantes a la atmósfera, las descargas de aguas residuales, los residuos peligrosos y no peligrosos (Trecco et al., 2011). De todos los contaminantes emergentes, los que probablemente suscitan mayor preocupación son los medicamentos no metabolizados, el volumen generado desborda las capacidades biofísicas de asimilación, manejo; para convertirse en un reto para la gestión industrial y política ambiental, además, la atenuante preocupación por los costos de la gestión de los residuos. Jessel, Tschimpke, y Walser (2009)Afirman, que el mayor número de residuos sanitarios es directamente de la producción de fármacos, por eso, es necesario aplicar un ahorro económico mediante la disminución de residuos

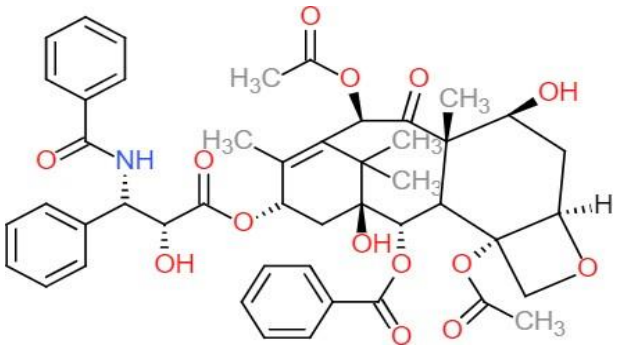
evitando una sobreexplotación de recursos naturales y la alteración de ecosistemas (p.96). El uso del CO_2sc como disolvente, para el aislamiento del producto por medio de la sequedad a través de la evaporación es particularmente útil en las etapas finales de la síntesis farmacéutica en las que incluso las cantidades de traza de residuos del disolvente se pueden consideran problemáticas (Hernández Romero y Serra, 2007).

Otros disolventes como diclorometano o tolueno presente en efluentes por el proceso de extracción se producen en aguas que pueden ser filtradas, recirculadas y lodos que deben ser tratados como agentes tóxicos y peligrosos. Alrededor del 25% de los fármacos prescritos en el mundo provienen de plantas; de los 252 medicamentos considerados básicos y esenciales por la Organización Mundial de la Salud (OMS), el 11% son exclusivamente de origen vegetal, afirma (Guerrero, 2017, p.5). A continuación, una recopilación de estudios en donde utilizan el CO_2sc para la obtención de fármacos.

2.2.1 *Extracción de Taxus brevifolia con CO_2sc.*

El árbol del tejo (*Taxus Brevifolia* sp.) se caracteriza por presentar metabolitos secundarios de importancia estratégica en la industria farmacéutica, tales como: el taxol utilizado como tratamiento del cáncer de seno, ovario, pulmón y sarcoma (Barrales Cureño y Ramírez Sepúlveda, 2013); se distribuye en América, Europa y Asia. (Vandana, Teja y Zalkow,1996) afirman que es el compuesto anticancerígeno más prometedor en los últimos 15 años (p.162). En la Figura 14, se ilustra una

molécula total de once estereocentros, un esqueleto hidrocarbonado formado por tres ciclos de 6, 8 y 6 carbonos polisustituidos con cuatro metilos y ocho funciones oxigenadas (entre ellas, una de β-fenilisoserina que esterifica la posición C13).



Fuente: autoría propia

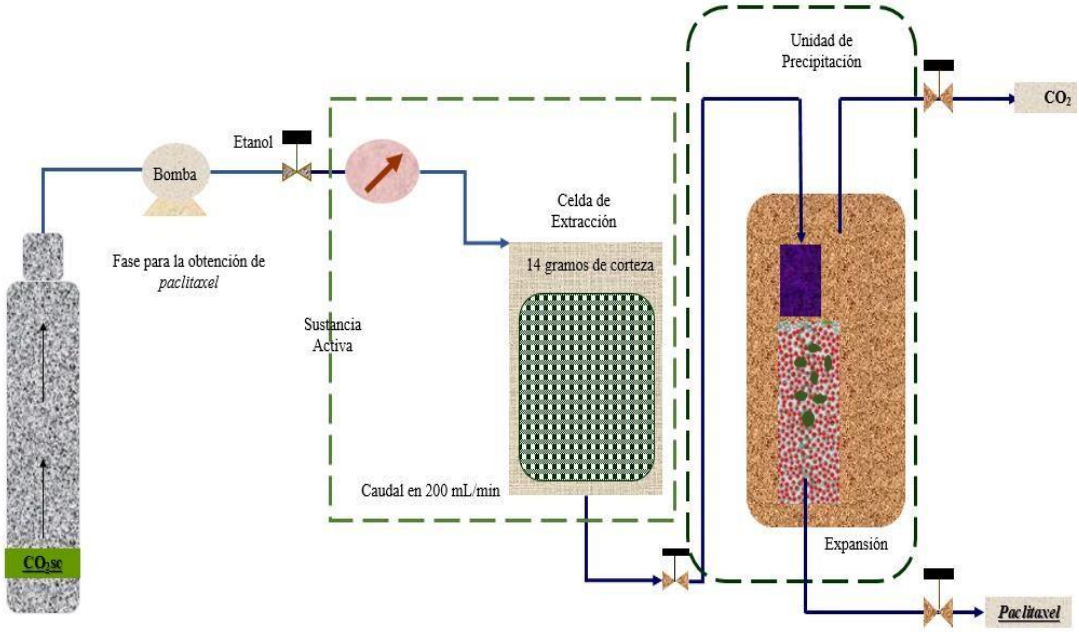
Figura 14. Estructura química de la molécula de taxol $C_{47}H_{51}NO_{14}$.

El CO_2sc es capaz de extraer taxol de la corteza terrestre, especialmente a presiones altas sin conllevar a una tala indiscriminada. Un estudio realizado por el Instituto De Tecnología De Georgia, Atlanta para la extracción del fármaco paclitaxel (Jennings, Deutsch, Zalkow, y Teja, 1992). En la Figura 15, se ilustra el proceso de obtención en donde el CO_2sc permanece en su estado líquido durante el proceso de

bombeo cabe resaltar que, durante todo el trayecto del experimento, el etanol y el CO_2 eran inyectados a través de una bobina, una válvula y un mezclador estático y aumentar la solubilidad para provocar un aumento en la expansión y concentración. Es decir, la interacción entre el soluto y el etanol es muy fuerte, especialmente a través de enlaces de hidrógeno. Por lo tanto, la mayor concentración del paclitaxel condujo a la coagulación por medio del bombeó de CO_2 hasta que la presión estuviera por encima de la presión crítica junto a el etanol y en la celda de extracción se mantuvieron 14 gramos de corteza. La despresurización del CO_2sc depende del caudal, en el estudio utilizaron 200 mL/min para que la válvula encargada enviara dosificación al recipiente (el solvente se conecta con el material extraído de la corteza) y el etanol se desplaza a dos trampas recubiertas de lana en el vidrio para su condensación.

Al final del proceso, el contenido del primer recipiente extraído se transfirió a un matraz, antes de ingresar a la cámara de extracción el tamaño de las partículas del paclitaxel se determinó por el aumento de la temperatura previa a la expansión, utilizando un mezclador asegurando los componentes solubles con el método de análisis HPLC (cromatografía liquida de alta eficiencia) para separar los componentes de la mezcla. Por lo tanto, la cantidad de material y cantidad de taxol extraído desde el primer corte hasta el último corte en cada presión se debe indudablemente al agotamiento de los compuestos solubles. En conclusión, los extractos se extraen de

las partículas molidas encontrando una mejor extracción con CO_2sc. La cantidad de taxol presente en cada corte (mg/mol FSC) se muestra en función de cantidad acumulada de CO_2sc que pasa a través de las celdas, enfatizando que los cristales paclitaxel se obtuvieron por el proceso físico de micronización (reducción de las partículas del taxol a un tamaño inferior a 10 micras) en base a CO_2sc y mezclas de CO_2-etanol.



Fuente: adoptado de (Yildiz, Atún, Döker, y Çalimli, 2007).

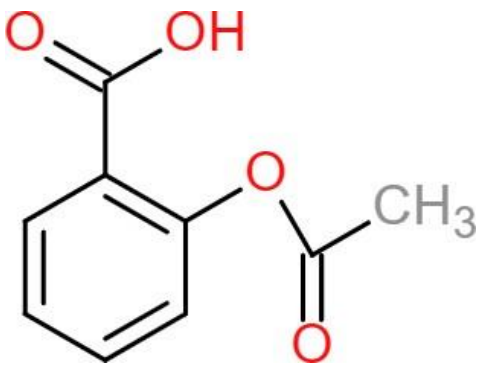
Figura 15. Diagrama de fases para la obtención de paclitaxel con CO_2sc.

Cabe señalar, que la presencia de un codisolvente con el CO_2sc provoca el cambio de la morfología del taxol. Hay que mencionar además que un estudio similar por la Universidad de Ankara, Turquía (Yildiz, Atún, Döker, y Çalimli, 2007) y la escuela de ingeniería química y bioquímica de Atlanta (Vandana et al., 1996) aporto que la molécula de CO_2 en estado supercrítico es considerada uno de los mejores solventes para extraer el fármaco del material vegetal y la adición de un codisolvente como el etanol aumenta la selectividad y capacidad de extracción del taxol, en donde

la muestra de CO_2sc se puede usar como un proceso de separación valioso y benigno para extraer el fármaco paclitaxel sin el uso de solventes halogenados.

2.2.2 *Extracción de salicina con CO_2sc*.

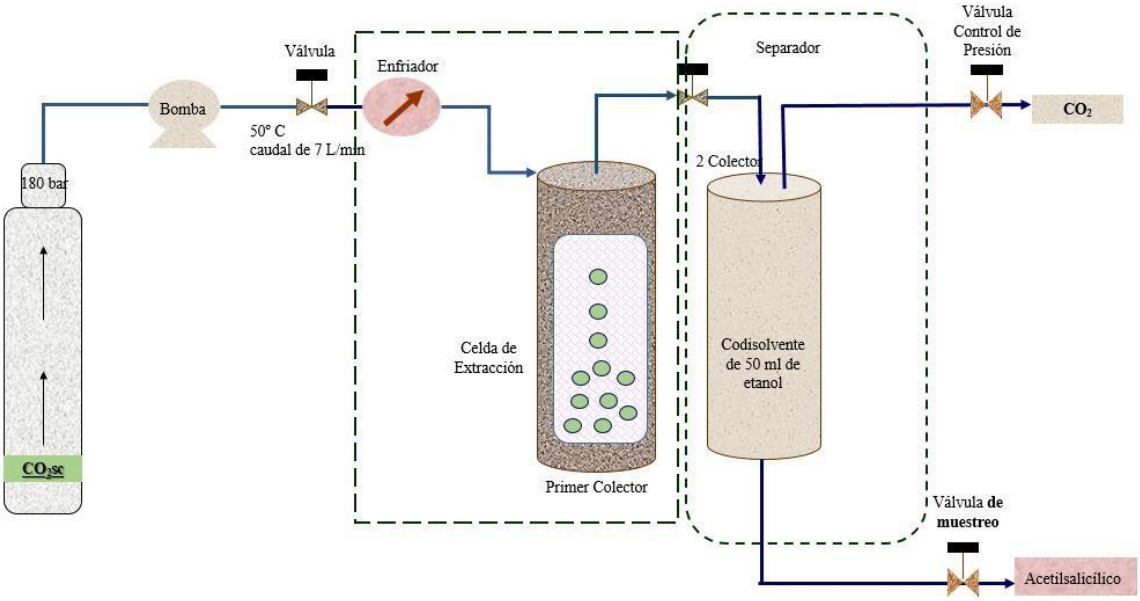
Las plantas están naturalmente dotadas para la síntesis de medicamentos, sin embargo, su proceso de extracción sostenible es un verdadero reto para la ciencia, y así obtener compuestos activos con un alto valor terapéutico, por ejemplo, el ácido acetilsalicílico conocido también como aspirina obtenido a través de corteza de sauce blanco o chope. En la Figura 16, se ilustra la estructura química conformada por un éster acetilado del ácido salicílico. Hoy en día es un fármaco registrado por más de setenta países, la industria farmacéutica ha indagado en la obtención de la aspirina mediante la familia de las salicáceas que se encuentran más de 200 especies que contienen glucósidos, taninos y entre éstos la salicilina.



Fuente: autoría propia

Figura 16. Estructura química del Ácido acetilsalicílico ($C_9H_8O_4$)

En la Figura 17, se ilustra el proceso de extracción de salicina con la sp. Populus nigra (chopo) o álamo negro. El CO_2sc se almacena en un tanque con una presión de 180 bar, una temperatura de 50º C con un caudal de 7 L/min en donde los compuestos arrastrados por el CO_2sc presentan una capacidad antioxidante producida por extractos supercríticos recogidos en el primer colector (C_1), en el segundo colector (C_2) a un tiempo de duración doce (12) horas incorporando codisolvente de 50 ml de etanol. (Berrueco Martínez, B., y Langa Morales, E., 2009) afirman, un incremento del 20% en la concentración del componente actual a comparación de los métodos tradicionales para la extracción de acetilsalicílico.



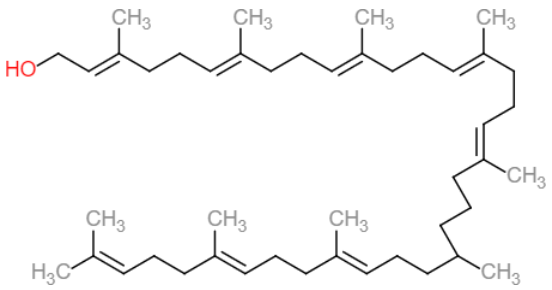
Fuente: autoría propia

Figura 17. Diagrama de extracción de salicina con CO_2sc.

(Muñoz, 2013) afirma la necesidad de implementar el CO_2sc para la preservación de la fuente natural (semillas, frutos secos, biomasa, entre otros). La importancia ambiental del álamo o sauce para la protección del suelo y el agua es un factor importante para lograr un equilibrio ecológico, países como Nueva Zelanda, Bulgaria, Serbia, Montenegro y Chile exploran aplicaciones del sauce para la estabilización y reducción de sedimentación al margen de los ríos, fitorremediación, fitoextracción de cadmio, reducción de la cantidad de nitrato en las aguas residuales en la industria lechera, absorción de nitrógeno derivado de la ganadería intensiva. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) expresa la necesidad de buscar tecnologías sostenibles para la conservación de esta especie considerada una herramienta para industria farmacéutica en donde un sauzal de una hectárea puede absorber al año de 150 a 200 kg de nitrógeno, CO_2 y producir energía renovable (Von Wühlisch, 2016).

2.2.3. *Extracción de solanesol con CO_2sc*.

