



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA



Diseño de un sistema de extracción de aceite de cáñamo para su uso en la industria farmacéutica y cosmética

AUTOR: Jaime López Moncholí

TUTOR: María Isabel Iborra Clar



Curso Académico: 2020-21



RESUMEN

En este trabajo de fin de grado se pretende en primer lugar, diseñar un proceso industrial eficiente, dentro del marco legal europeo, para producir aceite procedente del cáñamo con alto contenido en CBD para la posterior venta al por mayor a diferentes industrias como la farmacéutica o cosmética.

El proceso de diseño recoge varios puntos, entre ellos, la elección de la semilla a cultivar, entre las variedades certificadas por la unión europea, así como el posterior tratamiento para extraer eficientemente el aceite y crear subproductos. A este proceso de diseño, le acompaña también una estimación, tanto de la producción de aceite, como de la superficie de terreno que será ocupada basándose en los rendimientos de la variedad de cáñamo que será cultivada.

También, se puede plantear hacer una valorización de los residuos generados por la actividad descrita anteriormente y modelar un proceso de transformación en cáñamodiesel y otros combustibles como metano o etanol, favoreciendo así una economía circular en la que la producción de residuos de desecho se minimice.

Además, se tratarán temas como los beneficios intrínsecos del cáñamo, el porqué de su interés industrial y el auge que actualmente está experimentando. Por último, se tratará el marco legal tanto europeo como Nacional para la cosecha del cáñamo y la producción de su extracto.

Finalmente, el sistema planteado se presupuestará y se realizará un pequeño estudio de mercado.

Palabras Clave: Cáñamo industrial, CBD, Economía circular, Cañamodiesel.

RESUM

En aquest treball de fi de grau es pretén en primer lloc, dissenyar un procés industrial eficient, dins del marc legal europeu, per a produir oli procedent del cànem amb alt contingut en CBD per a la posterior venda a l'engròs a diferents indústries com la farmacèutica o cosmètica.

El procés de disseny recull diversos punts, entre ells, l'elecció de la llavor a cultivar, entre les varietats certificades per la unió europea, així com el posterior tractament per a extraure eficientment l'oli i crear subproductes. A aquest procés de disseny, li acompanya també una estimació, tant de la producció d'oli, com de la superfície de terreny que serà ocupada basant-se en els rendiments de la varietat de cànem que serà cultivada.

També, es pot plantejar fer una valorització dels residus generats per l'activitat descrita anteriorment i modelar un procés de transformació en Cànem-dièsel i altres combustibles com a metà o etanol, afavorint així una economia circular en la qual la producció de residus de deixalla es minimitza.

A més, es tractaran temes com els beneficis intrínsecs del cànem, el perquè del seu interès industrial i l'auge que actualment està experimentant. Finalment es tractarà el marc legal tant Europeu com Nacional per a la collita del cànem i la producció del seu extracte.

Finalment, el sistema plantejat es pressupostarà i es realitzarà un xicotet estudi de mercat.

Paraules Clau: Cànem industrial, CBD, Economia circular, Cànem-dièsel.

ABSTRACT

In this final degree project it is intended, first of all, to design an efficient industrial process, within the European legal framework, to produce oil from hemp with high CBD content for subsequent wholesale to different industries such as pharmaceuticals or cosmetic.

The design process includes several points, among them, the choice of the seed to be grown, among the varieties certified by the European Union, as well as the subsequent treatment to efficiently extract the oil and create by-products. This design process is also accompanied by an estimate of both oil production and the area of land that will be occupied based on the yields of the variety of hemp that will be cultivated.

Also, it can be considered to make a valuation of the waste generated by the activity described above and model a transformation process into hemp-diesel and other fuels such as methane or ethanol, thus favoring a circular economy in which the production of waste residues is minimized.

In addition, topics such as the intrinsic benefits of hemp, the reason for its industrial interest and the boom it is currently experiencing will be discussed. Finally, the European and National legal framework for the harvest of hemp and the production of its extract will be discussed.

Finally, the proposed system will be budgeted, and a small market study will be carried out.

Key Words: Industrial hemp, CBD, Circular economy, Hemp-diesel.

ÍNDICE

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFG

- I. Memoria
- II. Presupuesto
- III. Planos

Índice de la memoria

1.	Objeto.....	1
2.	Justificación	2
2.1.	Justificación técnica.....	2
2.2.	Justificación académica.....	4
3.	La materia prima	5
3.1.	Historia del Cáñamo	5
3.2.	Producción Cáñamo	6
3.3.	Taxonomía del Cáñamo.....	7
3.4.	Química del cáñamo.....	8
3.4.1.	Delta-9-tetrahidrocannabinol (THC).....	8
3.4.2.	Cannabidiol (CBD).....	8
3.4.3.	Terpenos.....	9
3.4.4.	El efecto séquito (Entourage effect)	9
3.5.	Beneficios Hortícolas del cáñamo	10
3.6.	Usos del cáñamo	11
4.	Plan de cultivo	14
4.1.	Proyecto de implantación	14
4.2.	Dimensionamiento de la superficie	17
4.3.	Elección de la semilla	19
4.4.	Siembra	21
4.5.	Riego.....	22
4.6.	Fertilización	23
4.7.	Cosecha	24
4.8.	Secado	25
4.9.	Molienda	26
5.	Proceso de extracción del aceite.....	27
5.1.	Fundamentos de la extracción	27
5.2.	Métodos convencionales de extracción sólido líquido	28
5.2.1.	Extracción con disolventes	28
5.2.2.	Destilación al Vapor.....	29
5.2.3.	Extracción con CO ₂ supercrítico.	30
5.3.	Extracción con fluidos supercríticos.....	31

Diseño de un sistema de extracción de aceite de cáñamo para su uso en la industria
farmacéutica y cosmética

5.3.1.	El CO ₂ como disolvente	33
5.4.	Establecimiento de las variables de operación.	34
5.4.1.	Estudios previos	34
5.4.2.	Condiciones de operación del proceso	41
5.5.	Descripción de la producción	42
5.6.	Descripción de la operación	45
5.7.	Valorización de residuos	46
5.7.1.	Codigestión anaerobia de la Biomasa	46
5.7.2.	Producción de biodiesel a partir de semillas de cáñamo	52
6.	Diseño de la instalación.....	57
6.1.	Extractor	57
6.2.	Separador.....	58
6.3.	Ebullidor tipo caldera.....	59
6.4.	Bomba	60
6.5.	Intercambiador.....	63
6.6.	Elementos de control.....	65
6.6.1.	Equipos Principales.....	65
6.6.2.	Elementos de seguridad	66
6.6.3.	Estrategia de control	67
7.	Legislación española y europea	68
7.1.	Cultivo y Cosecha	68
7.1.1.	Procedimiento para el análisis de THC.....	70
7.1.2.	Normas para la solicitud y concesión de ayudas al cultivo del cáñamo.	72
7.2.	Normativa y legislación del aceite de CBD	73
7.3.	Legislación sobre sistemas a presión	75
7.4.	Legislación sobre medio ambiente	76
8.	Conclusiones.....	77
9.	Bibliografía	78
10.	Anexos	82

Índice de figuras.

Figura 1. Especies de la familia Cannabis Sativa L. (Fuente: Dinafem)	7
Figura 2. Estructura de la molécula de THC (Fuente: sensiseeds)	8
Figura 3. Estructura de la molécula de CBD (Fuente: Sensiseeds).....	9
Figura 4. Puerta de automóvil construida con fibras de cáñamo (Fuente: Bioguía).....	11
Figura 5. Cañamones o semillas de cáñamo (Fuente: Fontdevida).....	12
Figura 6. Previsión de crecimiento subproductos del cáñamo hasta 2025 (Fuente: Grandviewresearch).....	13
Figura 7. Superficies y Rendimientos de cultivo en España en 2019 en hectáreas.	14
Figura 8. Evolución de superficies y producción hasta el año 2018 (Fuente: Ministerio de agricultura pesca y alimentación.	17
Figura 9. Detalle de la planta futura 75 con su certificado de la UE (Fuente: Growbarato).....	19
Figura 10. Sembradora kverneland (Fuente: Agroptima)	21
Figura 11. Campo con sistema de riego por gravedad (Fuente: Agroptima)	22
Figura 12. Tricomas del cáñamo en estado de recolección (Fuente: Matillaplant).	24
Figura 13. Cosechadora para cáñamo FarmMax (Fuente: FarmMax).....	24
Figura 14. Proceso de Secado de las flores de Cáñamo en rejillas marca Montel. (Fuente: Montel)	25
Figura 15. Molino de martillos marca Pimecsa. (Fuente: Pimecsa)	26
Figura 16. Esquema de fases y técnicas de extracción.	27
Figura 17. Detalle a pequeña escala de equipo Soxhlet. (Fuente: Indiamart)	28
Figura 18. Esquema de equipo de destilación por arrastre de vapor (Fuente: Indiamart).....	29
Figura 19. Planta completa de extracción de fluidos supercríticos. (Fuente: Interempresas) ...	30
Figura 20. Diagrama Presión Temperatura indicando el punto crítico. (Fuente: Esacademic)...	31
Figura 21. Diagrama de bloques del proceso.	32
Figura 22. Depósito criogénico de CO ₂ (Fuente: Directindustry)	33
Figura 23. Efectos principales.	36
Figura 24. Resultados de los experimentos de Clavier et al.....	37
Figura 25. Flores de cáñamo secas y molidas preparadas para la extracción (Fuente: Laverderrevolución).	42
Figura 26. Diagrama de bloques con peso de materia a tratar.....	44
Figura 27. Diagrama de flujo del proceso	45
Figura 28. Cantidad de cultivos energéticos en Europa (Fuente: OP.europa).	46

Figura 29. Etapas del proceso de digestión (Fuente: Agrowaste).....	48
Figura 30. Generación de fangos EDAR hasta 2017. (Fuente: Gobierno de Navarra)	49
Figura 31. Equivalencia de 1m ³ de biogás con otro tipo de combustibles (Fuente: CIEMAT)	52
Figura 32. Aspecto verdoso del biodiesel.	53
Figura 33. Mecanismo químico de transesterificación.(Fuente: CEUPE)	55
Figura 34. Evaporador Flash (Fuente: Chemical Process Equipment: Selection and Design).	58
Figura 35 Bomba de diafragma (Fuente: Dienerprecisionpumps).....	61
Figura 36. Gráfica caudal-presión para la selección de la bomba(Fuente: Lewa).....	62
Figura 37. Lewa ecoflow M900 series (Fuente: Lewa)	62
Figura 38. Intercambiador de carcasa y tubos (Fuente: Chemical Process Equipment: Selection and Design).....	63
Figura 39. Cierre de abrazadera. (Fuente: Wurth)	65
Figura 40. Disco de ruptura (Fuente: Auroiss).....	67
Figura 41. Lista del catálogo común de las variedades de las especies de plantas agrícolas. (Fuente: OPEuropa.eu).....	68
Figura 42. Formulario de Inscripción en el REGIPA (Fuente: Laverderevolución)	69
Figura 43. Carteles informativos a pie de cultivo. (Fuente: Laverderevolución)	69
Figura 44. Bálsamo corporal a base de CBD (Fuente: Amazon)	74
Figura 45. Producto de aceite de cáñamo con denominación de espectro completo. (Fuente: Amazon)	74

Índice de Tablas

Tabla 1. Relación cultivos industriales en España en el año 2019	6
Tabla 2. Comparación valores nutricionales de semillas de cáñamo y de semillas de chía.....	11
Tabla 3. Precios de Cereales en la campaña 2020/21.....	15
Tabla 4. Ejemplo de rotación de cultivos tradicional	15
Tabla 5. Superficie y producción de trigo y cebada en la C. Valenciana	17
Tabla 6. Propuesta de rotación de cultivos incorporando el cáñamo.	18
Tabla 7. Distribución de superficie de producción anual.....	18
Tabla 8. Características de la simiente de Futura 75	19
Tabla 9. Aporte de fertilizantes necesario para el cáñamo.....	23
Tabla 10. Factores y niveles de operación	34
Tabla 11. Rendimiento de cafeína en la extracción con CO2 supercrítico.....	35
Tabla 12. Resultados extracción Soxhlet.....	36
Tabla 13. Comparativa de costes entre los dos métodos.	37
Tabla 14. Características de la materia vegetal utilizada en el experimento de Clavier.....	38
Tabla 15. Condiciones de extracción para diferentes experimentos.....	38
Tabla 16. Resultados de la extracción continua.....	39
Tabla 17. Resultado de la extracción discontinua.....	39
Tabla 18. Condiciones de extracción.....	41
Tabla 19. Rendimientos en base a el suministrador de la semilla	42
Tabla 20. Reducción de peso post secado.	43
Tabla 21. Volúmenes de tratamiento de materia prima.....	43
Tabla 22. Componentes del biogás dependiendo del origen.....	49
Tabla 23. Composición de fangos con relación al decantador del que proviene	50
Tabla 24. Rendimiento en litros por hectárea de otro tipo de cultivos energéticos	54
Tabla 25. Dimensiones del extractor.....	57
Tabla 26. Resultados HPLC sobre el procedimiento de descarboxilación.....	60
Tabla 27. Especificaciones de la bomba elegida.	62
Tabla 28. Condiciones del intercambiador.....	63
Tabla 29. Propiedades físicas de las corrientes.....	64

Tabla de abreviaturas y acrónimos	
gr	Gramos
kg	Kilogramos
OMS	Organización Mundial de la salud
mg	Miligramos
CBD	Cannabidiol
THC	Tetrahidrocannabinol
CO ₂	Dióxido de carbono
cal	Calorías
L	Litros
°C	Grados Celsius
ODS	Objetivos de desarrollo sostenible
m	metros
ha	Hectáreas
Tn	Tonelada
m ³	Metro cúbico
MJ	Megajulios
ONU	Organización de las Naciones Unidas
EU	Europa
ORP	Oleo Resina de pimentón
EDAR	Estación depuradora de aguas residuales
CH ₄	Metano
SCO ₂	Dióxido de carbono en condiciones supercríticas
LCO ₂	Dióxido de carbono líquido

DOCUMENTO I: MEMORIA DESCRIPTIVA

1. OBJETO

El objetivo principal de este trabajo es, diseñar un proceso eficiente e innovador para la obtención de un producto comercial en auge como es el aceite de Cannabidiol. Como alternativa a la extracción con disolventes procedentes de hidrocarburos, se ha optado por una extracción supercrítica con dióxido de carbono, que es un gas inocuo, reciclable y económicamente más sostenible que los actuales disolventes utilizados en este proceso, el CO₂ se encuentra en abundancia como subproducto de otras operaciones químicas.

Además, se busca promocionar la planta del cáñamo como un cultivo sostenible y regenerador del suelo, el cual puede adaptarse perfectamente a las rotaciones actuales de cultivos para reducir el impacto negativo que tiene el monocultivo en el medio ambiente, siendo el cáñamo un cultivo menos dependiente de agua y pesticidas que los cultivos que se incorporan a las rotaciones actualmente.

También ha sido un objetivo para cumplir en este trabajo de fin de grado, crear una economía circular alrededor de este proceso, recirculando el disolvente usado. Se ha intentado reducir al máximo la cantidad de residuos generados, de este objetivo nace la idea de tratar los dos residuos principales para la obtención de energías limpias como puede ser el biogás y el biodiésel.

Por otra parte, se pretende calcular el rendimiento de extracción para hacer un estudio de la rentabilidad del aceite de CBD obtenido

Como objetivo secundario, en este trabajo se pretende dar otro enfoque a la planta de cáñamo, desestigmatizándola y dando a conocer sus usos medicinales y terapéuticos beneficiosos para la salud humana.

2. JUSTIFICACIÓN

2.1. Justificación técnica

Actualmente, la sociedad está cada vez más concienciada con el medio ambiente, cada vez se adoptan nuevos protocolos para ayudar al planeta, tales como prescindir de las bolsas de plástico, evitar la utilización de envases en la medida de lo posible o comprar productos de proximidad son algunas de las soluciones planteadas.

Los alimentos considerados de kilómetro cero, son aquellos que se cultivan, recolectan, comercializan y cuando llegan al consumidor final, han recorrido menos de cien kilómetros. Esto tiene unas ventajas evidentes:

- Se reduce la huella ecológica, ya que se minimiza el fuerte impacto ecológico que conlleva el transporte.
- Se produce un intercambio justo entre productor y consumidor, se prescinde de los intermediarios y se paga y cobra un precio más equilibrado, por lo que las dos partes ganan.
- Se favorece la economía local apoyando a pequeños productores.

El campo, es un sector cada vez más castigado por la precariedad, se ven campos de naranjas donde los frutos acaban tirados por tierra, pudriéndose en el suelo ya que no sale a cuenta pagar por recogerlos. El precio del kilogramo de uva este año, se veía reflejado en pesetas ya que es tan bajo que no llega al céntimo de euro. Ante esta problemática flagrante, se deben buscar alternativas para sacar rentabilidad a este sector primario el cual se ve mermado año tras año.

Esta es una de las razones por las que nace esta iniciativa de producción de cáñamo, cuyos subproductos tienen un alto valor añadido y pueden aumentar la rentabilidad de las explotaciones agrícolas. Por ello se ha querido abarcar en este trabajo de fin de grado todo el proceso de cultivo.

La filosofía empresarial está cada vez más latente en el comercio, se es más selectivo con las empresas, no solo es importante que te ofrezcan un buen producto, también se valora la filosofía y el buen hacer de la empresa, de esta forma los usuarios castigan con no consumir productos de ciertas empresas o corporaciones en las cuales se realizan malas praxis, tanto medioambientales como sociales. Por ello, se ha buscado en todo momento diseñar un proceso energéticamente eficiente y con la mínima generación de residuos.

Este trabajo plantea una salida medioambientalmente sostenible y viable económicamente, que ayuda a pequeños y medianos productores. También se produce un reclamo ante el consumidor final, enfocado a un público concienciado con los problemas medioambientales actuales y que aboga por los productos naturales y ecológicos.

Además, se ha tenido en cuenta cumplir los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) adoptados por los estados miembros de la Organización de las Naciones Unidas en 2015 que son un llamado universal para poner fin a la pobreza, proteger al planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad para 2030. Algunos de los objetivos que se cumplen en este trabajo son:

Objetivo 3: Salud y Bienestar, el producto obtenido tiene potencial para mejorar significativamente la salud y el bienestar, ya que tiene usos farmacológicos beneficiosos demostrados.

Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante, se presenta un estudio de valorización energética de residuos para producir biodiésel y biogás, estos productos se consideran energías limpias.

Objetivo 8: Trabajo decente y crecimiento económico, el cáñamo, aunque es un cultivo marginal, tiene un precio de venta superior a la mayoría de los cultivos mayoritarios, lo que hace que los cultivadores vean incrementados sus ingresos y se disminuya la precariedad latente en el sector primario.

Objetivo 9: Industria, innovación e infraestructuras, con el proceso de extracción supercrítica con dióxido de carbono, se aboga por una industrialización inclusiva y sostenible.

Objetivo 12: Producción y consumo responsables, al rescatar un cultivo abandonado como el cáñamo, se diversifica la producción, además, con el sistema de cultivo que se pretende implantar para acabar con el monocultivo, se consigue una menor degradación medioambiental. También se reduce la oferta de los productos vegetales por los que se sustituye el cáñamo.

Objetivo 13: Acción por el clima, el dióxido de carbono es el principal gas de efecto invernadero el cual se encuentra en abundancia y favorece el calentamiento global, introducirlo en un proceso químico como disolvente puede dar salida a las grandes a los grandes excedentes de este gas que se producen en otros procesos químicos.

Objetivo 17: Alianzas para lograr los objetivos, este trabajo se puede plantear en un sistema cooperativista en el cual los agricultores forman parte activa de la empresa reduciendo la competencia y creando una asociación inclusiva para el cultivo y posterior procesamiento de cáñamo.

El cáñamo industrial, por su relación estrecha con la marihuana recreativa, es considerado un producto tabú para la gran mayoría de la gente, esto es generado por una falta de información sobre las características de esta planta, por esta razón se ha querido introducir el proceso de cultivo, para dar a conocer la planta del cáñamo como un producto natural compatible con otros cultivos.