Las familias de solanáceas se acumulan en plantas como el tabaco, tomate, patata, berenjena, y los cultivos de pimienta. En la Figura 18, se ilustra la estructura química del solanesol un compuesto de cadena larga de alcohol terpenoide, utilizado como fuente de unidades de isopreno para la síntesis de vitamina K y metabiológicamente activos de quinonas como la coenzima Q_{10} utilizada en el tratamiento de enfermedades del corazón, cáncer y ulceras, así como un nutracéutico para alimentos funcionales como vitaminas y minerales debido a sus propiedades antioxidantes.



Fuente: autoría propia

Figura 18. Estructura química de solanesol ($C_{45}H_{74}O$).

La Universidad de Nova de Lisboa, realizo un estudio para la obtención de solanesol con hojas de tabaco molidas utilizando una celda de extracción, un horno con control de temperatura y una bomba para el CO_2sc. Se mantuvo un caudal constante con un tiempo de extracción de una hora, después se despresurizo y se lavó con hexano garantizando la recuperación de los extractos. Como resultado se extrajo el 50% de solanesol, los siguientes autores (Ruiz-Rodriguez, Bronze y Ponte, 2008) han encontrado que el poder de la extracción del CO_2sc como solvente, en este sentido se ha descrito que depende de su propia densidad y temperatura para afectar la presión del soluto, es decir, la extracción con CO_2sc a alta presión se sugiere para la obtención de extractos enriquecidos de solanesol cuando se trabaja con bajas temperaturas de extracción .

En las aplicaciones potenciales de los extractos, se recomienda que el solanesol se separe de la nicotina posteriormente a la extracción, generando un equilibrio en las mezclas (CO_2 y solanesol) necesario para el diseño de métodos de separación efectivos, de lo anterior se infiere, que si se presenta un aumento en la composición de la nicotina significara una reducción de la cantidad de solanesol en el sistema (Ruiz-Rodriguez et al., 2009). De manera semejante, la planta de tabaco ha estado ampliamente documentada en la producción de fármacos, anticuerpos contra cáncer debido a su fácil trasformación genética y adaptación en un cultivo “in vitro”, en particular sus usos de producción de nicotina para la extracción de tabaquina con

CO_2sc para emplearse como un pesticida. En resumen, este apartado se centró en aprovechar la experiencia existente para la identificación de otros productos novedosos e interesantes para la industria que permitan plantear la sustitución de productos tradicionales previendo aplicaciones actuales y futuras para alcanzar producciones limpias amigables con el medio ambiente.

2.2.4 *Obtención de ácidos grasos a partir de semillas frutales con CO_2sc.*

La extracción de semillas de maracuyá (*Passiflora edulis*), lulo (*Solanum quitoense* L) y mora (*Rubus glaucus*) mediante el uso tecnologías verdes presentan un gran potencial para la industria cosmética. Según un estudio realizado por la Universidad Nacional a Distancia en Palmira, valle (Colombia) se reutilizo residuos generados tras el procesamiento industrial de mora, lulo y maracuyá como una fuente promotora de aceites, obtenidos por medio de CO_2sc para el estudio de las propiedades fisicoquímicas que permiten un óptimo rendimiento en la extracción y una buena calidad. En el proceso de extracción se utilizó un tiempo de 150 min para cada especie frutal para la obtención del 60% del aceite contenido en las semillas, expresado en un 22,2% de maracuyá, 13,3% de lulo y 24,3% de mora. De acuerdo con (Pantoja-Chamorro, 2016) el contenido graso de semillas de mora es similar a los niveles reportados para otras semillas oleaginosas como oliva (12,4%) extraído con

CO_2sc a partir de 240 bar y 60°C y uva con un rendimiento de aceite que oscila entre 12,4 y 16%, evidenciando la posibilidad de utilizar las semillas de mora como materia prima para la obtención de aceite que contienen β-sitosterol, α-tocoferol y δ-tocoferol.

Por otra parte, se identificó en el aceite de semillas de maracuyá y lulo Colest-8-en-3β.-ol, acetato, γ-sitosterol estigmasterol, β-sitosterol y lanosterol, escualeno compuestos de gran importancia en la industria cosmética y farmacéutica debido a su uso como foto protector u humectante de la piel en mayor concentración que en otros aceites vegetales como en los aceites de oliva, linaza, maíz, soja, girasol, algodón y cacahuete. Una ventaja de la extracción con CO_2sc, es el aumento del ácido linoleico al final de la extracción como un indicador de la calidad del aceite vegetal para lo cual los aceites de maracuyá, lulo y mora presentan en su composición mayor cantidad de ácido linoleico que oleico. En efecto la extracción de estos aceites presentan un gran papel como precursores en la industria cosmética y nutricional por el alto contenido en las semillas de maracuyá de escualeno, semillas de lulo el ácido linoleico y las semillas con vitamina E con mayor actividad antioxidante y el aporte de omega 3, 6 y 9. De igual manera estos componentes antes mencionados son importantes para la reducción de niveles de colesterol, prevención del cáncer, enfermedades cardiacas, hipertensión, dermatitis, entre otras enfermedades; además, presentan una alta demanda en la industria farmacéutica para la elaboración de hormonas sintéticas (Xu, Guan, Sun, y Chen, 2009).

(Parada, Rodríguez, Nivia, Castro y Restrepo, 2007) y (Dorado, Hurtado y Martínez, 2016) afirman que la obtención de ácidos grasos por medio de la extracción de aceite en semillas de guanábana (*Annona muricata*) y guayaba (*Psidium guajava* L.) con CO_2sc en un tiempo de extracción de 150 min para alcanzar una cantidad aceptable de aceite sin tener un gasto excesivo de CO_2 sobre todo se hace énfasis en la humedad de las semillas con un puesto que es un parámetro que influye en el rendimiento, es decir, a una humedad entre el 8,5% - 16,0% (base húmeda) es un porcentaje adecuado garantizando una alta producción de aceite de semillas del 4,3% (el agua presente en las semillas actúa como cosolvente y por un fenómeno de arrastre puede salir junto con el aceite incrementando el rendimiento) para la obtención de ácidos como el linoleico presente en aplicaciones en la industria de recubrimientos y pinturas como agente secante conocidos comúnmente como jabones metal orgánicos biodegradables presentando un aumento en la flexibilidad de la película (si sólo fuera pigmento, disolvente y resina, la película sería quebradiza), mayor brillo, resistencia a los agentes químicos, durabilidad y menor tiempo en el secado de la película.

Para concluir, en la Figura 19 se ilustra las aplicaciones farmacéuticas de extracción con CO_2 un insumo para la obtención de productos naturales como sustituto de compuestos sintéticos y reducción de contaminantes en las aguas residuales vertidas por la industria farmacéutica.

Fuente: autoría propia

Figura 19. Obtención de Fármacos utilizando CO_2sc enmarcado en unos procesos de producción sostenible.

La tecnología supercrítica encaminada a extraer compuestos activos, puros y aislados al ser productos cien por ciento naturales, poseyendo estructuras optimizadas ricas en grupos farmacólogos para interaccionar principalmente con las proteínas, además de no presentar efectos ecotoxicológicos al medio ambiente. De modo que las propiedades del CO_2sc son consideradas aptas para la extracción de compuestos farmacéuticos o cosméticos provenientes de frutas, flores, semillas o hojas, que no se pueden extraer fácilmente mediante procesos de extracción convencionales. Considerando que en el presente la amplia gama de diversidad de especies con

diferentes tipos de lípidos que contienen varios compuestos químicos como vitaminas, esteroles, lecitina y ácidos grasos que encuentran valor en los alimentos y los medicamentos, evolucionando diariamente hacia una química verde con el objeto de que el tiempo de persistencia de estos xenobióticos sea menor para optimizar, por el ejemplo, el tratamiento de aguas residuales (PTARs) o biorremedación de suelos.

2.3 Producción de Biocombustible.

En el mundo actual, el proceso de desarrollo de la sociedad moderna está ligado a la disponibilidad de energía y su capacidad de generación sustentable (Rico y Hidalgo, 2008). La producción de biocombustible en el mundo se presenta como una oportunidad de garantizar las necesidades energéticas de los países no productores intensificando el desarrollo económico, productivo e investigativo en países emergentes de américa latina e india (Gómez, 2016). Los biocombustibles de primera generación se encuentran el biodiesel, biogás y bioetanol. La producción de etanol deriva de biomasa de cultivos de sorgo, maíz, caña de azúcar, yuca, banano el proceso de conversión se presenta la fermentación y el proceso de extracción supercrítica al igual que el proceso de obtención de biodiesel a partir de oleaginosas de aceite de palma mediante transesterificación del aceite virgen extraído por CO_2sc o

partir de aceites usados y el biogás se obtiene a partir de residuos orgánicos mediante procesos de digestión anaerobia.

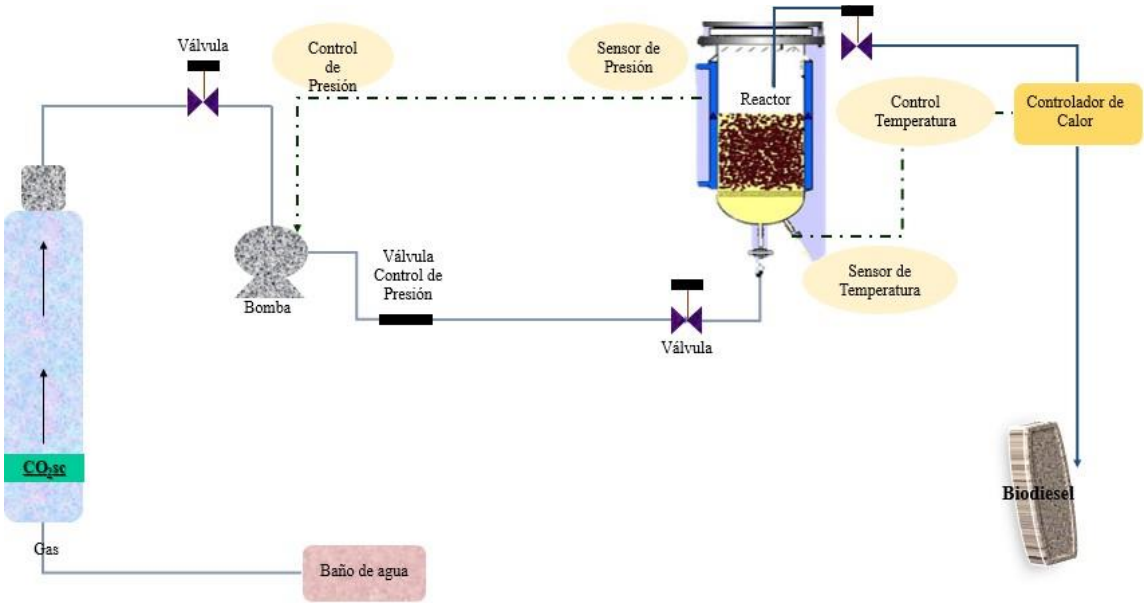
2.3.1 Obtención de Biodiesel.

En los últimos años, cianobacterias han atraído mucha atención e inversión. Los aceites microbianos producidos por microorganismos oleaginosos (bacterias, levaduras, mohos y algas) acumulan un 20% en lípidos promotores de materias primas potenciales para la generación de biodiesel. La producción de lípidos es 100 veces mayor por hectárea por sus características fotosintéticas incluso un período más corto en la duplicación de su biomasa, se debe a que la composición de ácidos grasos es similar a los aceites vegetales, afirma (Cheirsilp, Suwannarat y Niyomdecha, 2011). La producción de microalgas oleaginosas se define como una fábrica celular impulsada por fotosíntesis que convierte el CO_2 a biocombustible, incluido metano (CH_4), biohidrógeno y aceites.

Las técnicas convencionales requieren mucho tiempo, la biomasa gastada después de la extracción suele contaminarse con el disolvente usado limitando sus usos posteriores, sin embargo, el CO_2sc demuestra ser una alternativa prometedora frente a los solventes orgánicos para la extracción de lípidos. Una ventaja de la aplicación de CO_2sc, es después suceder la extracción el solvente se separa fácilmente del extracto por despresurización, no queda residuo del disolvente en el sólido residual lo que permite un mayor uso de la biomasa sobrante para convertirlo en

biometanol o biofertilizante. (Shomal, Hisham, Mlhem, Hassan, y Al-Zuhair, 2019) describe el CO_2sc como un proceso integrado como se ilustra en la Figura 20 en donde los aceites extraídos se alimentan directamente por un biorreactor lleno de lipasa inmovilizada (enzimas capaces de catalizar reacciones de hidrólisis de triglicérido mejor definido como grasa vegetal) para la producción de biodiesel sin la necesidad de bombeo, por lo tanto, una de las ventajas al realizar la obtención por medio de CO_2sc es la disminución de costo al no realizar bombeo.

De acuerdo con (Andrich, Nesti, Venturi, Zinnai, y Fiorentini, 2005), CO_2sc ha recibido un aumento referente a la atención en aplicaciones de biocatálisis como medio de reacción verde, porque modifica la formación de lipasa y mejorar su actividad catalítica a comparación de los solventes orgánicos; el CO_2sc se disuelve en biodiesel producido y no requiere unidad de separación de glicerol, como se encuentra en técnicas convencionales, ya que la solubilidad del glicerol es baja en CO_2sc y se deja en el reactor.



Fuente: adoptado de (Shomal et al., 2019).

Figura 20. Diagrama de extracción de Biodiesel con CO_2sc.

El Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) tiene identificado más de 3000 cepas de microalgas (Sheehan, Dunahay, Benemann, y Roessler, 1998), en donde, las cepas probadas para la producción de biodiesel son *Chlorella* sp, *Hematococo Pluvialis* sp., *Dunaliella* sp., *Scenedesmus* sp., *Neochlorosis oleabundans* sp., *Nannocloropsis* sp., *Synechococcus* sp., *Schizochytrium mangrovi* sp., *Chlorococcum parinum* sp., *Pseudochlorococcum* sp., conviene subrayar que las microalgas verdes producen una mayor cantidad de biocombustible en comparación con las algas verdeazuladas (*Chlorella* sp., *Chlorococcum parinum* sp. *y*

Neochlorosis oleabundans sp.); Sin embargo, las microalgas rojas también presentan una buena opción como el hematococo Pluvialis sp. Un estudio realizado en Corea (Shomal et al., 2019) con microalgas verde azuladas para la obtención de biodiesel determino que la capacidad de extracción con fluidos supercríticos (SFE) para operar a bajas temperaturas.