La disposición del trabajo se ha estructurado de la siguiente manera:

- Dar a conocer la materia prima, se han tratado aspectos como la historia de esta planta, su situación taxonómica y que son y cuáles son los cannabinoides que se encuentran en ella y también se ha incluido un comentario sobre sus usos y los beneficios que pueden obtenerse introduciéndola en una rotación de cultivos tradicional.
- Diseño de un plan de cultivo adaptado a las características del cáñamo, también se ha buscado instrumental específico ya que el sector del cáñamo está en auge y cada vez se van conociendo nuevas tecnologías para facilitar su producción.
- En el apartado de extracción del aceite, se comentan los métodos tradicionales de extracción y se profundiza en el método con fluidos supercríticos, así como el planteamiento de una estrategia de tratamiento de los residuos generados ya que son abundantes, la estrategia seguida está relacionada con los ODS, para producir energía asequible y no contaminante, se realiza un estudio de producción de biogás por medio de una codigestión de la biomasa del cáñamo y lodos de depuradora, además se introduce el método de la transesterificación, por medio del cual con las semillas de cáñamo se puede obtener fácilmente biodiesel.
- En el apartado de diseño se realiza un estudio al detalle de los elementos de la instalación, además de introducir un apartado de seguridad, imprescindible en este tipo de instalaciones donde se trabaja a presiones elevadas y los riesgos son evidentes.
- Por último, en el apartado de normativa y legislación, se justifica el uso legal de esta planta, así como el procedimiento de análisis de cannabinoides que debe seguirse para el correcto cultivo de esta. También se dan las directrices para la adjudicación de subvenciones al cultivo.

2.2. Justificación académica

La finalidad académica de este trabajo es demostrar que se han adquirido los conocimientos y competencias suficientes durante el grado como para poder obtener el título de Grado de Ingeniería química, aplicando los conocimientos adquiridos en las diferentes asignaturas impartidas. Por otro lado, este trabajo de fin de grado debe servir para demostrar que se ha adquirido un nivel adecuado en las competencias transversales que se han añadido en los últimos años en la UPV. Algunas de estas competencias son Conocimiento de problemas contemporáneos, aplicación y pensamiento crítico, análisis y resolución de problemas, diseño y proyecto, entre muchas otras.

3. LA MATERIA PRIMA

3.1. Historia del Cáñamo

El cáñamo industrial se conoce como uno de los cultivos agrícolas más antiguos del mundo, existía como planta salvaje en alguna zona de Asia central 8.000 años a.C.

En España la historia del cultivo de cáñamo se remonta aproximadamente al siglo V a.C, herencia árabe importada desde china. El excelente clima mediterráneo sumado a la infinidad de utilidades de la planta hizo que en el año 1150 se establecieran los primeros molinos de hilado y enriado en Játiva y Alicante, produciendo fibra que se utilizaba como materia prima para fabricar otros subproductos. (*Historia Cáñamo*, n.d.)

La industria naval española debe parte de sus logros al cáñamo, desde la expedición de Colón a las américas hasta la construcción de la armada invencible, no habría sido posible sin las fibras de cáñamo, las cuales tienen una gran resistencia al agua salada por lo que jarcias, velas y cuerdas se fabricaban con esta planta.

Más concretamente, al sur de la actual Comunidad Valenciana se encuentra el municipio de Callosa de Segura, ciudad cuya historia y economía se vinculan al cáñamo desde la edad media, contando así con títulos como “Ciudad del cáñamo”.

En el siglo XVIII se mantuvo una protección al cáñamo, sobre todo en el sur de la península, lo que hizo que se consolidase la producción nacional. Durante la Guerra Civil Española (1936-1939) fue el punto álgido de la producción de cáñamo en España.

En 1937, tras años llevando a cabo una campaña de desprestigio, debido a su relación estrecha con el cannabis recreativo, motivada por el lobby maderero, Estados Unidos grava el cultivo de cáñamo, con impuestos desorbitados, haciendo que cultivar y manufacturar cáñamo no saliese rentable, de esta manera, se motivó un mercado negro alrededor de este producto.

En 1961, se celebra una Conferencia de las Naciones Unidas para la Aprobación de una Convención única sobre estupefacientes. Estados Unidos, aprovechándose de su posición de superpotencia, realiza un gran esfuerzo –incluido el uso de datos científicos poco fiables y una influencia considerable en la recién establecida Organización Mundial de la Salud (OMS)– el cual, contribuye notablemente a que el Cannabis sea condenado como una droga con propiedades particularmente peligrosas, al nivel de la cocaína o la heroína, imponiendo así una política prohibicionista a la familia Cannabis Sativa. (ONU, n.d., 5)

Se puntualiza que el tratado “no se aplicará al cultivo de la planta del cannabis destinado exclusivamente a fines industriales (fibra y semillas) u hortícolas”. La industria legítima del cáñamo ha sufrido mucho debido a los controles impuestos sobre el cannabis ya que planteó problemas operativos para su aplicación. Ambos tipos de planta presentan el mismo aspecto y, de hecho, en algunos países existe un mercado gris para el cáñamo con bajo contenido en THC con fines recreativos.

En los años 70, la Unión Europea trata de reactivar el cultivo, ofreciendo ayudas a los agricultores a través de reglamentos, en los cuales se realiza una primera distinción entre cáñamo industrial y marihuana. Estos reglamentos son modificados hasta fijar un límite máximo de Tetrahidrocannabinol de 0.3% y en 1987 se establece una lista de variedades autorizadas, en el

que constan unas 50 variedades con bajos contenidos de THC. En el año 2000, se restringe el contenido de THC a 0.2% manteniéndose en la actualidad.

En España, se produce un repunte de la producción de cáñamo en 1.991 que dura siete años, después de 1998, decrece con rapidez, motivado posiblemente por la restricción de la UE, hasta el año 2006 y desde entonces se mantiene como cultivo marginal.

3.2. Producción Cáñamo

Como se ha introducido en el apartado de historia, la producción de cáñamo en España se remonta varios siglos atrás, aproximadamente desde el siglo V a.C.

Actualmente, se está incentivando la producción gracias principalmente a los usos medicinales de la planta y al auge de los productos con CBD, los cuales son cada vez más frecuentes en el mercado.

Aun así, el volumen de hectáreas cultivadas sigue siendo mínimo respecto a otros cultivos tradicionales asentados en la industria. En la tabla 1 podemos ver una relación de cultivos industriales en España en el año 2019 según el ministerio de agricultura pesca y alimentación.

Tabla 1. Relación cultivos industriales en España en el año 2019

	Superficie (hectáreas)	Producción (t)
CULTIVOS INDUSTRIALES	887.835	1.197.563
Semillas oleaginosas	793.603	1.030.709
-Colza y nabo	70.255	143.982
Colza	70.255	143.982
Nabo	0	0
Girasol	701.768	773.787
Lino oleaginoso	23	7
Soja	1.571	5.053
Algodón semilla	0	86.946
-Otras semillas oleaginosas	19.986	20.935
Plantas textiles	66.315	70.293
Lino textil	1	1
Cáñamo	167	287
Algodón fibra	66.147	70.005
Otros cultivos fibra	0	0
Tabaco	8.670	27.766
Lúpulo	591	967
Otros cultivos industriales	826	5.562
-Plantas aromáticas, medicinales y condimentos		
C1580	17.830	62.266

Donde se comprueba que el cáñamo ocupa una superficie de apenas 167 hectáreas, con una producción de 287 toneladas, siendo actualmente un cultivo marginal en España. Con el plan de cultivo desarrollado, se pretende aumentar estas hectáreas y la producción anual

3.3. Taxonomía del Cáñamo

En 1753 el botánico suizo Carlos Linneo reconoció y clasificó la especie *Cannabis sativa* como un cultivo dentro de su trabajo *Systema Naturae*. El género *Cannabis* es junto al género *Hummulus* los dos únicos que forman la familia de las *cannabaceas*.

Actualmente se acepta que el género *Cannabis* está formado por la especie *Cannabis sativa* L. y se clasifica en tres subespecies: *C. Sativa* subsp. *sativa*, *C. Sativa* subsp. *rudelaris* y *C. Sativa* subsp. *índica* (Matthews, 1999).

C. Sativa subsp. *sativa*: Son las más grandes de las tres familias y probablemente las más populares, provienen de las Selvas de países ecuatoriales en los que las horas de luz solar es invariable a lo largo del año, estas plantas han sabido aprovecharse de esta climatología y continúan creciendo en la etapa de floración, tienen un periodo de floración más largo que las otras dos subespecies pero también un rendimiento mayor. Su aspecto es más diáfano y suelto y sus hojas son largas y delgadas. Tienen una alta concentración de THC y bajos niveles de CBD.

C. Sativa subsp. *rudelaris*: Es una subespecie no cultivada, es decir, crece espontáneamente en zonas de Rusia, Europa y Asia central y se adapta a las duras condiciones de estos lugares, es una planta muy baja (30-80 cm), produce muy pocas ramas y tiene hojas anchas de limbos gruesos. Tiene unos niveles casi nulos de THC y bajos de CBD, su interés está en su fuerte genética la cual se ha utilizado para realizar cruces con las otras dos subespecies y crear nuevas cepas más resistentes y con altos niveles de Cannabinoides.

C. Sativa subsp. *índica*: Se reconocen por ser cortas y robustas, es originaria de países subtropicales como Pakistán y Afganistán, una vez que han alcanzado su altura óptima ponen todos sus esfuerzos en producir flores debido a la fluctuación de las horas de luz a las que están expuestas a lo largo del año. Sus hojas tienen forma de abanico con una base ancha para captar una mayor cantidad de radiación solar. Florecen mucho antes que las otras subespecies. Son conocidas por tener un mayor contenido de CBD que las sativas. (Zambeza Seeds, 2016).

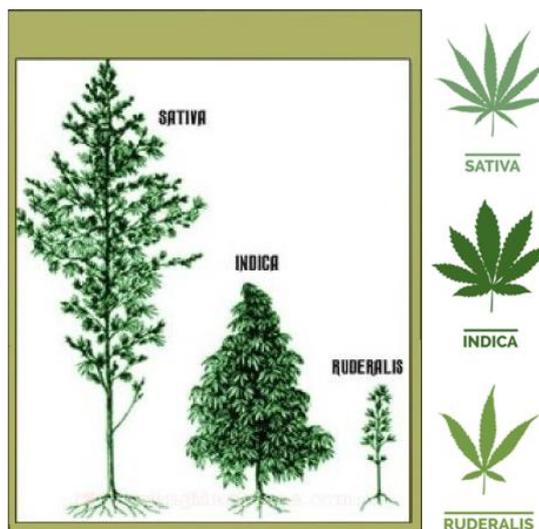


Figura 1. Especies de la familia Cannabis Sativa L. (Fuente: Dinafem)

3.4. Química del cáñamo

El género Cannabis es el único capaz de producir cannabinoides. Se conocen alrededor de 66 tipos diferentes de cannabinoides producidos por la planta entre los que encontramos el delta-9-tetrahidrocannabinol (THC), el cannabidiol (CBD) o el cannabinol (CBN) entre otros. Los cannabinoides actúan a través de receptores, que se encuentran en todo el cuerpo humano, aunque predominantemente en las terminaciones nerviosas de responsables de la euforia y de la acción antiinflamatoria.