El procedimiento de obtención de biodiesel fue el siguiente: la muestra de células liofilizadas junto con la carga enzimática y una cantidad especificada previamente de metano (CH_4O) en la celda de reacción, se colocaron en la parte superior e inferior de la muestra para evitar la evaporación del metano (CH_4O), la celda se selló herméticamente y se calentó a la temperatura deseada de CO_2sc, se transfirió del cilindro de CO_2 a la bomba de alta presión para presurizarse, posteriormente se llenó con CO_2sc. Después de ocurrir un tiempo determinado la reacción y los productos disueltos en CO_2sc se despresurizaron la celda para ser diluidos en hexano con el propósito de determinar el contenido de biodiesel o también llamado FAME (éster metílico de ácido graso) mediante cromatografía de gases (GC). Hay que mencionar, además que el proceso de extracción con CO_2sc aumenta el rendimiento de los lípidos minimizando la necesidad de adicionar otros disolventes u otro procesamiento.

Recientemente se está comercializando el petro-diesel en Egipto (Mondal et al., 2017), mediante el desarrollo de biocombustibles microalgal para una simbiosis

industrial que podría incursionar eficientemente en América y Europa para hacer mezclas de biodiesel / combustible. Por lo tanto, el biocombustible con microalgas tiene puntos fuertes para superar las controversias en términos de entregar combustible limpio y sostenible a la civilización actual, con el fin de mitigar el calentamiento global y la crisis alimentaria pronosticada para el 2030 según National Geographic: comida versus preocupaciones de combustible (Bourne, 2018). Entre otros estudios aplicados a la producción de biodiesel por medio de CO_2sc se presentan; en Australia a partir de aceite residual de cocina presentando un 95% rendimiento frente al biodiesel con aceite convencional (Tuly, Saha, Mustafi y Sarker, 2017). En Portugal, un proceso de extracción con CO_2sc a partir de aceite de harina de plumas de pollo y su conversión a biodiesel con una presión (250 y 340 bar) a una temperatura constante (50°C) obteniendo mayor capacidad para solubilizar los lípidos y extraer más del 90% del total aceite disponible en harina de plumas de pollo en 1 hora.

Los autores (Gameiro, Lisboa, Paiva, Barreiros, y Simões, 2015) afirmaron un rendimiento máximo biodiesel de 96,7% como resultado de la conversión de aceite enzimático de acuerdo a lo establecido en la norma EN14214 (Norma europea con base en las especificaciones de calidad para FAME). Cabe resaltar que se presentan estudios similares como preparación de biodiesel con aceite de soja (Hengwen, Cao, y Zhang, 2005) en la Universidad tecnológica química de Beijing, China; producción

de FAME a partir de aceite de maíz por parte de la Universidad de Alberta, Canadá (Ciftci y Temelli, 2011); y una evaluación para extraer biodiesel por el centro nacional de investigación agrícola de Estados Unidos en base a ácidos grasos a con naranja de Osage (Moser, Eller, Tisserat y Gravett, 2011).

2.3.2 Obtención de Biogás.

En los últimos años, el uso no sostenible de los recursos alimentarios ha llevado a la generación de cantidades excesivas de desechos alimenticios que representan uno de los mayores recursos mundiales de lignocelulosa, compuesto fundamental de la biomasa y fuente inagotable de energía, para generar bioetanol. La tendencia en la agricultura ecológica condujo a grandes áreas agrícolas en Alemania y en Europa consistiendo en la biomasa como residuos pecuarios o de cultivos en el campo representando un gran potencial energético sin explotar para ser empleado como digestato para producir biogás. Al mismo tiempo, en Orlando, Florida la generación anual de tomates en mal estado, sin un sistema óptimo de tratamiento es de 396.000 Ton, un estudio realizado por American Association for the Advancement of Science y (Shrestha et al., 2016) con el objetivo de diagnosticar el volumen de residuos para la producción de electricidad; formulando hipotéticamente que cubriría

la demanda eléctrica de Disney World durante noventa días afirmando que los tomates dañados en cosecha son un potencial para la producción de energía, especialmente de biogás debido a que el licopeno presente en la cascara del tomate aumenta en un 41% la producción de metano (CH_4).

A su vez la industria del tomate es un de las más desarrolladas para el procesamiento de hortalizas en Europa a nivel global, recientemente una investigación por la Universidad de Milán, Italia por (Scaglia et al., 2019) para la producción de biogás a partir de cascaras y semillas de tomate empleando como disolvente el CO_2sc como sustituto de acetato de etilo ($C_4H_8O_2$) precursor de afectaciones en la salud humana, como el cáncer, cabe mencionar; que el proceso de evaporación del solvente y la disposición final aumenta los costos de producción a diferencia del CO_2sc la semilla actúa como codisolvente y se convierte en medio de la solubilización a licopeno presentando una mayor solubilidad en aceite y biodisponibilidad. Posteriormente, se analizaron dos muestras por extracción piloto de CO_2sc empleando una bomba de 20 kW con un caudal máximo de 90 kg de CO_2 con tres separadores (gravimétrico, ciclónico calentado, ciclónico enfriado) y el flujo de CO_2 se controló con un medidor de flujo presentando una recuperación de licopeno variable para la obtención de metano (CH_4) con una biodegradabilidad del 64% garantizando una alta producción de biogás y viabilidad económica.

2.3.3 Obtención de Bioetanol.

En los últimos años, se ha buscado alternativas para retrasar el agotamiento de los yacimientos a causa de reducir las emisiones gaseosas que contribuyen a la destrucción de la capa de ozono. De manera que se ha explorado diferentes campos para la sustitución parcialmente de combustible al biocombustible; como el etanol (alcohol carburante libre de agua conocido también como alcohol anhidro), presentando un alto octanaje (Higuera, García y Tristancho, 2007) es un producto 100% renovable obtenido a partir de cultivos bioenergéticos y biomasa. Entre los cultivos bioenergéticos más usados para la producción de etanol, la caña de azúcar es la materia prima más utilizada en países tropicales (Cardona, Sánchez, Montoya y Quintero, 2005). De acuerdo con un estudio realizado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), el Laboratorio Federal Suizo (EMPA), la Universidad Bolivariana y el Centro Nacional de Producción Más Limpia de Medellín sostienen que el biodiesel y el etanol colombianos están entre los mejores del mundo en cumplimiento con los estándares en materia de sostenibilidad para la contribución al cumplimiento de los ODS, muestra que el bioetanol colombiano reduce en un 74% las emisiones de GEI (C.U.E, 2012).

Desde hace más de ocho años, el Sector Azucarero Colombiano se ha convertido en fuente de energía, no sólo a través de la producción de azúcar, sino

también de bioetanol y la cogeneración eléctrica: dos alternativas ambientalmente sostenibles. Colombia es el tercer país productor de bioetanol en América Latina, después de Brasil y Argentina, con una producción anual de aproximadamente 390 millones de litros (Asocaña, 2015). En la Figura 21, la producción de etanol a partir de caña de azúcar puede describirse como un proceso compuesto de cinco etapas principales: Acondicionamiento de la materia prima, hidrólisis, fermentación, separación, deshidratación y tratamiento de efluentes (Cardona, Sánchez, Montoya y Quintero, 2012).

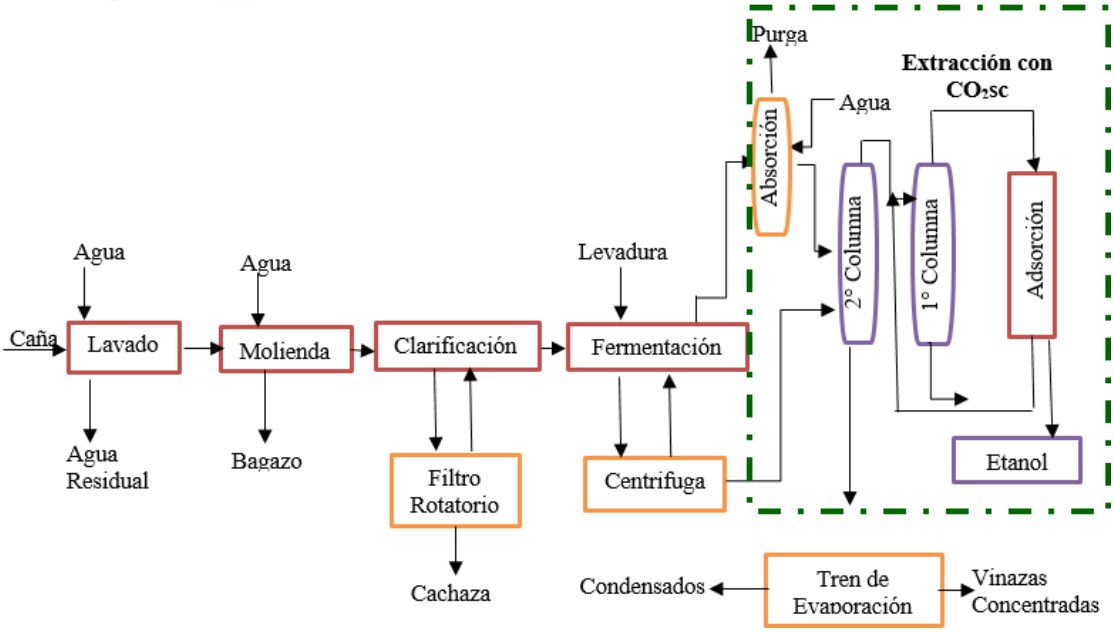
El acondicionamiento, consiste en el lavado inicial de la caña de azúcar, de acuerdo con (Cardona A. et al., 2005) mantuvieron una temperatura a 40ºC, posteriormente la trituración para la extracción del jugo azucarado con agua, como subproducto queda el bagazo (puede ser utilizado para generar vapor). El jugo de caña se clarifica con el fin de la disminución del pH a 4,5 para provocar el proceso de hidrolisis de sacarosa en hexosas (en el recipiente clarificador se precipita un lodo, que debe ser retirado y enviado a un filtro rotatorio al vacío para la obtención de cachaza), seguidamente, se presenta una secuencia de reacciones en la fermentación para la obtención de etanol y CO_2 por medio de la glucosa y fructuosa ante un biocatalizador (microorganismos como levaduras y bacterias).

Seguidamente se produce la recuperación del etanol por procesos de destilación y absorción en dos columnas, la primera se alimenta a través del caldo de

fermentación y remueve el CO_2 disuelto (enviado a la torre de absorción); la segunda columna concentra el etanol hasta una composición cercana a la azeotrópica (mezcla liquida de dos o más compuestos). Esta última columna, se propone con SFE debido a sus bajos requerimientos energéticos para la separación de mezclas azeotrópicas acuosas. Para la recuperación de etanol, (Alzate, Rodríguez y Suárez, 2004) afirman que la utilización del CO_2sc como solvente y han propuesto el uso de codisolventes como propano o propileno porque permite operar el proceso de extracción a mayores temperaturas a fin de tener valores más apropiados del coeficiente de distribución, conservando la alta densidad del fluido supercrítico y por ende la alta capacidad del solvente ocasionando la difusividad (aumento de temperatura) y una mayor distribución del alcohol en estado supercrítico favoreciendo el proceso de extracción del etanol.

Finalmente, para la obtención de etanol al ser apolar necesita de un codisolvente para arrastrar el agua a un estado supercrítico y por medio de la deshidratación del alcohol se presenta la recuperación del solvente. (Soria, 2014) afirma, la propiedad termodinámica que mide la capacidad de arrastre del agua en la columna de recuperación en el solvente es la volatilidad relativa agua/ fluido supercrítico. Esta volatilidad debe tener un valor superior a la unidad, a fin de asegurar que el agua será eliminada junto con el fluido supercrítico por el tope de la columna, mientras que por el fondo se obtendrá alcohol deshidratado. Con respecto al

tratamiento de efluentes, se recomienda el uso de reactores UASB de bajo requerimiento energético con lodos activados para una recirculación y reutilización contribuyendo con la disminución del volumen de vinazas, por lo cual, el grupo de Investigación en eficiencia energética y energías alternativas (GEAL) de la sede Palmira, Universidad Nacional de Colombia concluye que el contenido de materia orgánica, nutrientes como el nitrógeno, azufre y fósforo, pueden ser aprovechadas en el país principalmente para la producción de fertilizantes o biochar.



Fuente: Adoptado de (Cardona A. et al, 2005).

Figura 21. Proceso de obtención de etanol a partir de caña de Azúcar y CO_2sc.

En el presente, se está desarrollando líneas de investigación en Colombia para el aprovechamiento de la vinaza, desecho industrial que se genera al producir alcohol utilizando la melaza de caña de azúcar, el comportamiento del residuo en el agua es que consume gran parte del oxígeno provocando mortandad en peces, otro impacto es su difícil degradación ocasionado una contaminación en las fuentes hídricas desde el momento de la descarga. El uso de residuos industriales, como la vinaza debe ser considerada como una fuente promotora de materia prima, se está estudiando su aprovechamiento como fertilizante a partir del proceso de extracción supercrítica.

Por otra parte, es necesario la incorporación de procesos biotecnológicos como la molécula de CO_2 en esta supercrítico para desarrollo energético renovable teniendo presente que las reservas de gas están pronosticadas para 9,8 años y de petróleo para 6,2 años en el país, por estas razones, es necesario el uso de fluidos supercríticos como un alternativa para evitar el fracking y la contaminación de fuentes hídricas por el uso de aditivos químicos derivando una serie de impactos ambientales, como la perdida de retención de agua en el suelo, disminución del caudal anual, erosión del suelo, migración de especies, efectos ecotoxicológicos en la flora y fauna, entre otros impactos ambientales. En este contexto, el CO_2sc es considerado como una ficha esencial para la prevención de interferencias antropogénicas y estabilizar las emisiones de GEI. Los beneficios comprendidos por este solvente van desde la protección y conservación de los servicios ecosistemicos

del milenio (provisión, regulación y culturales), entre los cuales se encuentran, la formación de suelos, control de erosión, mantenimiento de fertilidad de suelos, fotosíntesis, ciclo de nutrientes, agua y aire, purificación de aguas residuales, reciclado de desechos y la producción primaria; adicionalmente, regula la adaptación de los ecosistemas al cambio climático garantizando las condiciones de desarrollo sostenible para el año 2030.

Capítulo III: Potencial que Presenta el CO_2sc en Colombia para el Manejo Sostenible de Recursos Naturales

Colombia tiene el potencial de producir productos sostenibles de base biológica, de manera que el impacto del cambio en el uso del suelo debe mitigarse para reducir las emisiones de GEI (Ramirez-Contreras et al., 2020). La incorporación del concepto de sostenibilidad en un país consiste en la generación simbiosis en los procesos productivos a nivel interno y externo (uso de materias primas, los productos obtenidos y el aprovechamiento de los residuos obtenidos) encaminado a la preservación del ecosistema, balance hídrico, reducción de las emisiones de CO_2 y perpetuación de la biodiversidad. (Gates, 2008) afirma, el potencial de desarrollo económico presentado por Colombia a través de su biodiversidad considerado entre los más altos a nivel mundial; pero aun si, se presenta un panorama desalentador debido al modelo de desarrollo de sectores productivos asociados a la biodiversidad generando la disminución de los recursos causado por la explotación de la naturaleza como fuente de obtención de materia prima (p.109).