3.4.1. Delta-9-tetrahidrocannabinol (THC)

Es el principal Cannabinoide de la planta, es responsable de los efectos psicotrópicos, fue aislada por primera vez por el Doctor Raphael Mechoulam y su equipo, se produce como defensa natural de la planta frente a animales herbívoros y se encuentra en mayor proporción en las flores o cogollos de las plantas hembra.

Físicamente, es una resina oleosa, a bajas temperaturas su apariencia es sólida mientras que si el clima es más caluroso tiene una consistencia pegajosa y viscosa.

La cantidad de THC en la planta está relacionada con la variedad y las condiciones de cultivo y recolección.

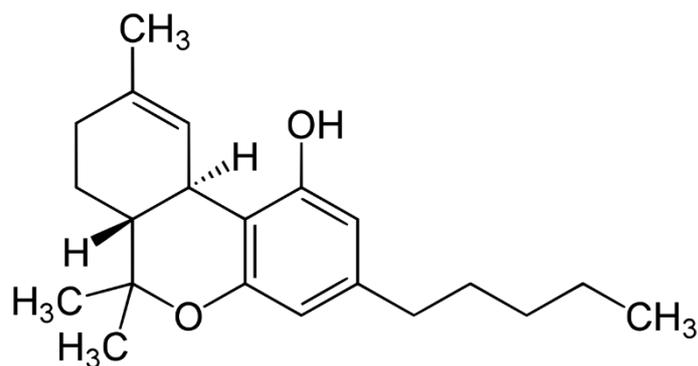


Figura 2. Estructura de la molécula de THC (Fuente: sensiseeds)

El THC interactúa con el organismo conectando con los receptores del sistema endocannabinoide conocidos como CB1 Y CB2.

Hoy en día debido a las prohibiciones sobre este Cannabinoide los estudios son muy limitados, según diversos estudios independientes, tiene propiedades analgésicas, antiepilépticas, antiinflamatorias y antieméticas (control del vómito).

3.4.2. Cannabidiol (CBD)

El cannabidiol también conocido como CBD es el segundo cannabinoide en abundancia por detrás del THC, Es muy parecido al THC molecularmente (en vez de una cadena lateral con un grupo pentilo, el THC-V presenta un propilo), cosa que le da capacidad de ejercer otra función distinta. A diferencia del THC, no tiene efectos psicotrópicos, pero si psicoactivos, es decir, tiene una interacción con el sistema endocannabinoide pero no altera el estado mental, por el contrario, puede disminuir o neutralizar los efectos psicotrópicos del THC, funciona como antagonista en los receptores CB1 y CB2. Fue aislado originalmente en 1940 y su estructura y estereoquímica fueron determinadas en 1960 por Adams et al y Mechoulam et al.

A diferencia del THC que se extrae de la marihuana, el CBD se extrae del cáñamo, es decir, de plantas de la familia cannabácea con bajos porcentajes de THC, esto sumado a que no provoca intoxicación, ha propiciado la reciente incorporación del CBD según la unión europea (Reglamento UE 2015/2283) a la categorización de nuevo alimento, y se encuentra pendiente de poder ser incorporado al mercado.

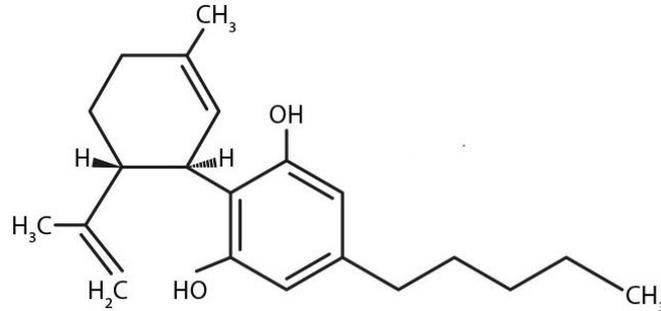


Figura 3. Estructura de la molécula de CBD (Fuente: Sensiseeds)

En la naturaleza la consistencia del CBD y del THC son casi indistinguibles, el CBD tiene una mayor concentración de Terpenos por lo que desprende un olor más característico, por ello se buscan extracciones de amplio espectro en las que se aprovechen todos los componentes de esta planta con un bajo contenido en THC.

3.4.3. Terpenos

Mientras que el THC y el CBD son los principales cannabinoides que encontramos en la planta, existe un tipo de aceites esenciales llamados terpenos, estos aceites como sucede con las especias y las hierbas aromáticas, dotan a la planta de un olor característico. Existen alrededor de 100 terpenos en el cáñamo proporcionando aromas desde lo afrutado al terroso acre, no son psicoactivos y se ubican en los tricomas de la planta. Algunos de los más habituales son:

- Mirceno: Posee un aroma terroso, almizclado y también se encuentra en otras plantas como el lúpulo, el cardamomo y otras, es el terpeno más abundante. Es conocido por sus propiedades antiinflamatorias, antioxidantes y para combatir el insomnio.
- Limoneno: Tiene un sabor cítrico y aroma fresco y ácido. Se encuentra en el limón, la lima, uvas y menta. Puede ayudar a mejorar la concentración, el estado de ánimo y aliviar el estrés.
- Pinenos: Tiene un aroma terroso, también se encuentra en el romero, las agujas de pino y otros. Aporta propiedades gastro protectoras y antisépticas.

3.4.4. El efecto séquito (Entourage effect)

El efecto séquito propone la teoría que varios componentes del cáñamo trabajan juntos para crear efectos únicos, por ello las diferentes variedades de cáñamo aportan efectos diferentes según el tipo de terpenos y la concentración tanto de CBD como de otros cannabinoides.

El Doctor Ethan B Russo, neurólogo y farmacólogo, detalla este efecto en "Taming THC: potential cannabis synergy and phytocannabinoid-terpenoid entourage effects". Donde muestra

resultados más prometedores en los experimentos realizados con la totalidad de cannabinoides y terpenos que posee la planta a los experimentos realizados con cannabinoides aislados,

3.5. Beneficios Hortícolas del cáñamo

El cultivo del cáñamo mejora las propiedades fisicoquímicas de terrenos de cultivo empobrecidos por un mal laboreo o por el agotamiento de nutrientes debido a la sobreexplotación como ocurre en terrenos extensivos de monocultivo.

Este cultivo, mejora sustancialmente la estructura del suelo, existiendo pruebas realizadas en las cercanías de Chernobyl en 1998, en las cuales el investigador Vyacheslav Dushenkov descubrió que el cáñamo tiene propiedades como fitorremediador de metales pesados. (V.Dushenkov, 1999)

Debido a la tupida red de raíces secundarias que forma, esta planta fija el suelo, también aporta oxígeno y nutrientes. Se cultiva en una elevada densidad para la obtención de flores, del orden de 10-20 plantas/m² y debido a los 1.5-3m de altura que alcanzan crean una gran masa vegetal que impide que la luz llegue al suelo, por lo que evita la aparición de maleza.

El ciclo vegetativo recomendado del cáñamo depende de la variedad y oscila entre 110 y 180 días lo cual es un ciclo relativamente corto.

Además, la dotación de agua se hace notable desde la aparición del quinto par de hojas hasta el comienzo de la floración, ya que después es capaz de aguantar períodos moderados de sequía.

Por su rápido crecimiento con bajo consumo de agua, la revitalización del suelo y su cosecha anual se puede afirmar que se trata de un cultivo sostenible y ecológico por la baja necesidad de fertilizantes e insecticidas de la que requiere. En estos momentos donde el planteamiento de la sostenibilidad es un factor imprescindible a tener en cuenta en nuestra sociedad, el cáñamo es un oasis en un desierto de asfalto.

Todos estos beneficios hacen que el cáñamo sea un excepcional candidato para incorporar a las tradicionales rotaciones de monocultivos tales como trigo o cebada. (Roshental, 2009).

3.6. Usos del cáñamo

Como se ha comentado anteriormente, el cáñamo es una planta de la que se aprovecha prácticamente todo.

La fibra se encuentra en el interior del tallo y puede llegar a medir desde 80cm a 4m de largo, es color blanco crema, marrón, gris, negro o verde. Los textiles realizados con fibras de cáñamo se fusionan fácilmente con los tintes y no sufren problemas por decoloración, por lo que la prenda conserva la forma y el color incluso después de múltiples lavados.

El cáñamo se puede mezclar con algodón o seda, además tiene propiedades antibacterianas y microbianas lo que puede ayudar a prevenir la dermatitis en prendas como pañales de bebés.

El investigador James Meredith de la universidad de Warwick publicó un artículo demostrando la viabilidad de las fibras de cáñamo en sustitución de las sintéticas fibras de vidrio utilizado en el revestimiento de piezas automovilísticas. El cáñamo, demostró una excelente absorción de energía específica frente a impactos, lo que significa que puede suponer un elemento fiable y ecológico para incorporar en la industria del automóvil. En la figura 4 se muestra una puerta de automóvil fabricada con fibras de cáñamo.



Figura 4. Puerta de automóvil construida con fibras de cáñamo (Fuente: Bioguía)

Empresas como BMW, Mercedes o Alfa Romeo ya incorporan en sus nuevos modelos materiales compuestos de cáñamo, en el caso de BMW los podemos encontrar en modelos como el i3.

Las semillas de cáñamo son un cereal altamente energético, utilizado comúnmente para alimentación de ganado. Actualmente, pese que no está muy extendida su incorporación a la alimentación humana tiene calificación de superalimento, como las semillas de chía.

Tabla 2. Comparación valores nutricionales de semillas de cáñamo y de semillas de chía

	Cáñamo	Chía
Calorías	580kcal	490kcal
Grasas	45gr	30,75gr
Proteínas	25gr	15,62gr
Hidratos de Carbono	6,7gr	43,85gr
Fibra	35gr	37,7gr
Calcio	170mg	631mg
Hierro	18mg	6,5mg
Fósforo	820mg	600mg

En la tabla 2, se muestra la comparación de los valores nutricionales por 100gr donde vemos un gran aporte de proteína, así como de hierro y fósforo. También ofrecen un alto aporte de ácidos grasos esenciales como Omega 3 y 6, es rica en antioxidantes y ayuda a fortalecer el sistema inmune. También contienen gran cantidad de aminoácidos beneficiosos para la salud.