En un país determinar la huella de carbono es un indicador ambiental que permite a las industrias y la población en general incorporar tecnologías verdes como CO_2sc a los procesos de producción como un cumplimiento a largo plazo los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) para la reducción de emisiones de gases de

efecto invernadero, posicionando a un territorio en una economía baja de carbono. De acuerdo con la establecido en ISO 14067:2018, el análisis de ciclo de vida del CO_2 es equivalente al de una cantidad específica de gas de efecto invernadero se calcula como la masa dada de un gas de efecto invernadero multiplicada por su potencial de calentamiento global. El uso de disolventes convencionales como el tolueno se considera cincuenta veces más potente como gas de efecto invernadero en comparación al CO_2sc con una huella de carbono mucho menor (UNE, 2019). En la actualidad, se busca responder interrogantes como: ¿Qué se tiene? ¿Dónde se encuentra? ¿Cuál es su estado de conservación? ¿Cómo se puede preservar? ¿Cómo se puede utilizar y cual método de extracción emplear? En realidad, las incógnitas presentan una relación directa con el CO_2sc, indispensable para evaluar la sostenibilidad del uso de flora y fauna en el territorio para la obtención de extractos naturales como potencial económico a través del uso de su biodiversidad.

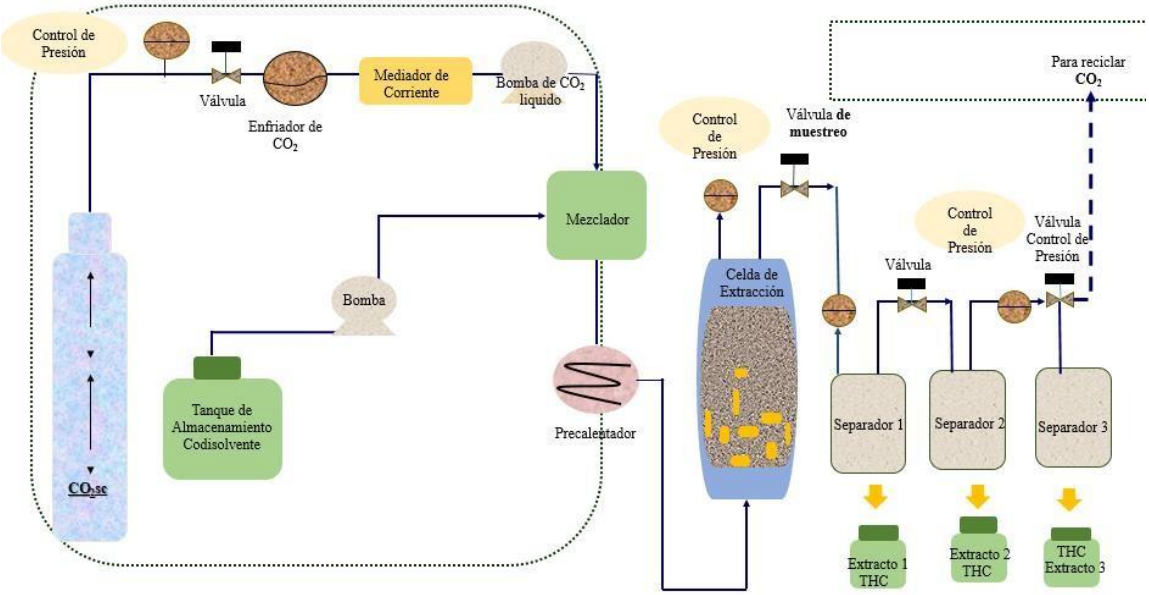
3.1 Extracción de Aceite de Cannabidiol.

En las últimas dos décadas se ha despertado un interés hacia la extracción de aceite de Cannabidiol para el cumplimiento de ODS. Colombia presenta ventajas para su cultivo por sus terrenos fértiles, la posición geográfica, pluviosidad, entre otras cosas; resaltando la incursión en exportaciones frente a países como Canadá y

Estados. En el presente, se han identificado 104 especies de cannabinoides en diferentes cepas de plantas de cannabis, como *tetrahidrocannabinol (THC), cannabidiol (CBD), cannabinol (CBN), cannabigerol (CBG) y cannabicromene (CBC).* Colombia es el principal importador a nivel mundial de THC asociado con las propiedades terapéuticas y medicinales de la planta (Florian, Parada y Garzón, 2009) de esta forma, se cataloga ante las empresas nacionales e internacionales como un territorio estratégico para la producción de cannabinoides. Actualmente, las empresas que empleando el CO_2 como fluido supercrítico en los procesos de extracción son: Pharmacielo, Econnabis, Clever Leaves, Cannavida y Kannabyte. A la fecha se presentan once (11) departamentos con licencias en las categorías de cannabis psicoactivo, no psicoactivo, semillas para siembra y fabricación de derivados; treinta y dos (32) municipios de Colombia que han emprendido el camino de la industria del cannabis utilizando tecnologías como CO_2sc (Restrepo, 2018).

En la Figura 22, se ilustra el proceso para la extracción de aceite de Cannabidiol, presentando tres recipientes de procesamiento, la muestra de Cannabidiol se coloca en un recipiente de extracción para presurizarse con CO_2. El CO_2 se enfría a aproximadamente en 276K para garantizar el estado líquido y la densidad adecuada antes de llegar a la bomba de alta presión para proporciona un caudal (dependiendo del compuesto a extraer con el Cannabidiol). Seguidamente se encuentra la bomba regulando el codisolvente (proporciona una cantidad determinada

de codisolvente y se mezcla con la corriente principal de CO_2). La corriente de disolvente fluye a través de un intercambiador de calor eléctrico para llevar el CO_2 líquido (y codisolvente) al estado supercrítico antes de entrar en el recipiente extractor para disolverse y transportarlos hasta los recipientes de extracción, posteriormente a los separadores de temperatura y presión, a niveles inferiores a las condiciones de funcionamiento utilizadas durante el SFE, para separar las diferentes fracciones.



Fuente: Adoptado de (Rovetto y Aieta 2017).

Figura 22. Proceso de obtención de THC con CO_2sc.

Un estudio realizado en la Universidad de Córdoba, Argentina para la obtención de THC por medio de la comparación de la calidad entre dos solventes el etanol y CO_2. Rovetto y Aieta (2017) afirman que el método de extracción con CO_2sc asegura el sabor a hierba del cannabis y el cáñamo, lo que también ayuda a mantener intacta la fragancia del producto (p.26). Una desventaja que presenta el uso del etanol como disolvente es que durante el tiempo de extracción el cáñamo pierde el sabor y disminuye el rendimiento de la extracción. Las extracciones de CO_2 son puras y carecen de toxicidad con una depresión y temperaturas variables. Durante el proceso de extracción a diferentes intervalos de tiempo con CO_2sc en los extractos 1, 2, 3 observaron una mayor concentración de THCA (Tetrahidrocannabinol) es mayor en el extracto 1 a comparación del extracto 2. Sugirieren que si la muestra analizada por un tiempo más largo, en el que la concentración del extracto 2 de THC aumentara y disminuirá el extracto 1. Esta observación es consistente con la idea de una posible descarboxilación (un grupo carboxilo es eliminado de un compuesto en forma de dióxido de carbón) cuando se expone a temperatura durante más tiempo durante en el proceso de extracción.

Por otra parte en la Figura 23, se exponen las ventajas del cannabis en Colombia (Melo, Silvestre y Silva, 2014) señalan que el cáñamo podría soportar altos niveles de metales pesados sin afectar al crecimiento de la planta, su cosecha o la

calidad de la fibra. Además, de que el cannabis permite reponer los nutrientes necesarios en solo un año de su cultivo; por lo que su siembra en tierras inertes aporta nuevas propiedades al sustrato y permite que se vuelva apta para el cultivo de cualquier tipo de vegetal resultando benéfico para las economías emergentes en el mundo como Colombia. La Universidad Nacional de Colombia ha realizado estudios con muestras de cannabis secas, cosechadas en Corinto, Cauca para la extracción de THC utilizando CO_2sc, sin embargo, la baja polaridad del CO_2 requiere cantidades diminutas de solventes orgánicos (Perrotin-Brunel et al., 2010), en este caso un codisolvente como el etanol (C_2H_5OH) para la obtención de mayor contenido en la extracción.

De lo anterior, las extracciones se llevaron a cabo en un período de seis horas usando un gradiente de polaridad del codisolvente para la obtención de la fracción polar para mejora el poder de solvatación CO_2sc, según lo mencionaban los autores (Gallo-Molina et al., 2019) a mayor temperatura se podría reducir la densidad de CO_2sc, a presiones de extracción más altas no presenta efecto en el soluto; en definición a altas temperaturas pueden mejorar el rendimiento de extracción, sin embargo, estos extractos se obtuvieron utilizando diferentes niveles de presión y temperatura (niveles bajos versus altos) suministrado por una bomba de líquido; mezclado con la corriente principal de CO_2 antes en la celda de extracción se agregaron al flujo del CO_2 el codisolvente a un ritmo constante para posteriormente,

eliminar el etanol al vacío; el rendimiento de la extracción fue mediante el %p/p analizados por cromatografía de gases cuantificando el contenido de THC para obtener un extracto limpio y de calidad superior.

Fuente: autoría propia

Figura 23. Ventajas del Cannabis en Colombia

Entre otras universidades que han adelantado proyectos y eventos en torno al cannabis se encuentran la Universidad de los Andes (Bogotá), la Universidad del Valle (Cali) y la y Antioquia (Medellín). También se han presentado avances médicos

por la empresa Canadiense PharmaCielo ubicada en Colombia que incorpora fluidos supercríticos en sus procesos como presenta en sus medicamentos entre los cuales se encuentra Sativex medicamento para el tratamiento de esclerosis múltiple con registro sanitario en Colombia, Epidiolex reduce la frecuencia de crisis convulsivas en pacientes en la fase terminal del síndrome de Dravet, una forma rara y devastadora de epilepsia que resiste a los fármacos y Marinol (dronabinol) indicado en el tratamiento de la anorexia relacionada con el VIH/SIDA, o para pérdida de peso, náuseas y vómitos asociados con la quimioterapia del cáncer (Restrepo, 2018). Por lo anterior, se interfiere que el desarrollo industrial de Cannabis en Colombia requiere el desarrollo de una industria proveedora de calidad y procesos amigables al medio ambiente brindados por la tecnología supercrítica a las necesidades de la clase mundial.

3.2 Extracción En Suelos Contaminados Empleando CO_2sc.

El deterioro de la tierra o desertificación es el problema ecológico contemporáneo de mayor importancia en los países en desarrollo (Moreno, 2000). El suelo, es el sistema más importante de producción agrícola, pero al generarse la erosión en dicha capa se presentaría una pérdida económica, la contaminación en la calidad del aire, vulnerabilidad a los sistemas ecológicos y afectación a la salud

humana. (Silva y Correa, 2009) contextualizan dos formas de contaminación del suelo presentes en la Tabla 5; el primer tipo de contaminación además de generar lodos y aguas acidas también es directamente promotor de los lixiviados por el vertido de residuos, afectando a aguas subterráneas o de superficie a diferencia del segunda clasificación, disminuye el crecimiento de microorganismos, cultivos, afectación de los ciclos biogeoquímicos en la parte biótica y abiótica provocando la disminución de propiedades edáficas y una mayor acumulación de contaminantes como metales pesados, incluido cromo (Cr), arsénico (As) y cadmio (Cd), entre otros (De Alba, Borselli y Lindstrom, 2003). Cabe mencionar que Colombia es el cuarto exportador de Cadmio (Cd) en Latinoamérica.

Tabla 5. Tipos de Contaminación del Suelo

Tipo de Contaminación	**Descripción**
Contaminación Puntual	Actividades de Minería, vertederos y actividad industrial
Contaminación Difusa	Prácticas agrícolas (fertilizantes) y el tratamiento y reciclaje inadecuado de los lodos y aguas residuales.

Fuente: autoría propia

Desde años atrás, en Colombia el uso intensivo de los pesticidas como el Dicloro difenil tricloroetano (DDT) y otros derivados de compuestos organoclorados o acumulación de los suelos por metales pesados debido al uso intensivo de la minería han aumentado la degradación de suelos agrícolas en el territorio. Por lo anterior, es necesario el desarrollo de nuevos procesos biotecnológicos para facilitar una remoción o extracción de contaminantes como los plaguicidas o metales de las capas del suelo. Una de las técnicas que se han propuesto en estos últimos años, es la técnica SFE empleado CO_2sc estudiado para extraer del perfil del suelo plaguicidas con bajo contenido en agua con posibilidades de automatización y miniaturización, una nanotecnología para la rehabilitación de suelos degradados (Valverde, 2002, p.150). En la Tabla 6, se presenta una recopilación de acuerdo con las investigaciones realizadas por diferentes autores para la extracción de contaminantes orgánicos con una mayor probabilidad de ser tratados, en especial policlorobifenilos (PCB's) y polihidroxialcanoato (PAH's); sobresaliendo el CO_2. Una ventaja de fusionar el CO_2 como solvente con un codisolvente como el metanol, es el rompimiento de las interacciones de la matriz del suelo en base a la fuerza de van der Waals por medio de puentes de hidrogeno (H) entre el codisolvente para efectuar una mejor extracción del contaminante en el suelo (Anitescu y Tavlarides, 2006), por ejemplo hidrocarburos evitando que se alcance aguas superficiales o infiltramiento de la superficie del terreno contaminando a un acuífero.

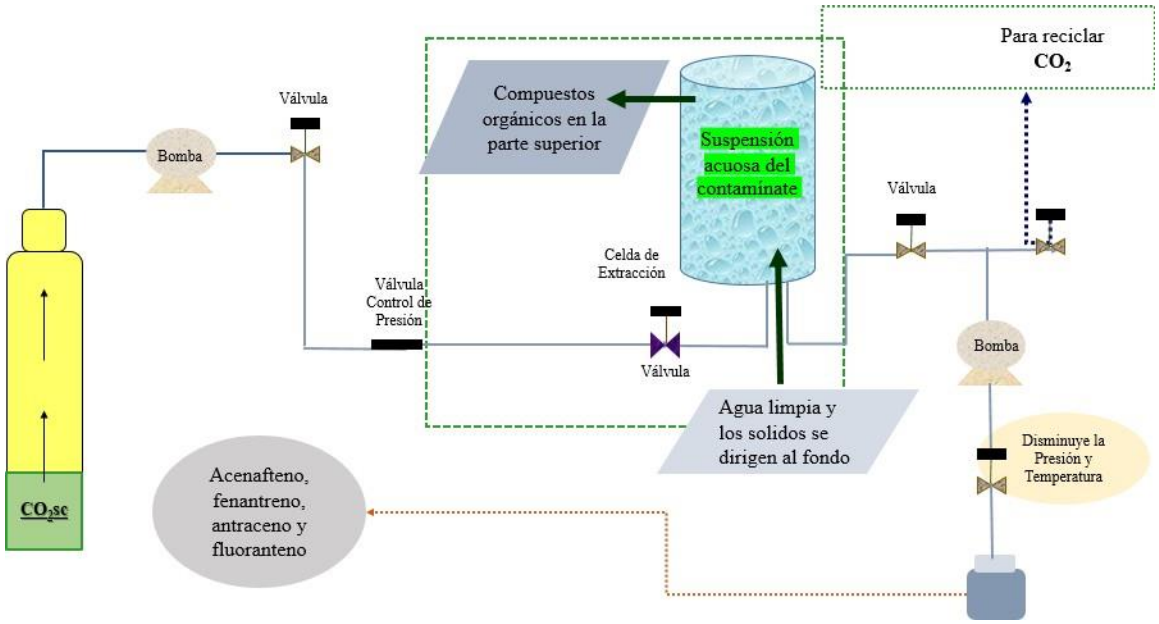
Tabla 6. Extracción de PHA's con CO_2sc de Suelos Contaminados

Disolvente	Condiciones Experimentales	PAH's Extraído	Cita
CO_2sc	T: 50-80°C, P: 234-611 Kg/cm$_2$	Naftaleno, fenantreno, antraceno, fluoranteno, pireno, benzo(a)antraceno, benzo(b)fluoranteno	(Librando et al., 2004)
	T: 50, P: 234 Kg/cm$_2$	Naftaleno, 1-mentilnaftaleno, 2-mentilnaftalenoantraceno, antraceno, dibenzotiofeno, fenantreno, benzo(a)pireno, pireno	(Miller y Hawthorne, 1995)
	T: 130°C, P:336 Kg/cm$_2$	Pireno, criseno, benzo(a)pireno, benzo fluoranteno	(Schleussinger, Ohlmeier, Reiss, y Schulz, 1996)
	T: 40-60°C, P: 306-611 Kg/cm$_2$	Acenafteno, fenantreno, antraceno y fluoranteno	(Rivas et al., 2009)

T: 40-100°C, P: 51-306 Kg/cm$_2$	Naftaleno	(Baig, Leeke, Hammond y Santos 2011)

Fuente: autoría propia

En la Figura 24, se ilustra el procedimiento base para la purificación de suelos que consta de introducir una suspensión acuosa del contamínate en un extractor que contiene el CO_2sc, para simplificar los compuestos orgánicos se desplazan a la parte superior del extractor mientras que el agua limpia y los sólidos se dirigen al fondo, después, el extracto que contiene el contamínate y el CO_2sc se bombea a un deposito donde disminuye la presión y temperatura, el contaminante se separa del fluido para una recirculación. En efecto, los fluidos supercríticos presentan una viabilidad de regeneración de suelos contaminados a comparación de la biorremedación que se desarrolla con contaminantes biodegradables, no es viable cuando se trata de contaminantes tóxicos, por otra parte, la incineración altera la estructura y los nutrientes del suelo.



Fuente: Adoptado de (Herrero, Mendiola, Cifuentes, y Ibáñez, 2010).

Figura 24. Proceso de purificación de suelos contaminados con CO_2sc.

Un estudio realizado en Colombia por (Forero, Castro y Guerrero, 2009) con muestras de suelo fortificadas con plaguicidas empleando CO_2sc para su purificación, utilizando 10 mL de cada uno de los cosolventes (acetato de etilo, acetona y metanol), en donde el CO_2 fue bombeado a través de cada cosolvente para saturarlo e enviarlo a la celda de extracción, cabe añadir que las muestras las sometieron a cuatro etapas de quince minutos cada una para un total de una hora de extracción, el objetivo de la metodología era unificar una sola muestra. En los análisis y resultados, obtuvieron

como mejor cosolvente el metanol con una recuperación superior al 70% (conformada por compuestos: heptenofos, acefato, metamidofos, triflumuron, monocrotofos, dimetoato, metalaxil, fenamifos, tebuconazol y difenoconazol) dada a la integración presentada por el plaguicida y el solvente. Cabe resaltar, que la solubilidad en el proceso de extracción del CO_2sc mejoro por la variación de la temperatura y presión sumando la adición del cosolvente polar. Actualmente se han estudiado mejoras en la etapa de limpieza de los extractos antes de su inyección directa en el sistema cromatográfico. En la Tabla 7, otros estudios en base a la recuperación de suelos en Lousiana, Newcastle y Nueva Jersey.

Tabla 7. Estudios de procesos de recuperación de suelos con CO_2sc.

Proceso de rehabilitación y recuperación de suelos	**Objetivo**	**Cita**
Extracción de fluido supercrítico del suelo contaminado con alquitrán de hulla	Tipo de suelo: Franco arenoso contaminado con alquitrán de hulla por más de 40 años Tiempo: 7 horas Codisolvente: Metanol Presión a 20 atm y temperatura a 32°C, la extracción del	(Montero, Schnelle y Giorgio, 1997)

Proceso de rehabilitación y recuperación de suelos	Objetivo	Cita
	fluoreno, benzotiofeno, bencenos y los naftalenos se extrajeron más del 80%.	
Extracción supercrítica de compuestos orgánicos tóxicos de suelos	Extraer PCB, DDT y toxafeno habían penetrado el suelo por un período de 10-12 años Presión a 100 atm y temperatura a 40°C	(Basil, Chien ping, Dooley, Knopf y Gambrel, 1987)
Enfoque de diseño experimental para la extracción de hidrocarburos aromáticos policíclicos del suelo con CO_2sc	El tiempo de extracción se fijó en un máximo de una hora por seis extracciones repetidas durante un período de tres días para la extracción de naftalina, acenaftileno, acenafteno, fluoreno, fenantreno, antraceno. Aportando que cuando la bomba de CO_2 alcanza su presión máxima presentando un bloqueo en el sistema se debe realizar un lavado en el sistema con el	(Barnabas, Dean,Tomlinson y Owen, 1995)

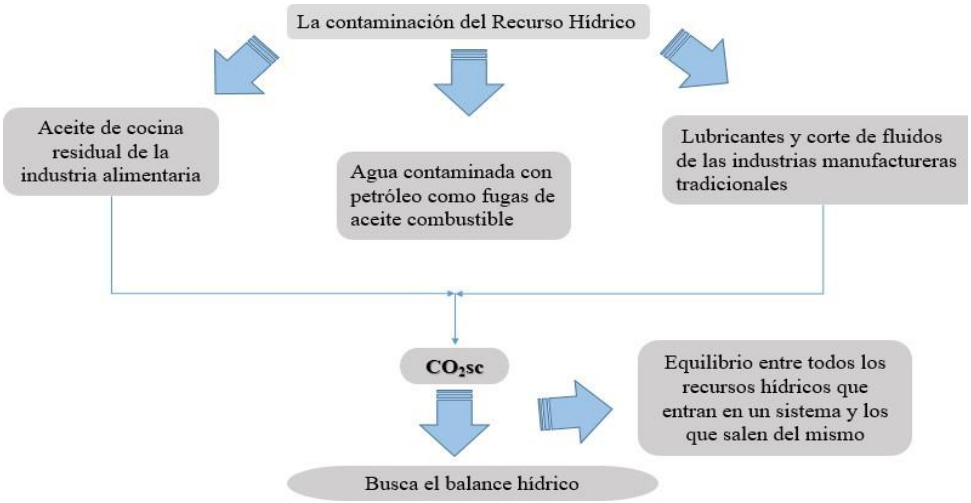
Proceso de rehabilitación y recuperación de suelos	Objetivo	Cita
	solvente (CO_2sc) para retomar la extracción.	

Fuente: autoría propia

Antes de examinar el siguiente tema, se debe enfatizar que la facilidad de separación del soluto extraído con CO_2sc da como resultado la creación de un pequeño volumen de residuos orgánicos para mejorar la eficiencia de los procesos de tratamiento posteriores, como la combustión. En este contexto, en las últimas décadas los aportes significativos para procesos de remediación de suelos como CO_2sc se ha convertido en un área de investigación de interés, como parte del cumplimiento a los compromisos de Colombia con el Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP), en el país se están promoviendo el desarrollo de líneas de investigación por parte de universidades con el fin de generar alternativas para reponer el medio alterado, como: reposición de vegetación, terreno, fauna, etc., asociado a los sistemas intensivos de producción agrícola presentando una continua evolución.

3.2 *Purificación De Aguas Residuales Empleando CO_2sc.*

La descarga de vertimientos domésticos e industriales sin tratar ha sido de forma constante afectando la calidad del agua y la salud pública, puesto que los cuerpos hídricos se ven afectados debido a que no alcanzan a asimilar estos contaminantes que aumentan con el tiempo. En Colombia tan sólo un 10% de las aguas residuales son tratadas y menos de la cuarta parte de los municipios cuentan con una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), según datos del Fondo Internacional de Emergencia de las Naciones Unidas para la Infancia (Ministerio De Ambiente, 2004). Para alcanzar una gestión integral y sostenible del agua, es fundamental disponer de estudios de tecnologías amigables con el medio ambiente; en consecuencia, el CO_2 se presenta como una alternativa para la disminución de la contaminación de los recursos hídricos del país. En la Figura 25, se ilustra las fuentes de contaminación de las aguas residuales, pero además el papel que desarrolla el CO_2 para dar soluciones a las empresas que no disponen o reciclan sus aguas, sino que las vierten directamente. En la actualidad los países desarrollados y en vía de desarrollo han adoptado procesos de implementación, para el tratamiento y disposición final de las aguas servidas, especialmente para las grandes ciudades. Esto con el fin de mantener como mínimo los criterios de calidad del recurso para los diferentes usos y el equilibrio del sistema natural basado en la capacidad de asimilación, afirma (Gonzalez y Echeverri Villa, 2004).



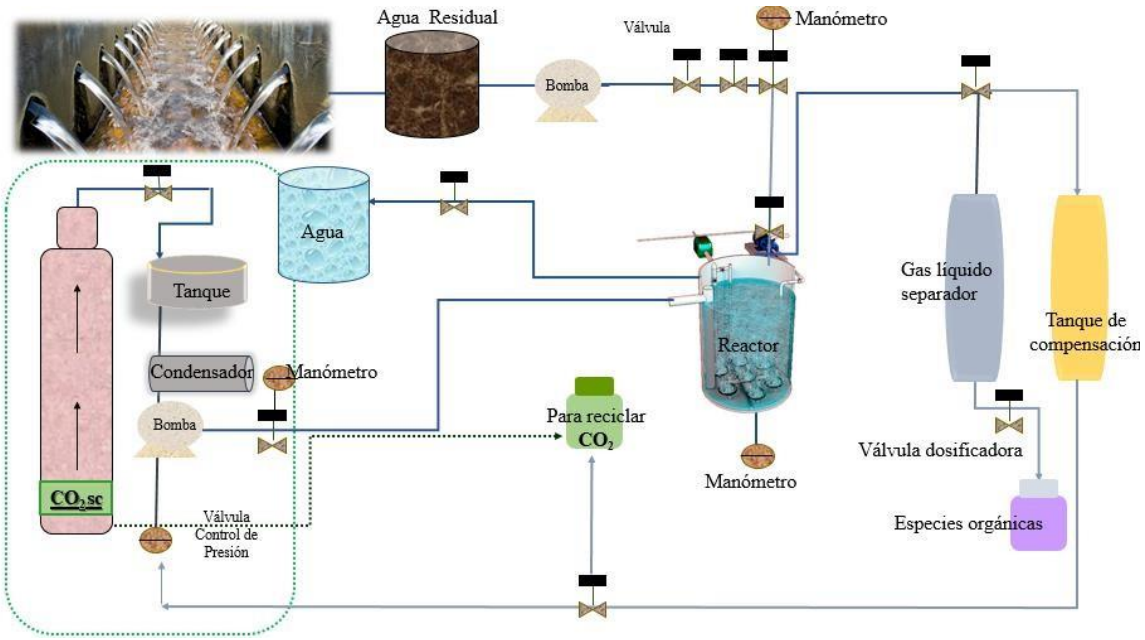
Fuente: autoría propia

Figura 25. Descripción del CO_2sc frente a la contaminación de aguas residuales.

En el presente, se presentan diferentes estudios entre los cuales se encuentra purificación de aguas residuales a través de un sistema de contracorriente impulsado por CO_2sc. En la Figura 26, se ilustra el proceso desarrollado compuesto por un reactor, un condensador, las válvulas para controlar la presión y la temperatura. En la parte superior se encuentran las aguas residuales y en la parte inferior se encuentra el cilindro de CO_2. Adicionalmente el reactor presentaba un calentador eléctrico para administrar energía al reactor y el CO_2 ingresa al condensador a una temperatura de -20°C, seguidamente se bombea al fondo del reactor con la bomba de alta presión. Una válvula dosificadora al final del sistema se encargaba de liberar agua, cabe

añadir que la presión en toda la reacción fue de 70 a 110 bar y con temperatura de 50°C a 80°C, un tiempo residual de 5 minutos cada ronda con el fin de obtener la mejor eficiencia de eliminación de DQO. (Jan y Wang, 2020) afirmaron, que a partir de la segunda ronda donde se distribuyó el CO_2sc el agua iba obteniendo cada vez más su color verdadero e iba perdiendo el color aparente, es decir, por cada ronda disminuía las partículas de solidos suspendidos que generaban la turbidez en el agua, obteniendo un mejor rendimiento.

El CO_2 en el trascurso de la purificación se usó para eliminar las sustancias tóxicas y no biodegradables, disolver contaminantes orgánicos y separarlos de las aguas residuales al presentar una baja capacidad de oxidación. No obstante, el CO_2 puede ser disuelto en materiales orgánicos nocivos para pasar a la etapa de despresurizado donde estos compuestos se separan en el proceso de alimentación del sistema. Se infiere que el tiempo de exposición se definió entre el periodo de contacto del alimentador con CO_2sc dentro del reactor controlado con las válvulas de entrada y salida, teniendo de cuenta el caudal. El CO_2 se recircula de nuevo al cilindro y la tasa de eliminación de aceite alcanzó el 100%.



Fuente: Adoptado de (Jan y Wang, 2020).

Figura 26. Purificación de aguas residuales con CO_2sc.