De los cañamones (semilla del cáñamo), mostrado en la figura 5, también se puede extraer aceite libre de cannabinoides ya que tiene alrededor de un 30% de contenido oleoso, que se utiliza bien para consumo humano o bien para la elaboración de cáñamodiesel, combustible de gran calidad. Históricamente el aceite de semillas de cáñamo ha sido utilizado como combustible para iluminación antes de la llegada de la electricidad.



Figura 5. Cañamones o semillas de cáñamo (Fuente: Fontdevida)

El aceite de cáñamo como muchos otros aceites vegetales, se utiliza en cosmética natural ya que ayuda a la hidratación de la dermis por su alto contenido en ácidos grasos, también es regulador de la producción sebácea, antioxidante y rico en vitamina E.

En Europa y EE. UU. los productos cosméticos derivados del cáñamo han visto un auge en el consumo y por consiguiente en la producción de estos. En España vamos a la cola en el consumo de este tipo de productos.

A nivel mundial las cifras son de crecimiento, en un reciente informe de Grand View Research, Inc se prevé que el mercado de cosmética del cáñamo llegue a los 1.700 millones de dólares en 2025. El público al que va dirigido este mercado es unisex, urbanita y joven. En la figura 6 se puede observar el crecimiento de los productos como aceites, cremas, mascarillas y limpiadores faciales.

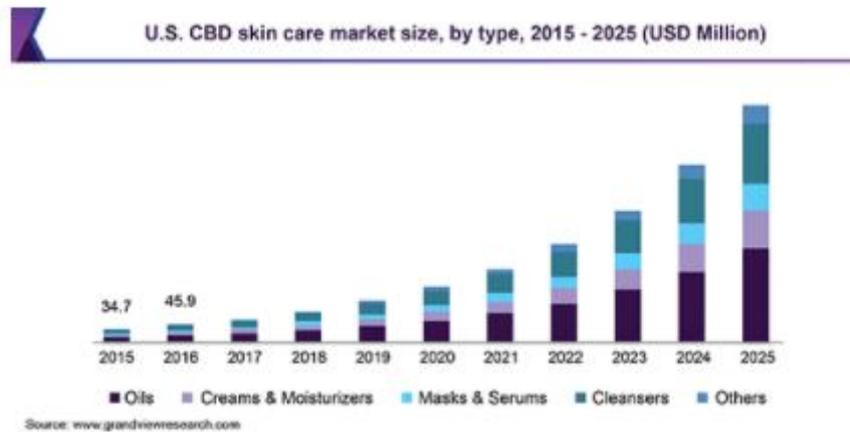


Figura 6. Previsión de crecimiento subproductos del cáñamo hasta 2025 (Fuente: Grandviewresearch)

Debido a las dimensiones de la planta se genera una gran cantidad de biomasa, la cual puede ser fácilmente transformada en combustibles a un menor coste que la gasolina, sobre todo si se tiene en cuenta el coste medioambiental. Su descomposición bacteriana da lugar a un biogás rico en metano. (Robinson, 1999)

De las flores se extraen los Cannabinoides, este TFG se centra en la extracción del Cannabidiol, el cual actualmente tiene un amplio uso en la industria cosmética y farmacéutica, este uso se debe a sus propiedades las cuales se detallan a continuación.

- Alivia la ansiedad: Tiene un efecto antidepresivo y ansiolítico apropiado para desordenes neurológicos según el estudio “Antidepressant-Like and Anxiolytic-Like effects of cannabidiol: A chemical compound of cannabis sativa” (Alexandre R. et al, 2014)
- Es Neuroprotector: Se está probando su eficacia en trastornos degenerativos, con importantes aplicaciones clínicas según el British Journal of Clinical Pharmacology (2013)
- Analgésico: Se ha demostrado como suministrado en dosis controladas a pacientes con dolores crónicos, estos experimentaban una disminución del dolor según Handbook of experimental pharmacology (2007)
- Reduce el riesgo de bloqueo de arterias del corazón: el sistema endocannabinoide tiene gran importancia en la aterosclerosis según Journal of Neuroendocrinology (2008)
- Es antiinflamatorio: Reduce la inflamación en cantidad de casos clínicos relatados por el Dr. Summer Burstein de la universidad de Massachusetts, tales como los de la encefalomiелitis autoinmune, de la lesión pulmonar aguda (ALI) y muchas otras patologías.
- Estimula el crecimiento óseo: Los receptores cannabinoides colaboran en la regulación de la masa ósea según el British Journal of pharmacology (2008)

Como se ve, los usos del cáñamo son muy amplios y aplicables a diferentes industrias modernas, las cuales van a demandar en un futuro próximo unas mayores producciones de este compuesto, por lo que es una buena idea aplanar el terreno e investigar aún más sobre esta sustancia.

4. PLAN DE CULTIVO

4.1. Proyecto de implantación

El monocultivo, es una práctica de cultivo consistente en dedicar grandes extensiones de tierra cultivable a una especie vegetal, esto conlleva una serie de desventajas como una rápida propagación de plagas, erosión del suelo, deterioro del paisaje y un agotamiento del suelo de forma desequilibrada. (Redacción, n.d.)

La cebada es el mayor cultivo extensivo en España ocupando una superficie cercana a los 3 millones de hectáreas, se cultiva en prácticamente todas las comunidades autónomas, pero principalmente se concentra en Castilla y León seguida por Castilla la Mancha.(Nuteco, 2019)

El trigo es el segundo cultivo con más representación a nivel nacional por detrás de la cebada. La superficie cultivada de trigo en España se ha mantenido estable estos últimos tres años en 1.6 millones de hectáreas. (Asegrain, 2020).

La distribución general de la tierra en España en el año 2019 para el cultivo de cereales según el Ministerio de agricultura, Pesca y alimentación en la encuesta sobre superficies y rendimientos de Cultivos (ESYRCE), fue la que se muestra en la figura 7 con las superficies en hectáreas.

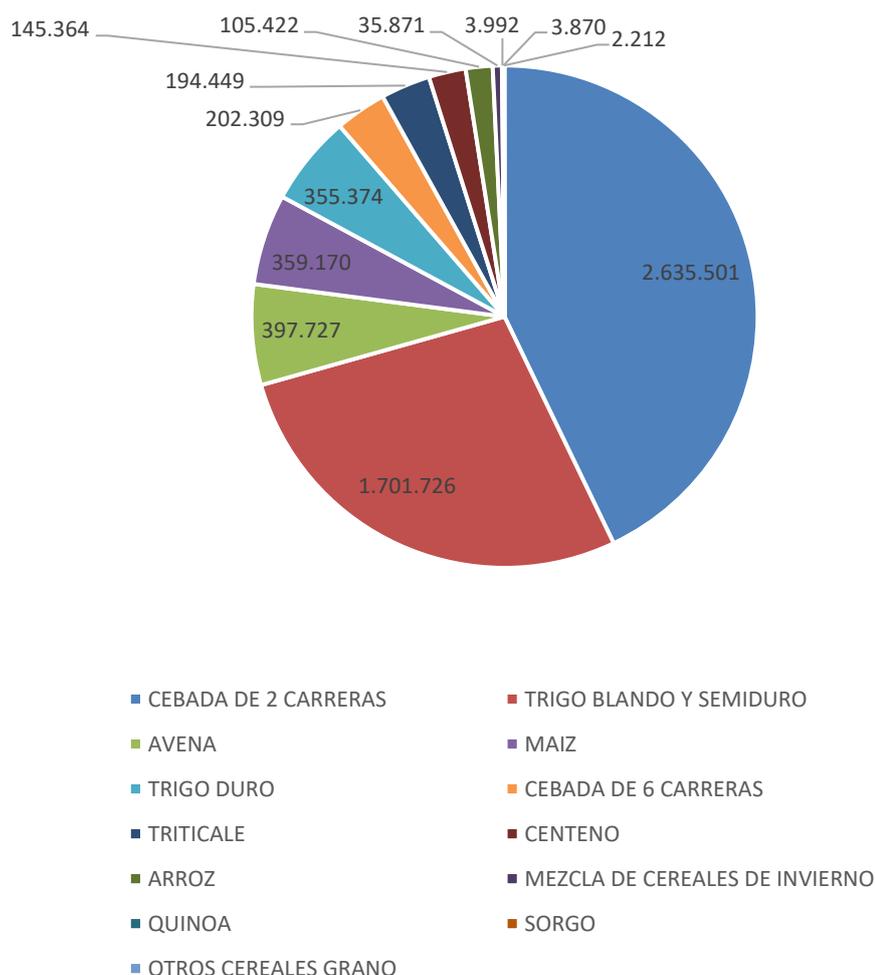


Figura 7. Superficies y Rendimientos de cultivo en España en 2019 en hectáreas.

Como se ha comentado anteriormente, los cultivos mayoritarios son el trigo y la cebada, los cuales se consideran monocultivos, con los inconvenientes que este tipo de cultivos plantea. Actualmente en la campaña 2020/21 los precios del cereal según los mercados en un estudio del Ministerio se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Precios de Cereales en la campaña 2020/21

	Unión Europea				España			
	Trigo blando	Trigo duro	Cebada	Maíz	Trigo blando	Trigo duro	Cebada	Maíz
Media(€/t)	181,98	283,55	159,71	185,28	197,1	265,88	162,63	185,1
Máximo(€/t)	202,5	301,61	177,77	207	217,6	272,5	179,47	205,93
Mínimo(€/t)	171,67	272,23	146,43	172,67	186,33	257,5	150,93	175,2

El rendimiento medio por hectárea de cereales en España en el año 2020 fue de 3000kg/ha según datos del banco mundial por lo que el beneficio económico es bastante reducido en este tipo de cultivos.

La rotación de cultivos es una práctica en la que se combinan diferentes especies que se complementan y aprovechan mejor los nutrientes del suelo.

La rotación es fundamental en la producción de monocultivos como el trigo o la cebada ya que diferentes secuencias de cultivo inciden de forma directa en los rendimientos de cultivo. La rotación de cultivos trienal es una de las prácticas recomendadas por el Fondo Español de Garantía Agraria para evitar el monocultivo de cereales, estableciendo rotaciones trienales donde al menos uno de los cultivos no sea cereal. (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.)