En la Tabla 8, se presentan diferentes estudios realizados para el tratamiento de aguas residuales en los últimos treinta y tres años. El CO_2sc en consonancia con los tratamientos convencionales presenta la ventaja de ser lipófilico (Afinidad con los lípidos) al tener la capacidad de separase el CO_2 de las aguas residuales contrario lo que sucede a los procesos de tratamiento puesto que emulsionan en el estado de separación (en el agua las gotas de aceite están dispersas en toda la fase acuosa, la emulsión se deja reposar, los dos componentes deben separarse con la densidad pero

no se va a presentar una separación perfecta y parte de las gotas de aceite permanecerán en suspensión en el agua).

Tabla 8. Procesos de extracción y purificación de aguas residuales con CO_2sc.

Método	**Cita**
Extracción y recuperación de hidrocarburos aromáticos policíclicos de sólidos ambientales utilizando fluidos supercríticos	(Prabhat, Rao, Kumar y Tomar et al., 2016)
Extracción de compuestos fenólicos a partir de sedimentos de la planta de celulosa de origen por extracción de dióxido de carbono supercrítico	(Lee et al., 1997)
Determinación de nilfenol en efluente y Lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales	(Lee y Peart, 1995)
Extracción de polietoxilatos de nonilfenol y sus carboxílicosmetabolitos ácidos en lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales por dióxido de carbono supercrítico	(Lee et al., 1997)

Fuente: autoría propia

En Colombia, se deben desarrollar más investigaciones para contemplar las aguas residuales sean parte del ciclo hidrológico. La tecnología de fluidos supercríticos, actualmente está siendo investigada para promover su tratamiento en los países desarrollados. El costo es ligeramente mayor que el de tratamiento convencional de aguas residuales; sin embargo, el tiempo de proceso es mucho más bajo, lo que resulta eficiente cuando se trata de un tratamiento de aguas residuales a mayor escala, teniendo presente que este servicio es considerado como una segunda fuente de abastecimiento en caso una emergencia a nivel mundial. Los fluidos

supercríticos promueven la reutilización de aguas residuales como un gestor ambiental evitando el vertido de aguas residuales a cauces o al mar, también garantizando el caudal anual en el país evitando efectos adversos en los recursos naturales.

Conclusión

Objetivo	Ejecución
1. Realizar una exploración teórica de las características fisicoquímicas del CO_2.	Las propiedades fisicoquímicas que presenta el CO_2 permiten innovar en procesos industriales debido a la combinación de densidad, viscosidad, difusividad, dependencia de la presión y temperatura para conferirlos como fluidos supercríticos. En este sentido el CO_2sc posee una capacidad excepcional para la extracción de aceites esenciales en la búsqueda de minimizar el impacto ambiental frente a otros disolventes.
2. Analizar de forma teórica el uso del CO_2 como insumo en procesos de producción sostenible	El CO_2sc se presenta como una alternativa para dar un equilibrio a la biosfera por las actividades industriales, su uso permite la reducción de las emisiones de CO_2. En consecuencia, se puede concluir que es un insumo para generar una producción sostenible en la industria farmacéutica, de bioplásticos y la producción de biodiesel o energía.
3. Definir el potencial que presenta el CO_2 en Colombia para el manejo sostenible de recursos naturales.	En el país se presenta una inadecuada recolección, tratamiento y disposición de residuos generados por la industria y mucho menos respecto a la reutilización del dióxido de carbono generado en procesos de combustión. El CO_2sc se presenta como un disolvente de interés industrial para la extracción de metabolitos secundarios con alto potencial en la industria farmacéutica. Además, su futura utilización a gran escala, puede contribuir a la protección de los recursos naturales en Colombia.

Recomendaciones

Es necesario orientar líneas de investigaciones respecto al aprovechamiento y uso de CO_2sc en Colombia definiendo estrategias a corto, mediano y largo plazo definiendo las prioridades que presenta el territorio como potencia en biodiversidad; incentivando a las comunidades, empresas nacionales e internacionales y el estado a invertir para el aprovechamiento de recursos para la prevención, protección y recuperación de materia prima. Un impulso ante el desarrollo de tecnologías productivas más limpias, mejor calidad y una economía circular ante el sector alimenticio, farmacéutico, químico, materiales, textil, energético, extracción de minerales, tratamiento de desechos y contaminantes para fortalecer el cumplimento de los ODS y ODM enfocados en la disminución de GEI.

Lista de referencias

Abdel-Gawwad, H.A., Hassan, H. S., Vásquez-García, S. R., Israde-Alcántara, I., Ding, Y.C., Martinez-Cinco, M.A., El-Kattan, I.M. (2019). Towards a Clean Environment, The Potential Application of Eco-Friendly Magnesia-Silicate Cement in CO2 Sequestration. *Journal of Cleaner Production*, 252,119875. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119875

Akolade, J. O., Mohammed, B., Swanepoel,A., Rasheed, B I., Abdullahi, A.Y., y Labuschagne, P. (2019). Microencapsulation of Eucalyptol in Polyethylene Glycol and Polycaprolactone Using Particles from Gas-Saturated Solutions. *RSC Advances*, 9(58), 34039–49. doi: 10.1039/c9ra06419b

Alzate, C. A. C., Rodríguez, M. I. M., y Suárez, J. A. Q. (2004). Selección de Tecnologías Apropiadas Para La Producción de Etanol Carburante. *Ingeniería de Recursos Naturales y Del Ambiente*, 1(2),48–55. Recuperado de: https://www.redalyc.org/pdf/2311/231117829008.pdf

Amouroux, J., Siffert, P., Pierre Massué, J., Cavadias, S., Trujillo, B., Hashimoto, K., Wang, X. (2014). Carbon Dioxide, *A New Material for Energy Storage*, 24 (4), 295–304. doi: 10.1016 / j.pnsc.2014.06.006

Andrich, G., Nesti, U., Venturi, F., Zinnai, A., y Fiorentini, R. (2005). Supercritical Fluid Extraction of Bioactive Lipids from the Microalga *Nannochloropsis* Sp. *European Journal of Lipid Science and Technology*. doi: 10.1002/ejlt.200501130

Anitescu, G., y Tavlarides, L. L. (2006). Supercritical Extraction of Contaminants from Soils and Sediments. *Journal of Supercritical Fluids*, 38(2),167–80. doi: 10.1016/j.supflu.2006.03.024

Ashraf-Khorassani, M., Taylor, L. T., y Zimmerman, P. (1990). Nitrous Oxide versus Carbon Dioxide for Supercritical Fluid Extraction and Chromatography of

Amines. *Analytical Chemistry*, 62(11),1177–80. doi: 10.1021/ac00210a016

Asocaña. (2015). El Sector Azucarero Colombiano, Más Que Azúcar, Una Fuente de Energía Renovable Para El País. *Cogeneración* 7. Recuperado de http://www.asocana.org/modules/documentos/10392.aspx

Bahramian, B., Chrzanowski,W., Kondyurin,A., Thomas, N., y Dehghani, F. (2017). Fabrication of Antimicrobial Poly(Propylene Carbonate) Film by Plasma Surface Modification. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 56(44),12578–87. doi: 10.1021/acs.iecr.7b01185

Baig, M. N., Leeke, G. A., Hammond, P. J., y Santos, R. C. D. (2011). Modelling the Extraction of Soil Contaminants with Supercritical Carbon Dioxide. *Environmental Pollution*, 159(7),1802–9. doi: 10.1016/j.envpol.2011.03.037

Barnabas, I. J., Dean, J.R., Tomlinson,W.R., y Owen,S.P. (1995). Experimental Design Approach for the Extraction of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Soil Using Supercritical Carbon Dioxide. *Analytical Chemistry*, 67(13), 2064–69. doi: 10.1021/ac00109a027

Barrales Cureño, H. J., y Ramírez Sepúlveda, M. F. (2013). Una Revisión Sobre La Producción de Taxoides Anticancerígenos En Cultivos in Vitro de Callos y Células de *Taxus* Sp. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 15(2),167. doi: 10.15446/rev.colomb.biote.v15n2.41743

Beckman, E. J. (2004). Supercritical and Near-Critical CO2 in Green Chemical Synthesis and Processing. *Journal of Supercritical Fluids*, 28(2–3),121–91. doi: 10.1016/S0896-8446(03)00029-9

Berrueco Martínez, B., y Langa Morales, E. (2009). Potencial de Las Yemas de Chopo Como Fuente de Compuestos Bioactivos y Actividad Antioxidante de Sus Extractos Supercríticos. *5 Congreso Forestal Espanol, Montes y Sociedad Saber Que Hacer*. (September). Recuperado de: http://www.redforesta.com/wp-

content/uploads/2012/12/Especial-5-Congreso-Forestal.pdf

Basil, O. B., Chien ping, C. K., Dooley, K.C., Knopf, F.C, y Gambrell, R.P. (1987). Supercritical Extraction of Toxic Organics from Soils. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 26(2):261–68. doi: 10.1021/ie00062a014

Bourne, J. K. (2018). La crisis alimentaria, Nuestro mundo hambriento y recalentado podría enfrentarse a una carencia de alimentos crónica. Mira las fotografías de John Stanmeyer. Recuperado de: https://www.nationalgeographic.com.es/mundo-ng/grandes-reportajes/la-crisis-alimentaria_380

Brown, T. L., Lemay, H.E., Bursten B.E., y Burdge, J.R. (2004). Quimica la Ciencia Central. Recuperado de: http://redbiblio.unne.edu.ar/pdf/0603-000916_D.pdf

Bruno, T. J., y Ely, J.F. (1985). *Supercritical Fluid Technologyl. doi: 10.1201/9780203736739-7*

Consorcio, C.U.E. (2012). Evaluación del ciclo de vida de la cadena de producción de biocombustibles en Colombia. *Sostenibilidad de Biocombustibles en Colombia*. Recuperado de: https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/488888/Capitulo_0_Resumen_ejecutivo_final.pdf/f032d18c-205f-499b-8d59-d1b359e7c572

Caraschi, J. C., Manzolli, U., y Lopes, A. (2002). Compósitos Biodegradáveis de Polihidroxibutirato (PHB) Reforçado Com Farinha de Madeira Propriedades e Degradação, 1609–14. Recuperado de: http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/view/2475

Cardona, A. C., Sánchez. O. J., Montoya, M. I., y Quintero, A. J. (2005). Simulación de Los Procesos de Obtención de Etanol a Partir de Caña de Azúcar y Maíz. *Scientia et Technica*, 39(28), 945–54. doi: 10.22517/23447214.6859

Carrilho, E., Tavares M. C., y Lanças, F. M. (2001). Supercritical Fluid in Analytical

Chemistry. I. Supercritical Fluid Chromatography: Thermodynamic Definitions | Fluidos Supercríticos Em Química Analítica. I. Cromatografia Com Fluido Supercrítico Conceitos Termodinâmicos. *Quimica Nova*, 24(4),509–15. doi: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422001000400012

Castillo-Peinado, L. S., y Luque de Castro, M. D. (2017). An Overview on Forensic Analysis Devoted to Analytical Chemists. *Talanta*, 167,181–92. doi: 10.1016/j.talanta.2017.01.087

Cejudo Bastante, C., Cran, M.J., Casas Cardoso, C., Mantell Serrano, E. J., Martínez de la Ossa, S., y Bigger, W. (2019). Effect of Supercritical CO2 y Olive Leaf Extract on the Structural, Thermal and Mechanical Properties of an Impregnated Food Packaging Film. *Journal of Supercritical Fluids*, 145,181–91. doi: 10.1016/j.supflu.2018.12.009

Cheirsilp, B., Suwannara, W., y Niyomdecha, R. (2011). Mixed Culture of Oleaginous Yeast Rhodotorula Glutinis and Microalga Chlorella Vulgaris for Lipid Production from Industrial Wastes and Its Use as Biodiesel Feedstock. *New Biotechnology*, 28(4),362–68. doi: 10.1016/j.nbt.2011.01.004

Chertow, M. R. (2000). Industrial Symbiosis Literature. *Industrial Environmental Management*. 25 (1), 313–337. doi: 10.1146 / annurev.energy.25.1.313

Ciftci, O. N., y Temelli, F. (2011). Continuous Production of Fatty Acid Methyl Esters from Corn Oil in a Supercritical Carbon Dioxide Bioreactor. *Journal of Supercritical Fluids*, 58(1),79–87. doi: 10.1016/j.supflu.2011.05.011

Costa Posada, C. (2007). La Adaptación Al Cambio Climático En Colombia Adaptation to Climate Change in Colombia. 26 (1), 74-80. Recuperado de: https://www.redalyc.org/pdf/1210/121015050010.pdf

Comisión Europea Secretaría General, CE. (2018). Una Estrategia Europea Para El

Plástico En Una Economía Circular. *EU Law and Publications* 20. Recuperado de: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:2df5d1d2-fac7-11e7-b8f5-01aa75ed71a1.0023.02/DOC_1&format=PDF

De Alba, S., Borselli. S. T., L, y Lindstrom, M. (2003). Degardación Del Suelo y Modificación de Los Paisaje Sagrícolas Por Erosión Mecánica (Tillage Erosion). *Edafología*, 10(3),93–101. doi: 10.1039/c9ra06419b

De Castro, M. D.L,. Valcarcel, M., y Tena, M.T. (1994). Physico — Chemical Properties of Supercritical Fluids. Pp. 32–78 in *Analytical Supercritical Fluid Extraction*, Vol, 1. doi: 10.1021/ie030199z

Dorado, D. J., Hurtado, A.M., y Martínez, H.A. (2016). Extracción Con CO_2 Supercrítico de Aceite de Semillas de Guanábana (Annona Muricata): Cinética, Perfil de Ácidos Grasos y Esteroles. *Informacion Tecnologica*, 27(5),37–48. doi: 10.4067/S0718-07642016000500005

Esquível, M., y Bernardo-Gil, M. G. (1993). El Uso de Fluidos Supercríticos En La Industria de Aceites Alimentarios. *Grasas y Aceites*, 44(1),1–5. doi: 10.3989/gya.1993.v44.i1.1112

Farias, R., Cavalcante, R. M., y Ufrj, E. Q. (2019). Prospecção Do Mercado Latino-Americano De Solventes Verdes. *Simpósio De 1 Pesquisa Operacional E Logística Da Marinha*, 1–13. Recuperado de: https://www.marinha.mil.br/spolm/sites/www.marinha.mil.br.spolm/files/PROSPECÇÃO DO MERCADO LATINO-AMERICANO DE SOLVENTES VERDES_0.pdf

Florian, N. M., Parada, F. A., y Garzón, W. F. (2009). Estudio Del Contenido de Canabinoides En Muestras de Marihuana (Cannabis Sativa L.) Cultivadas En Varias Regiones de Colombia. *Vitae*, 16(2), 237–44. Recuperado de: https://www.redalyc.org/pdf/1698/169815392008.pdf

Forero, J. R., Castro, H.I, y Guerrero, J.A. (2009). Extraction of Pesticides in Soil Using Supercritical Carbon Dioxide -Co-Solvents. *Revista Colombiana de Quimica,* 38(3),425–34. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28042009000300007

Foro minorista para la sostenibilidad. (2015). Messung Und Verkleinerung Des CO2 -Fußabdrucks von Ladengeschäften. Recuperado de: https://nachhaltigkeit.aboutamazon.de/pdfBuilderDownload?id=0000016e-17ea-da6f-a97f-7ffb42560000

Fukuoka, S., Fukawa, I., Tojo, M., Oonishi, K., Hachiya, H., Aminaka, M., Hasegawa, K., y Komiya, K. (2010). 超臨界二酸化炭素を用いた重合反応. *Catalysis Surveys from Asia,* 14(3–4), 146–63. doi: 10.1007/s10563-010-9093-5

Galán, M. D., y Garrido J. L. (2012). Cambio Climático. Perspectivas Futuras. *Observatorio Medioambiental,* 15(0),11–18. doi: 10.5209/rev_obmd.2012.v15.40329

Gallo-Molina, A. C., Castro-Vargas, H. I, Garzón-Ménde, W. F., Martínez, J. A, Rivera, Z. R, Monroy, J., King, W., y Parada-Alfonso, F. (2019). Extraction, Isolation and Purification of Tetrahydrocannabinol from the Cannabis Sativa L. Plant Using Supercritical Fluid Extraction and Solid Phase Extraction. *Journal of Supercritical Fluids,* 208–16. doi: 10.1016/j.supflu.2019.01.020

Gameiro, M., Lisboa, P., Paiva, A., Barreiros, S., y Simões, P. (2015). Supercritical Carbon Dioxide-Based Integrated Continuous Extraction of Oil from Chicken Feather Meal, and Its Conversion to Biodiesel in a Packed-Bed Enzymatic Reactor, at Pilot Scale. *Fuel,* 153, 135–42. doi: 10.1016/j.fuel.2015.02.100

García, B. M. (2015). Producción de Polihidroxialcanoatos a Partir de Agua Residual de La Industria Cervecera (tesis doctoral). 228. Recuperado de:

https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/17328/BenGarcia_Marta_TD_2015.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Gates, B. (2008). ¿Hay Futuro Para La Economía Colombiana En La Biodiversidad? *Revista Escuela de Administración de Negocios,* (62), 107–23. Recuperado de: https://journal.ean.edu.co/index.php/Revista/article/view/432

Gómez, J. M. (2016). Analysis of the Variation in the Efficiency in the Production of Biofuels in Latin America. *Estudios Gerenciales,* 32(139),120–26. doi: 10.1016/j.estger.2016.01.001

Gonzalez, D. H, y Echeverri Villa, J. A. (2004). Saneamiento Hídrico En Colombia: Instituciones y Situación Actual. *Ecos de Economía A Latin American Journal of Applied Economics,* 8(18), 73–97. doi: 10.1002/adhm.201700433

Guerrero Muñoz, N. (2017). Estudio de Un Proceso de Extracción e Impregnación de Extractos Naturales En Telas de Poliéster (Tesis de Pregado). Recuperado de: https://rodin.uca.es/xmlui/handle/10498/19740

Hengwen, H., Cao, W., y Zhang, J. (2005). Preparation of Biodiesel from Soybean Oil Using Supercritical Methanol and CO2 as Co-Solvent. *Process Biochemistry,* 40(9),3148–51. doi: 10.1016/j.procbio.2005.03.014

Hernández Romero, A., y Serra, J.B. (2007). Modelización de La Extracción de Aceites Vegetales Con CO2 En Condiciones Supercríticas (tesis de pregrado). Recuperado de: https://upcommons.upc.edu/handle/2117/104858

Herrero, M., Mendiola, J. A., Cifuentes, A., y Ibáñez, E. (2010). Supercritical fluid extraction: Recent advances and applications. Jou*rnal of Chromatography A*, 1217(16), 2495-2511. doi: 10.1016/j.chroma.2009.12.019

Higuera Cobos, O., García, L.F., y Tristancho Reyes, J. (2007). Biocombustibles y Su Aplicación En Colombia. *Scientia et Technica,* 2(34),171–75. doi: 10.22517/23447214.5581

Hogarth, J. y Hannay, J. (1879). The Royal Society Is Collaborating with JSTOR to Digitize, Preserve, and Extend Access to Proceedings of the Royal Society of London. www.Jstor.Org.Vol. 29:324–26. Recuperado de: http://e.guigon.free.fr/rsc/article/HillAV49.pdf

Iguarán, N., y Ramirez, O. J. (2016). Biomímesis Una Propuesta Ética y Técnica Para Reorientar La Ingeniería Por Los Senderos de La Sustentabilidad. *Gestión y Ambiente,* 19(1),155–66. Recuperado de: https://www.redalyc.org/pdf/1694/169446378010.pdf

Jan, H. S., y Wang, W. C. (2020). Waste-Water Purification through a Countercurrent System Driven by Supercritical Carbon Dioxide (SC-CO2) Part I: Experimental Investigation and Process Evaluation. *Separation and Purification Technology,* 242,116781. doi: 10.1016/j.seppur.2020.116781

Jacquel, N., Lo, C.W., Wei, Y. H., Wu, H. S., y Wang, S.S. (2008). Isolation and Purification of Bacterial Poly(3-Hydroxyalkanoates). *Biochemical Engineering Journal,* 39(1),15–27. doi: 10.1016/j.bej.2007.11.029

Jennings, D. W., Deutsch, H.D, Zalkow, L.H., y Teja, A.S. (1992). Supercritical Extraction of Taxol from the Bark of Taxus Brevifolia. *The Journal of Supercritical Fluids,* 5(1),1–6. doi: 10.1016/0896-8446(92)90033-G

Jessel, B., Tschimpke, O., y Walser, M. (2009). Naturaleza del poder productivo (p. 155). Hamburgo: Hoffmann y Campe. Recuperado de: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Forschungsdatenbank/fkz_3508_81_2600_produktivkraft_natur_bf.pdf

Jones, R. G., Kitayama, T., Hellwich, K.H., Hess, M., Jenkins, A.D., Kahovec, J., Kratochvíl, P., Mita, I., Mormann, W., Ober, C. K., Penczek, S., Stepto, R., y Thurlow, K. (2016). Source Based Nomenclature for Single Strand Homopolymers and Copolymers. *IUPAC,* 88,1073–1100. doi: 10.1515/pac-

2015-0702

Kramer, D. P., Santangelo, J G., Weber, J. J. (1988). CO2 Copolymer Ceramic-Binder Composition. Recuperado de: https://patents.google.com/patent/US7872201B1/en

Keskin, S., Kayrak-Talay, D., Akman, U., y Hortaçsu, Ö. (2007). A Review of Ionic Liquids towards Supercritical Fluid Applications. *Journal of Supercritical Fluids,* 43(1),150–80. doi: 10.1016/j.supflu.2007.05.013

Kröber, H., y Teipel, U. (2003). Partikelherstellung Unter Einsatz Überkritischer Fluide.

Chemie Ingenieur Technik, 75(6),687–90. doi: 10.1002/cite.200390130

Krygowski, T. M, Milczarek, E. y Wrona, P. K. (1980). An Extension of the Kamlet-Taft Basicity Scale of Solvents. *J. Chem. Soc., Perkin Trans*. 2, (11), 1563–1568. doi: 10.1039 / p29800001563

Lee, H. B., y Peart, T. E. (1995). Determination of 4-Nonylphenol in Effluent and Sludge from Sewage Treatment Plants. *Analytical Chemistry,* 67(13),1976–80. doi: 10.1021/ac00109a011

Lee, H. B., Peart, T.E., Bennie, D.T., y Maguire, R.J. (1997). Determination of Nonylphenol Polyethoxylates and Their Carboxylic Acid Metabolites in Sewage Treatment Plant Sludge by Supercritical Carbon Dioxide Extraction. *Journal of Chromatography,* 785(1–2),385–94. doi: 10.1016/S0021-9673(97)00384-1

Lenardão, E. J., Freitag, R.A., Dabdoub, M. J., Ferreira Batista, A.C., y Silveira, C.C. (2003). Green Chemistry Os 12 Princípios Da Química Verde e Sua Inserção Nas Atividades de Ensino e Pesquisa. *Quimica Nova,* 26(1),123–29. doi: 10.1590/S0100-40422003000100020

Lianghu, S., Sheng, H., Dongjie, N., Xiaoli, C., Yongfeng, N., y Youcai, Z. (2014). Municipal Solid Waste Management in China. *Environmental Science and*

Engineering Subseries Environmental Science, 9789814451727, 95–112. doi: 10.1007/978-981-4451-73-4_6

Librando, V., Hutzinger, O., Tringali, G., y Aresta, M. (2004). Supercritical Fluid Extraction of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Marine Sediments and Soil Samples. *Chemosphere*, 54(8), 1189–97. doi: 10.1016/j.chemosphere.2003.07.008

Liu, Z. H., Huang, J. Q., Sun, L. J., Lei, D., Cao, J., Chen, S., Shih, W.C, Qing, F. L., y you Z. W. (2018). PPC Based Reactive Hot Melt Polyurethane Adhesive (RHMPA). Efficient Glues for Multiple Types of Substrates. *Chinese Journal of Polymer Science*, 36(1), 58–64. doi: 10.1007/s10118-018-2011-4

Mekonnen, T. H., M. Misra., y Mohanty, A.K. (2015). Processing Performance and Applications of Plant and Animal Protein Based Blends and Their Biocomposites. Fourteenth. *Elsevier*. doi: 10.1016/B978-1-78242-373-7.00017-2

Melo, M. R., Silvestre, A.J, y Silva, C. M. (2014). Supercritical Fluid Extraction of Vegetable Matrices Applications Trends and Future Perspectives of a Convincing Green Technology. *Journal of Supercritical Fluid,s* 92, 115–76. doi: 10.1016/j.supflu.2014.04.007

Meng, M., Qiu, Z., Zhong, R., Liu, Z., Liu, Y., Chen, P. (2019). Adsorption Characteristics of Supercritical CO_2/CH_4 on Different Types of Coal and a Machine Learning Approach. *Chemical Engineering Journal*, 368,847–64. doi: 10.1016/j.cej.2019.03.008

Miller, David J., y Steven B, Hawthorne. (1995). Determination of Solubilities of Organic Solutes in Supercritical CO_2 by Online Flame Ionization Detection. *Analytical Chemistry*, 67(2), 273–79. doi: 10.1021/ac00098a006

Ministerio De Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2004). P*lan Nacional de*

Manejo de Aguas Residuales En Colombia. Recuperado de: http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/plan_nacional_de_manejo_de_aguas_residuales_municipales_en_colombia.pdf

Mondal, M., Goswami, S., Ghosh, A., Oinam, G.,Tiwari, O.N., Das, P., K. Gayen, K., Mandal, K., y Halder, G.N. (2017). Production of Biodiesel from Microalgae through Biological Carbon Capture: A Review. *Biotech,* 7(2). doi: 10.1007/s13205-017-0727-4

Montero, G. A., Schnelle, K.B. y Giorgio, T.D (1997). Supercritical Fluid Extraction of Contaminated Soil. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering.* 32(2),481–495. doi: 10.1080/10934529709376556

Moreno Becerra, A. (2000). Soil Conservation and Sustainable Development, Utopia or Possibility in Mexico?. Recuperado de: http://www.redalyc.org/pdf/573/57316209.pdf

Montoya, M. I., Quintero, J. A., Sanchez, O. J., y Cardona, C. A. (2012). Evaluación Económica Del Proceso de Obtención de Alcohol Carburante a Partir de Caña de Azúcar y Maíz. *Revista Universidad EAFIT,* 41(139), 76–87. Recuperado de: http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/832

Moser, B. R., Eller, F. J., Tisserat, B. H., y Gravett, A. (2011). Preparation of Fatty Acid Methyl Esters from Osage Orange Maclura Pomifera Oil and Evaluation as Biodiesel. *Energy and Fuels,* 25(4),1869–77. doi: 10.1021/ef200195v

Mulcahey, L. J., Hedrick J .L., y Taylor, L.T. (1991). Collection Efficiency of Various Solid-Phase Traps for Off-Line Supercritical Fluid Extraction. *Analytical Chemistry,* 63(20), 2225–32. doi: 10.1021/ac00020a007

Muñoz, C.C. (2013). Usos Medicinales Del Chopo Negro, (Populus Nigra L.).

Medicina Naturista, 7(2), 99–115. Recuperado de: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4297900

Muthuraj, R., y Mekonnen, T. (2018). Recent Progress in Carbon Dioxide (CO2) as Feedstock for Sustainable Materials Development: Co-Polymers and Polymer Blends. *Polymer*, 145,348–73. doi: 10.1016/j.polymer.2018.04.078

Normalizacion Española, UNE., ISO 14067. (2019). Gases de Efecto Invernadero y Huella de Carbono de Producto Requisitos y Directrices Para Cuantificación (ISO 14067:2018). Recuperado de: https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0062518

Othmer, K. (2000). Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. doi: 10.1002/ejlt.200501130

Ohlendorf, P., Ruyack, A., Leonardi, A. K., Shi, C., Cuppoletti, C., Bruce, I., Lal, A., y Ober, C. K. (2017). Transient Fiber Mats of Electrospun Poly(Propylene Carbonate) Composites with Remarkable Mechanical Strength. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 9(30), 25495–505. doi: 10.1021/acsami.7b04710

Pantoja Chamorro, A. L. (2016). Extracción de Aceites Con Fluidos Supercríticos a Partir de Semillas de Frutas Con Potencialidad En La Industria Cosmética (Tesis de maestria). Recuperado de: http://bdigital.unal.edu.co/54767/1/Tesis-Ana_Lucia_Pantoja_Chamorro-2016.pdf

Parada, A., Rodríguez, F. I., Nivia, A., Castro, H., y Restrepo, P. (2007). Aprovechamiento Integral de La Guayaba (Psidium Guajava l.) Obtención de Extractos a Partir de Semillas Utilizando Como Solvente Co2 Supercrítico. *Scientia et Technica*, 1(33), 79–82. doi: 10.22517/23447214.5819

Peng, L., Guo, R., Lan, J., Jiang, S., Zhang, Z. y Xu, J. (2018). Preparation and Characterization of Copper-Coated Polyester Fabric Pretreated with Laser by Magnetron Sputtering. *Journal of Industrial Textiles*, 48(2), 482–93. doi:

10.1177/1528083717736101

Perrotin-Brunel, H., Kroon, M. C.,Van Roosmalen, M. J. E., Van Spronsen, J., Peters, C.J., y Witkamp, G. J. (2010). Solubility of Non-Psychoactive Cannabinoids in Supercritical Carbon Dioxide and Comparison with Psychoactive Cannabinoids. *Journal of Supercritical Fluids,* 55(2), 603–8. doi: 10.1016/j.supflu.2010.09.011

Prabhat, P., Rao, A., Kumar, P., y Tomar, B.S. (2016). Supercritical Fluid Extraction and Purification of Uranium from Crude Sodium Diuranate. *Hydrometallurgy,* 164,177–83. doi: 10.1016/j.hydromet.2016.06.016

Prado, A. G. S (2003). Química Verde, Os Desafios Da Química Do Novo Milênio. *Quimica Nova,* 26(5), 738–44. doi: 10.1590/s0100-40422003000500018

Quadrelli, E. A, Armstrong, K. y Styring, P. (2015). Potential CO2 Utilisation Contributions to a More Carbon-Sober Future: A 2050 Vision. 285–302. doi: 10.1016 / b978-0-444-62746-9.00016-5

Quines, L. K. M., Schmidt, M., Zanfonato, K., Schmidell, W., y Aragão, G.M.F (2015). Methods of Extraction of Polyhydroxyalkanoates From Bacterial Biomass. *Química Nova,* 38(9),1207–18. doi: 10.5935 / 0100-4042.20150129

Ramírez-Contreras, N. E, Munar-Florez, D. A, García-Núñez, J. A., Mosquera-Montoya, M., y Faaij, A. P. (2020). The GHG Emissions and Economic Performance of the Colombian Palm Oil Sector; Current Status and Long-Term Perspectives. *Journal of Cleaner Production,* 258,120757. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120757

Rangel, J. O. (2005). La Biodiversidad de Colombia. *Palimpsestvs,* 0(5), 292–304. Recuperado de: https://revistas.unal.edu.co/index.php/Palimpsestvs/article/view/8083

Restrepo, J. M . (2018). Industria Del Cannabis En Colombia. *Procolombia, Co* 1–8. Recuperado de:

https://procolombia.co/sites/default/files/cartilla_cannabis_v2.pdf

Reichel, C. J., Levis Jr, W. W., y Pizzini, L. C. (1984). U.S. Patente No. 4,487,853. Washington, DC, U.S. Patent and Trademark Office.