Algunos de los beneficios de la rotación de cultivo son:

- Diversificación de la producción.
- Mantenimiento y mejora de los contenidos de materia orgánica del suelo.
- Mejora de la fertilidad del suelo y su contenido en nutrientes disponibles.
- Reducción de la erosión hídrica y eólica.
- Reducción de la incidencia de malas hierbas, insectos y enfermedades en los cultivos.
- Mejor distribución de nutrientes en el perfil del suelo (los cultivos de raíces más profundas extraen nutrientes a mayor profundidad).
- Aumentos de la sustentabilidad agrícola. (Pérez, 2015)

Un ejemplo de rotación frecuente es el que se muestra en la tabla 4:

Tabla 4. Ejemplo de rotación de cultivos tradicional

	Año 1	Año 2	Año 3
Rotación 1	Barbecho	Trigo/Cebada	Guisante/Avena/Veza/Girasol
Rotación 2	-	Trigo/Cebada	Guisante/Girasol

La rotación se lleva a cabo acorde a las características locales, con el objetivo de que repercuta favorablemente en el medio ambiente y en la rentabilidad de la explotación:

- Se deben valorar las exigencias de cada cultivo para realizar la elección de la rotación adecuada, con el fin de que no se produzcan descensos en los rendimientos ni se reduzcan excesivamente las reservas de nutrientes del suelo.
- Definir una rotación de cultivos basada en razones agronómicas que minimice el lavado de los nitratos para cada una de las zonas que se declaren zonas vulnerables

En este TFG se propone incorporar el Cáñamo a la rotación de cultivo tradicional en sustitución de las rotaciones tradicionales, cuyos beneficios se ven reducidos frente a las posibilidades que ofrece el cáñamo. En los apartados siguientes se demostrará la viabilidad de esta opción mostrando el aceite de cáñamo como un producto de alto valor añadido y con gran interés para la industria cosmética y farmacéutica.

4.2. Dimensionamiento de la superficie

En la figura 8, vemos una relación de las hectáreas cultivadas de cereales en España y la producción hasta el año 2018, según el ministerio de agricultura, pesca y alimentación el 43% corresponden a la cebada, ocupando una superficie de 2.56 millones de hectáreas.

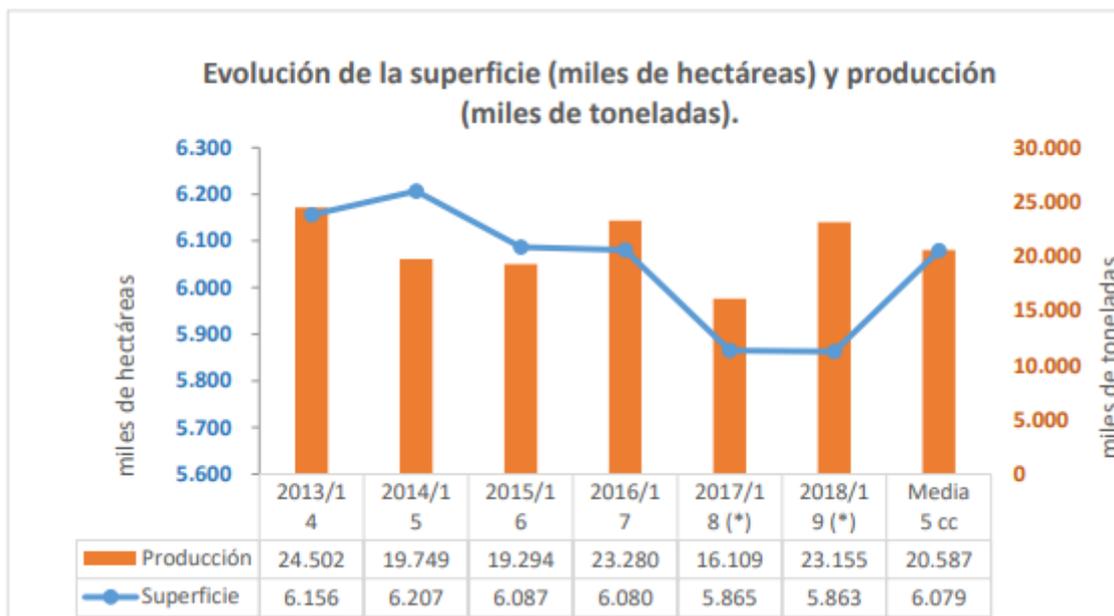


Figura 8. Evolución de superficies y producción hasta el año 2018 (Fuente: Ministerio de agricultura pesca y alimentación).

Para dimensionar el proceso, en primer lugar, tenemos que estimar un volumen de materia prima, para ello siguiendo nuestro plan de cultivo ecológico detallado en apartados anteriores nos centraremos en la Comunidad Valenciana. En la tabla 5 vemos la producción de trigo y cebada en la Comunidad Valenciana y la superficie ocupada en el año 2019.

Tabla 5. Superficie y producción de trigo y cebada en la C. Valenciana

Demarcación	Trigo		Cebada	
	Superficie (ha)	Producción (Tn)	Superficie (ha)	Producción (Tn)
Comunidad Valenciana	4.978	9.070	15.620	21.869
Alicante	2.924	5.656	3.837	7.049
Castellón	593	1.782	3.566	7.012
Valencia	1.461	1.632	8.217	7.808

Diseño de un sistema de extracción de aceite de cáñamo para su uso en la industria farmacéutica y cosmética

La idea de desarrollo empresarial consiste en informar a productores valencianos sobre los beneficios de incorporar el cáñamo a la rotación de cultivos actualmente poco rentables como el de las leguminosas. Siendo modificada la rotación tradicional de la siguiente manera,

Tabla 6. Propuesta de rotación de cultivos incorporando el cáñamo.

	Año 1	Año 2	Año 3
Rotación 1	Barbecho	Trigo/Cebada	Cáñamo
Rotación 2	-	Trigo/Cebada	Cáñamo

Como observamos en la tabla 5 la superficie ocupada en la Comunidad Valenciana para el monocultivo de trigo y cebada asciende a 20.598 ha. Se ha estimado como prueba experimental que este método se aplica a 1.000 ha ya que los productores se ven atraídos por este nuevo sistema de rotación debido al alto valor añadido que tiene el aceite de CBD.

Hay que tener en cuenta que los campos no se encuentran en el mismo estado de la rotación y para obtener una producción fija se ha supuesto que la distribución de la superficie es uniforme en cuanto a la edad, según se muestra en la Tabla 7, la superficie de producción serán 333.333 ha/año.

Tabla 7. Distribución de superficie de producción anual.

	Superficie(ha/año)
Barbecho	333,333
Trigo/Cebada	333,333
Cáñamo	333,333

4.3. Elección de la semilla

Para realizar un estudio uniforme sobre la viabilidad de este método, se considera que en toda la superficie se cultivará la misma variedad de cáñamo dentro de las 50 aprobadas por la UE con un contenido de THC menor al 0.2%.

Por ello la semilla elegida será la **Futura 75**, ya que es una de las variedades más cultivadas en la península Ibérica dada su adaptabilidad a climas mediterráneos y gran resistencia al calor y humedad. Es una variedad de origen francés la cual ha sido desarrollada durante varias generaciones buscando los ejemplares más fuertes y productivos. También tiene una gran homogeneidad entre plantas en cuanto a niveles de THC y CBD. El cultivo es sencillo y requiere las mismas necesidades que puede requerir la cebada o el trigo. Las características que más resaltan en esta variedad son su gran desarrollo vertical, su producción de flores ricas en CBD y la cantidad de materia vegetal generada, en la figura 9 se puede ver el aspecto de la planta y su certificación. (Growbarato.net, n.d.)



Figura 9. Detalle de la planta futura 75 con su certificado de la UE (Fuente: Growbarato).

En la tabla 8 se introducen las características principales y rendimientos tanto de flores como de semillas, biomasa y cantidad de aceite.

Tabla 8. Características de la simiente de Futura 75

Tipo	Monoica
Ciclo vegetativo recomendado	140 días
Altura	2,50-3,50 m
Producción de Biomasa	10-12 Tn/Ha
Producción de Flores	600-1000 Kg/Ha
%CBD	2-3%
%THC	0,1-0,15%

4.4. Siembra

La siembra se realizará por medio de sembradoras a una distancia entre líneas de 10 cm, dejando caer la semilla a chorrillo por gravedad a una profundidad entre 2 y 4 cm. Las sembradoras a chorrillo se utilizan para sembrar el cereal por lo que no supondría un gasto extra al agricultor.

La densidad de la siembra recomendada según Ed Roshental, en *Marijuana Grower's Handbook* para el cáñamo destinado a obtener cannabinoides, se utiliza una densidad de 10 plantas/m². La cantidad de semillas recomendada para obtener 90 plantas/m² son 150 semillas viables/m² (López Bellido, 2002). Por lo que para una densidad de 10 plantas/m² se necesitan aproximadamente 17 semillas/m².

En la figura 10 se muestra una sembradora a chorrillo, esta consta de un depósito en el que se almacenan las semillas, las cuales se irán dosificando de la forma que se ha explicado anteriormente gracias a un sistema de aire a presión que las impulsa mientras el tractor avanza por el terreno de cultivo.



Figura 10. Sembradora kverneland (Fuente: Agroptima)

La fecha de siembra habitual del cáñamo es a partir del 19 de marzo, pero habrá que tener en cuenta una serie de condicionantes para escoger la fecha como:

- Temperatura del suelo tiene que ser mayor de 8-10°C.
- Temperatura ambiente mínima mayor de 10-12°C. (Gorchs Altarriba, 2006)

4.5. Riego

El cáñamo no es muy exigente en cuanto a las necesidades de agua, para desarrollarse sin problemas necesita entre 1.500-3.000 m³/ha mientras que el trigo y la cebada necesitan entre 4.000-4.500 m³/ha (López Bellido, 2002). En la Comunidad Valenciana las precipitaciones no son suficientes para cubrir estas necesidades, por lo que se debe aportar agua.

Para un correcto desarrollo se debe regar después de la siembra, luego no es necesario hasta que las plantas tengan entre 15-20 cm de altura, después, se debe aportar agua cada 15 días aproximadamente. (Gorchs Altarriba, 2006)

El método de suministro de agua depende de la infraestructura con la que cuenta el terreno sembrado. El uso de un método de riego u otro, depende de varios factores, en el manual de riego para agricultores de la junta de Andalucía se destacan algunos como la topografía y forma de la parcela o las características físicas del suelo.