Rico, D. R., y Hidalgo, S. G. (2008). El Futuro de Los Energéticos En La Globalización. *Análisis Económico,* XXIII(54),305–27. Recuperado de: https://www.redalyc.org/pdf/413/41311483015.pdf

Riechmann, J. (2005). ¿Cómo cambiar hacia Sociedades Sostenibles? Reflexiones sobre Biomímesis y Autolimitación. *Isegoría,* 0(32), 95–118. doi: 10.3989/isegoria.2005.i32.459

Rivas, J., Gimeno, O., Ruth, G., Portela, J. R., y de la Ossa, E. M. (2009). Remediation of PAH Spiked Soils: Concentrated H2O2 Treatment/Continuous Hot Water Extraction-Oxidation. *Journal of Hazardous Materials,* 168(2–3),1359–65. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.03.017

Rovetto, L. J., y Aieta, N, V. (2017). Supercritical Carbon Dioxide Extraction of Cannabinoids from Cannabis Sativa L. *Journal of Supercritical Fluids,* 129,16–27. doi: 10.1016/j.supflu.2017.03.014

Ruiz-Rodriguez, A., Bronze, M.R., y Ponte, M. N. (2008). Supercritical Fluid Extraction of Tobacco Leaves: A Preliminary Study on the Extraction of Solanesol. *Journal of Supercritical Fluids,* 45(2),171–76.doi: 10.1016 / j.supflu.2007.10.011

Ruiz-Rodriguez, A., Najdanovic-Visak, V., Visak, Z.P., Bronze, M. do R., Antunes, C., y Nunes da Ponte, M. (2009). High-Pressure Phase Behaviour of Binary (CO2 + Nicotine) and Ternary (CO2 + Nicotine + Solanesol) Mixtures. *Fluid Phase Equilibria,* 282(1),58–64. doi: 10.1016/j.fluid.2009.04.008

Sahena, F., I. S. M. Zaidul, S. Jinap, A. A. Karim, K. A. Abbas, N. A. N. Norulaini, and A. K. M. Omar. 2009. “Application of Supercritical CO2 in Lipid Extraction

A Review. *Journal of Food Engineering,* 95(2), 240–53. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2009.06.026

Sala, P. R. (1996). Aplicacion Del Dioxido De Carbono Supercritico Al Procesado De Alimentos: Nata, Subproductos Del Refinado De Aceites Vegetales Y Zumo De Naranja (Tesis doctoral). Recuperado de: https://core.ac.uk/download/pdf/19708632.pdf

Sánchez García, C. (2016). Desarrollo Y Caracterizacion De Polímeros Activos De Ácido Polilactico (Pla) Para Su Posible Uso En Envases Alimentarios (Tesis de pregrado). Centro de Investigacion de quimica aplicada. Recuperado de: https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/249/1/Tesis MAP Clara Sanchez Garcia Ene 23 2017.pdf

Scaglia, B., D'Incecco, P., Squillace, P., Dell'Orto, M., De Nisi, P., Pellegrino, L., y Adani, F. (2019). Development of a Tomato Pomace Biorefinery Based on a CO2-Supercritical Extraction Process for the Production of a High Value Lycopene Product, Bioenergy and Digestate. *Journal of Cleaner Production,* 243,118650. doi: doi: 10.1016 / j.jclepro.2019.118650

Schacht, C., Zetzl, C., y Brunner, G. (2008). From Plant Materials to Ethanol by Means of Supercritical Fluid Technology. *Journal of Supercritical Fluids,* 46(3), 299–321. doi: 10.1016/j.supflu.2008.01.018

Schleussinger, A., Ohlmeier, B., Reiss, I. y Schulz, S. (1996). Moisture Effects on the Cleanup of PAH-Contaminated Soil with Dense Carbon Dioxide. *Environmental Science and Technology,* 30(11),3199–3204. doi: 10.1021/es950914z

Serna, L., Rodríguez, A., y Albán, F. A. (2011). Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones. *Ingeniería y Competitividad* , 5(1), 16. doi: 10.25100/iyc.v5i1.2301

Sheehan, J., Dunahay, T., Benemann, J., y Roessler, P.(1998). A Look Back at the

U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program Biodiesel from Algae. *Laboratorio Nacional de Energía Renovable*, 328, 1-294.

Shomal, R., Hisham, H., Mlhem, A., Hassan, R., y Al-Zuhair, S. (2019). Simultaneous Extraction–Reaction Process for Biodiesel Production from Microalgae. *Energy Reports*, 5,37–40.doi: 10.1016 / j.egyr.2018.11.003

Shrestha, N., Fogg, A., Wilder, J., Franco, D., Komisar, S., y Gadhamshetty, V. (2016). Electricity Generation from Defective Tomatoes. *Bioelectrochemistry*, 112,67–76. doi: 10.1016/j.bioelechem.2016.07.005

Silva, S. M., y Correa, F. J. (2009). Análisis de La Contaminación Del Suelo: Revisión de La Normativa y Posibilidades de Regulación Económica. *Semestre Económico*, 12(23),13–34. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/pdf/seec/v12n23/v12n23a2

Soria, T. M. (2014). Termodinámica en biorefinerías: producción de bioetanol y alconaftas (Tesis doctoral). Recuperado de: http://200.49.237.216/bitstream/123456789/486/1/TESIS%20DOCTORAL_SORIA.pdf

Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M. M. B., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., y Midgley, P. M. (2013). Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. doi: 10.1017/CBO9781107415324

Takahashi, Y., y Kojima, R. (2003). Crystal Structure of Poly (Trimethylene Carbonate). 5139–43. *Macromolecules*, 36(14), 5139-5143. doi: 10.1021/ma030076q

Torres, C., y Mújica, O. J. (2004). Salud, Equidad y Los Objetivos de Desarrollo Del Milenio. *Revista Panamericana de Salud Publica/Pan American Journal of*

Public Health, 15(6), 430–39. doi: 10.1590/s1020-49892004000600012

Trecco, C., Castello, V., Romina, K., Sobrero, C., Sisti, A., y Oviedo, S. (2011). Efficient Management of Waste within the Best Practices of the Pharmaceutical Industries. *Producción Mas Limpia,* 6(2),32–46. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552011000200004&lng=en&nrm=iso&tlng=es

Tsai, W.C., y Wang, Y. (2019). Progress in Polymer Science Progress of Supercritical Fluid Technology in Polymerization and Its Applications in Biomedical Engineering. *Progress in Polymer Science,* 98,101161. doi:10.1016 / j.progpolymsci.2019.101161

Tuly, S.S., Saha, M., Mustafi, N.N., y Sarker, M.R.I. (2017). Production and Application of Biodiesel from Waste Cooking Oil. *AIP Conference Proceedings,* 1851,1–7. doi: 10.1063/1.4984659

Valero-Valdivieso, M. F., Ortegón, Y., y Uscategui, Y. (2013). Biopolímeros: Avances y Perspectivas. *DYNA (Colombia),* 80(181),171–80. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532013000500019

Valverde, A. (2002). Extracción Con Fluidos Supercríticos; Principios y Aplicaciones Al Análisis de Residuos de Plaguicidas. *Journal AOAC,* 78,141–54. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/28151856_Extraccion_con_fluidos_supercriticos_principios_y_aplicaciones_al_analisis_de_residuos_de_plaguicidas

Vandana, V., Teja, A.S., y Zalkow, L. H. (1996). Supercritical Extraction and HPLC Analysis of Taxol from Taxus Brevifolia Using Nitrous Oxide and Nitrous Oxide + Ethanol Mixtures. *Fluid Phase Equilibria* ,116(1–2),162–69. doi: 10.1016/0378-3812(96)02991-3

Von Wühlisch, G. (2016). Pappeln und Weiden in Deutschland: Bericht der nationalen Pappelkommission 2012-2015. *Thünen Working Paper*. Recuperado de: https://www.econstor.eu/handle/10419/146946

Welle, A., Kröger, M., Döring, M., Niederer, K., Pindel, E., y Chronakis, I.S. (2007). Electrospun Aliphatic Polycarbonates as Tailored Tissue Scaffold Materials. *Biomaterials,* 28(13),2211–19. doi: 10.1016/j.biomaterials.2007.01.024

Wenzel, J. E., Moorman, V., Wang, L., Spencer-Williams, I., Hall, M., Samaniego, C.S., y Ammerman, M.L. (2019). In-Situ Extraction and Impregnation of Black Walnut Husk into Polyethylene Film Using Supercritical Carbon Dioxide with an Ethanol Modifier. *Food Science and Nutrition,* 8(1), 612–19. doi: 10.1002/fsn3.1348

Wu, D., Li, W., Zhao, Y., Deng, Y., Zhang, H., Zhang, H., y Dong, L. (2015). Thermal, Mechanical and Rheological Properties of Biodegradable Poly(Propylene Carbonate) and Poly(Butylene Carbonate) Blends. *Chinese Journal of Polymer Science (English Edition,)* 33(3), 444–55. doi: 10.1007/s10118-015-1597-z

Xiaoding, X., y Moulijn, J.A. (1996). Mitigation of CO2 by Chemical Conversion: Plausible Chemical Reactions and Promising Products. *Energy and Fuels,* 10(2), 305–25. doi: 10.1021 /ef9501511

Xie, L. H., Xu, M. M., Liu, X, M., Zhao, M, J., y Li, J. R. (2020). Hydrophobic Metal–Organic Frameworks: Assessment, Construction, and Diverse Applications. *Advanced Science,* 7(4), 1901758. doi: 10.1002/advs.201901758

Xu, C. S, Tian, C.C, Zhang, W.D, Xing, J.W, Cai, Z.S, Ren, Y.,Wei, Z. X., y Liu H.Y. (2014). Synthesis and Properties of Polypropylene Carbonate Polyol-Based Waterborne Polyurethane. *Advanced Materials Research,* 936,58–62. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.936.58

Xu, G., Guan, L., Sun, J. y Chen, Z.Y. (2009). Oxidation of Cholesterol and β and Prevention by Natural Antioxidants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry,* 57(19),9284–92. doi: 10.1021/jf902552s

Ye, C., y Chi, H. (2018). A Review of Recent Progress in Drug and Protein Encapsulation: Approaches, Applications and Challenges. *Materials Science and Engineering, C* 83(August 2017),233–46. doi: 10.1016/j.msec.2017.10.003

Yildiz, N., Atún, Ş., Döker, O., y Çalimli, A. (2007). Micronization of Salicylic Acid and Taxol (Paclitaxel) by Rapid Expansion of Supercritical Fluids (RESS). *Journal of Supercritical Fluids,* 41(3),440–51.doi: 10.1016/j.supflu.2006.12.012

Zacharof, M. P., y Lovitt, R. W. (2015). Adding Value to Wastewater by Resource Recovery and Reformulation as Growth Media: Current Prospects and Potential. *Journal of Water Reuse and Desalination,* 5(4),473–79. doi: 10.2166/wrd.2015.117

Apéndice

Apéndice A. Empresas comercializadoras de equipos de extracción de supercrítica

Tabla 9. Empresas que comercializan CO_2sc en distintos procesos industriales.

Empresa	Fotografía	Utilidad	Cita
Alibaba Group		Extracción de Maquina Farmacéutica	(Ma y Tsai, 1999).
Analitek		Equipo de extracción CBD supercrítica de hojas de cannabis a base de hierbas	(Scott, 1994).

Anditecnica		Máquina de extracción de bioetanol de aceite de aguacate equipo de concentración de azúcar	(Andina de Tecnología. 1993).
Parrinst		Extracción de stevia con CO_2sc	(Parr Instrument Company. 1899).
Waters S.A. de C.V		Máquina comercial de extracción de aceite de plástico de desecho de fluidos Co_2 supercrítica de aguacate	(QuimiNet, 2000).

Fuente: autoría propia

Referencias Bibliográficas

Ma, J. S., y Tsai, J. (1999). Alibaba Group. Plataforma líder para el comercio mayorista global Servimos a millones de compradores y proveedores en todo el mundo. Recuperado de: https://www.alibaba.com/

Scott, R (1994). Analitek. Analito, tu éxito es tu pasión. Recuperado de: www.analitek.com

Andina de Tecnologías, SAS. (1993). Comercializadora de Tecnologías de punta para satisfacer las necesidades de los clientes. Recuperado de: http://www.anditecnica.com/equipos-robustos.html

Parr Instrument Company. (1899). Fabricación y venta de reactores químicos, recipientes a presión, calorímetros, recipientes de combustión y equipos relacionados desarrollados específicamente para uso en laboratorio. Recuperado de: https://www.parrinst.com/

QuimiNet. (2000). Portal líder en Negocios e Información para la Industria Manufacturera mundial. Recuperado de: https://www.quiminet.com/