Los métodos de riego más comunes y eficientes son:

- Riego por aspersión/microaspersión: Conlleva un ahorro de agua respecto a otras técnicas, recoge el agua de una fuente natural y la expulsa en forma de lluvia localizada., la diferencia entre aspersión y microaspersión es que en esta última la distancia que recorre el agua desde que sale del emisor es menor.
- Riego por multicompuertas: Se instalan tuberías en el terreno de cultivo y se interconectan con una fuente de agua, riega en un menor tiempo a otros sistemas y se conoce como sustituto de las acequias de conducción, típicas en la huerta valenciana.
- Riego por goteo: Se aplica en zonas áridas y secas, el agua llega de forma directa al receptor, de esta forma se impiden infiltraciones y otras pérdidas relacionadas con la climatología, es un sistema que se puede automatizar fácilmente.
- Riego por gravedad: El agua, se distribuye en el suelo por la acción de fuerzas gravitatorias, es canalizada por surcos arados en la tierra, tiene un fácil mantenimiento, pero se generan muchas pérdidas por infiltraciones y evaporaciones. El método es comúnmente utilizado en sembrados de trigo y cebada.

En la figura 11 se observa el riego del cultivo mediante sistema por gravedad, como se observa el agua avanza por los surcos o caballones en ocasiones formando acumulaciones las cuales suponen pérdidas por evaporación o infiltraciones.



Figura 11. Campo con sistema de riego por gravedad (Fuente: Agroptima)

4.6. Fertilización

La mayoría de las aportaciones, se realizan durante la preparación del lecho de la siembra. En cuanto al fósforo (P) y potasio (K) se limitan a suplir las extracciones que realiza la planta del suelo. El nitrógeno (N) favorece al desarrollo vegetativo de la planta, pero un exceso de este aumenta la competencia entre las plantas haciendo que sobrevivan las más fuertes y robustas y disminuyendo la cantidad de plantas por metro cuadrado.

También hay que tener en cuenta que los niveles de THC no pueden superar el 0.2% y aunque la planta está genéticamente preparada para no superar estos niveles, con una sobre fertilización podría darse el caso que superasen los límites legales por lo que es necesario suministrar la cantidad justa de fertilizantes.

En la tabla 9, se muestra el aporte que necesita la planta para prosperar, para afinar y suministrar los nutrientes necesarios, es conveniente realizar un estudio del suelo en el que se va a realizar la siembra, esto arrojará luz sobre el tipo de tierra y los nutrientes que hay en ella.

Tabla 9. Aporte de fertilizantes necesario para el cáñamo.

Elemento Nutritivo	Aporte por Tn de materia seca
Nitrógeno (kg N)	9 a 12
Fósforo (kg P ₂ O ₅)	6 a 8
Potasio (kg K ₂ O)	12 a 19
Calcio (Kg Cao)	20 a 25
Magnesio (kg MgO)	2 a 4

Los tipos de aplicación de los fertilizantes se distinguen por su estado, pueden ser sólidos o líquidos, dentro de los sólidos encontramos:

- Fertilizante en polvo: El grado de finura varía según el tipo de fertilizante, puede aplicarse directamente o diluido en el agua de riego.
- Fertilizantes granulados: Son partículas de 1 a 4mm, permite una dosificación más precisa y libera los nutrientes de forma gradual.
- Fertilizantes macro-Granulados: Constituido por grandes gránulos de 1-3 centímetros.
- Fertilizante en pastillas: Son fertilizantes completos, hay de dos tipos, para plantas de flor y plantas de hoja
- Fertilizante en bastones: Son unas varillas rellenas de fertilizante concentrado que se clavan en el suelo.

Los fertilizantes líquidos alcanzan un gran rendimiento y uniformidad de aplicación en el terreno, pueden aplicarse directamente o ser disueltos en agua y pueden utilizarse antes o después de la siembra.

Las maneras de dosificar los fertilizantes varían en función de la naturaleza de este, hay tres formas de aplicación.

- Radicular: Se aplica al suelo.
- Foliar: Se aplica al follaje.
- Fertirriego: Se mezclan los fertilizantes con el agua de riego.

4.7. Cosecha

Para la obtención del aceite de CBD, el momento ideal es cuando los tricomas que presentan las flores pasen de tener un color transparente o lechoso, a un color pardo o ámbar, esto significa que parte del THC se ha oxidado y como consecuencia los niveles de aceite son mayores. En la figura 12, se observan los tricomas en el estado óptimo de recolección. (Roshental, n.d., #)



Figura 12. Tricomas del cáñamo en estado de recolección (Fuente: Matillaplant).

La cosecha se realiza a mano tradicionalmente, cortando el último medio metro de planta para obtener la parte con flor. Actualmente hay máquinas especializadas en la recolección de cáñamo que se adaptan al tipo de producción para garantizar la calidad del producto final.

En la figura 13, podemos ver la cosechadora de cáñamo Interceptor de la empresa FarmMax en Nebraska, EE.UU, diseñada para unirse a la cosechadora John Deere S, el Interceptor corta las flores de cáñamo que luego se transportan a un vagón adjunto, la peculiaridad de esta cosechadora es, que separa los tres productos de interés que se obtienen del cáñamo en tres corrientes, las flores, van al remolque, las semillas, se introducen en el contenedor de semillas y la fibra cae al suelo para su secado y posterior recolección.



Figura 13. Cosechadora para cáñamo FarmMax (Fuente: FarmMax)

4.8. Secado

Después de cosechar se deben secar las flores de cáñamo las cuales tienen una humedad relativa entre el 70-80 % hasta un 5-10 % para poder procesarlas. Este proceso se debe realizar a una temperatura que respete los productos termolábiles de la planta y fuera del alcance de la radiación solar que degrada estos compuestos.

El secado, se realizará en rejillas de secado extraíbles modulares de alta densidad, en un habitáculo aislado de la luz solar y con temperatura y humedad controladas durante dos semanas. La temperatura en la sala de secado será de entre 19-24 °C y la humedad entre el 45% y el 55 %. Hay que tener en cuenta que las flores desprenden humedad por lo que es necesario extraer el aire húmedo y mantener una corriente de aire circulante a través de la materia vegetal sin que afecte directamente a las ramas colgantes, lo que puede secarlas prematuramente y estropear el producto final. (LaMota, n.d., #)

La marca americana Montel ofrece estos módulos que permiten que todas las plantas obtengan un flujo de aire adecuado, lo que acelera el proceso de secado y reduce la posibilidad de que se desarrolle moho mientras las flores se secan.

La figura 14 muestra un enrejado en proceso de secado, como se observa, su estructura modular extraíble facilita el transporte por la instalación y almacenamiento ocupando el menor espacio posible.



Figura 14. Proceso de Secado de las flores de Cáñamo en rejillas marca Montel.
(Fuente: Montel)

4.9. Molienda

El proceso de molienda tiene que garantizar la conservación de los aceites de la planta. Se han valorado distintos procesos de molienda de otras especies vegetales para elegir el más adecuado.

- Molienda de pimentón: Se hace pasar el pimiento por un sistema de martillos y cribas, es desprovisto de semillas para ser procesado en molinos de piedra de esmeril, compuestos por una tolva, canaleja, muelas y boca de salida, el molino funciona con una piedra fija y otra móvil dispuestas en vertical, los molinos se instalan en batería para conseguir el granulado deseado, luego se realiza una segunda fase a menos revoluciones para refinar el producto. (Carlos V, n.d.)
- Molienda de cereales: Actualmente en la molienda de cereales hay varias técnicas disponibles, todas tienen como objetivo romper el grano y suavizar el endospermo, se utilizan molinos de bolas, discos y más, estas técnicas son muy agresivas por que el grano de los cereales tiene más dureza que la flor de cáñamo seca, por lo que descartamos estas opciones.
- Molienda de flores aromáticas: Una técnica utilizada en la molienda de flores aromáticas y especias es el molino de martillos, este sistema emplea una lluvia de golpes de martillo para moler el material con un tamiz en la base que deja pasar las partículas del tamaño seleccionado, como inconveniente se encuentra que puede generar calor, si este es controlado, el molino de martillos sería el idóneo para moler la materia prima.

La casa comercial Pimecsa ofrece un molino de martillos que se adapta a los requisitos del sistema planteado, llega hasta una producción de 6.000 kg/h y el tamaño de partícula será menor a 1mm, el sistema de molienda se puede observar en la figura 15. (Pimecsa, n.d.)



Figura 15. Molino de martillos marca Pimecsa. (Fuente: Pimecsa)

5. PROCESO DE EXTRACCIÓN DEL ACEITE

5.1. Fundamentos de la extracción

La RAE define el vocablo “extracción” como “acción y efecto de extraer” y el verbo extraer “sacar, poner una cosa fuera de donde estaba” en el ámbito químico se define como la separación de un componente de una mezcla por medio de un disolvente.

En los procesos químicos, es frecuente encontrar subproductos formados en la reacción de manera no deseada, por ello la separación y purificación del producto deseado, toma tanta o más importancia como la optimización de la síntesis. Es primordial encontrar procesos de extracción eficientes que permitan una recuperación máxima del producto a partir de la mezcla de reacción.

La separación de un compuesto por extracción se basa en la transferencia selectiva del compuesto a diferentes fases, las cuales poseen mejores condiciones extractivas. Esto es gracias a las diferencias de solubilidades relativas, es decir, un compuesto orgánico puede ser soluble en un disolvente orgánico en su forma líquida, pero no en su forma gaseosa. Existe una regla de la solubilidad que dice “Similar dissolves similar”, es decir, los solutos polares sólo pueden disolverse en disolventes polares, y los solutos no polares en disolventes no polares.

Las fases, es decir el estado en el que se encuentra la materia, son una parte fundamental para seleccionar el método o la técnica de extracción, se explica en el siguiente esquema mostrado en la figura 16.

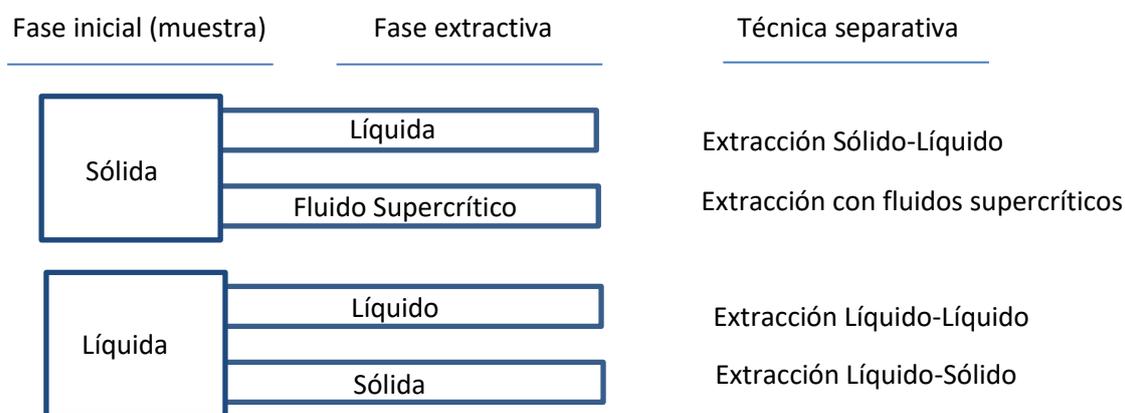


Figura 16. Esquema de fases y técnicas de extracción.

La extracción vegetal por norma general es una extracción sólido-líquido, también llamada lixiviación cuyos objetivos son:

- Concentrar el principio activo
- Obtener sustancias fácilmente digeribles
- Eliminar sustancias no deseables (malos sabores, olores, sustancias irritantes o tóxicas)

5.2. Métodos convencionales de extracción sólido líquido

Hay diversos métodos para extraer el aceite del cáñamo. A continuación, se comentarán los métodos más extendidos en la industria comparando las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

5.2.1. Extracción con disolventes

Es el método más extendido debido a su sencillez y bajo coste, se utiliza un disolvente para separar el aceite de la materia vegetal y posteriormente esta mezcla soluto-disolvente se evapora quedando el aceite como producto.

La extracción Soxhlet, es un método de extracción continua ampliamente utilizado en este campo, utilizando el mismo disolvente, el cual se evapora y condensa recirculándose en el equipo. En la figura 17 vemos un esquema de las partes de este equipo.

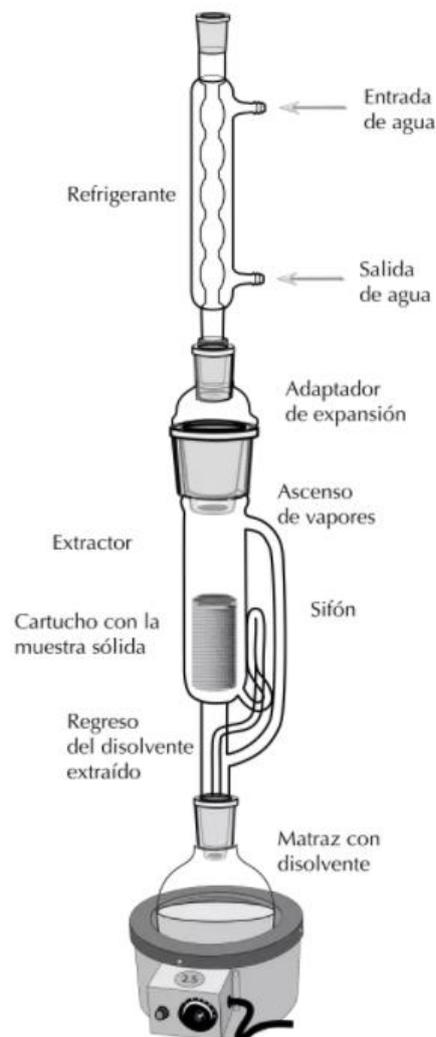


Figura 17. Detalle a pequeña escala de equipo Soxhlet. (Fuente: Indiamart)

El sólido que se va a extraer se introduce en un cartucho de papel de filtro, que se coloca dentro de una columna de extracción, posteriormente, se llena el matraz con disolvente hasta la mitad y se le aplica calor, al calentarse, este se evapora, y asciende hasta la zona refrigerante, donde se enfría y condensa, cayendo gota a gota sobre el cartucho extrayendo el principio activo del

sólido. Cuando se ha alcanzado un nivel de disolvente suficiente en la cámara de extracción, la parte soluble de componentes cae a través del sifón al matraz de disolvente por gravedad.

Para la elección del disolvente, se debe tener en consideración ciertos aspectos tales como:

- Si es recuperable, lo que hace posible su utilización en posteriores operaciones comportando un ahorro económico y también siendo más sostenible.
- La diferencia de densidad.
- Punto de ebullición
- Que sea estable e inerte químicamente con respecto al soluto.

En la actualidad, el hexano es uno de los más usados debido a su fácil manejo, bajo punto de ebullición (68,74 °C), bajo costo y fácil recuperación con pérdidas mínimas. Es un líquido incoloro, inflamable, volátil y de débil olor. También es insoluble en agua y soluble en alcohol, acetona y éter. Sin embargo, el hexano es perjudicial para el sistema nervioso, en concentraciones elevadas tiene un efecto narcotizante. Una larga exposición a este puede causar problemas cardíacos y respiratorios, también al contacto con la piel es irritante pudiendo llegar a provocar necrosis. A demás es muy perjudicial para el medio ambiente.

Existe una preocupación por utilizar hidrocarburos como disolventes, ya que el residuo que deja puede ser tóxico si no se elimina completamente en la fase de evaporación. A demás de los problemas medioambientales que suponen.

Para evitar riesgos se pueden utilizar disolventes naturales como aceite de oliva o etanol, estos tampoco están exentos de inconvenientes ya que el etanol extrae también la clorofila que da al producto un sabor desagradable y los aceites vegetales son difíciles de evaporar por lo que el producto final se encuentra en concentraciones menores. (D.Civantos, n.d.)

5.2.2. Destilación al Vapor

En este caso, la separación del aceite del material vegetal es provocada por vapor de agua. Esta técnica ha sido utilizada históricamente en la extracción de aceites esenciales utilizados en perfumería.

Se utiliza un matraz de vidrio con una entrada y una salida en la que se aloja la materia vegetal, la entrada se conecta a otro recipiente debajo del primero con agua en ebullición, mientras que la salida a un condensador. El vapor de agua sube hacia el matraz donde se encuentra la materia vegetal separando los aceites de esta, los cuales condensan. Una vez recogida la mezcla, insoluble en agua, es recogida en estado líquido formando dos fases en el matraz de recepción.

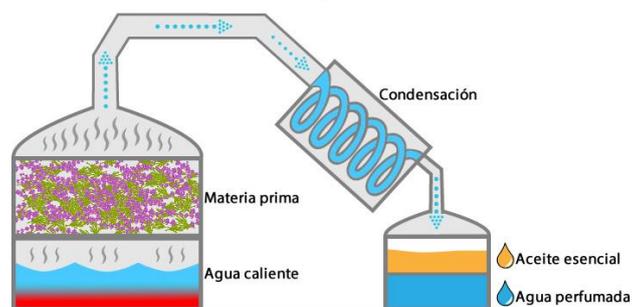


Figura 18. Esquema de equipo de destilación por arrastre de vapor (Fuente: Indiamart)

El aceite esencial puede recuperarse fácilmente por decantación. En la figura 18 observamos el esquema del proceso.

Este es un proceso ineficiente, costoso debido a la utilización de energía para calentar el agua y, además, si el vapor se calienta demasiado, puede dañar el extracto y alterar las propiedades químicas de la materia prima.

5.2.3. Extracción con CO₂ supercrítico.

La tecnología de extracción por fluidos supercríticos se basa en la utilización de un fluido llamado supercrítico como solvente, en este caso, el dióxido de Carbono debido a sus propiedades críticas bajas (7.38 MPa, 31.06°C) su baja toxicidad y alta disponibilidad.

Las ventajas de este método son, un bajo impacto medioambiental y la conservación prácticamente en su totalidad de las propiedades de los productos obtenidos, debido a que no son sometidas a temperaturas elevadas que pueden degradar los compuestos en los que se tiene el interés industrial.

Así mismo, la técnica permite la recuperación y posterior reutilización del dióxido de carbono varias veces antes de su liberación al medio ambiente por lo que tampoco se necesita un tratamiento especializado de residuos.

Como inconvenientes, encontramos una gran inversión en equipos y personal especializado, por lo que el coste de operación y de mantenimiento es mayor.

A continuación, se desarrollará este método de manera más amplia. En la imagen 19 se puede observar la complejidad de esta instalación, frente a las explicadas anteriormente.



Figura 19. Planta completa de extracción de fluidos supercríticos. (Fuente: Interempresas)

5.3. Extracción con fluidos supercríticos

La aplicación de los fluidos supercríticos en extracciones, aparecen por primera vez en la industria en la década de los 70's donde se documentan en el proceso de descafeinado del café (Maul et al.,1996).

La extracción supercrítica es una operación unitaria de transferencia de masa que se efectúa por encima del punto crítico del solvente, permite controlar y manipular propiedades como la viscosidad, densidad y difusividad del fluido mediante pequeños cambios de presión y temperatura. (Gallego & Castañeda, 2003).

El punto crítico se define como la temperatura y la presión a la cual el gas y el líquido son indistinguibles (Palomino, 2003), como observamos en la figura 20, cuando un fluido se somete a condiciones por encima de su punto crítico, se encuentra en estado supercrítico.

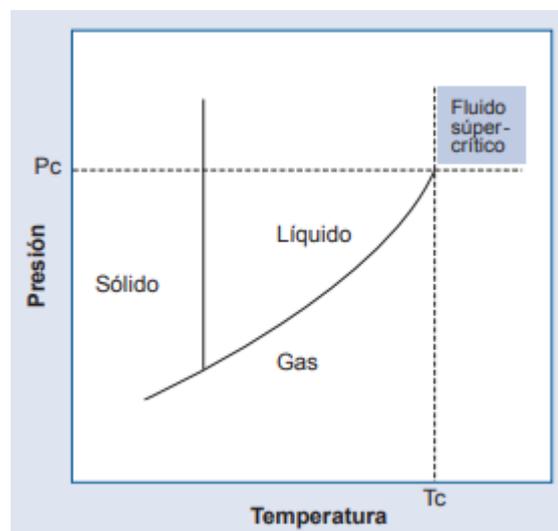


Figura 20. Diagrama Presión Temperatura indicando el punto crítico. (Fuente: Esacademic)

Al presentar propiedades tanto de líquido como de gas, tiene capacidad de disolver compuestos que normalmente no disolvería o disolvería muy poco en estado gaseoso o líquido, ya que la acumulación de moléculas alrededor del soluto es máxima debido a que estas no sufren exclusión por la existencia de gran espacio libre entre ellas (Fernandez & Fernandez, 1997).

Además, con la propiedad de que la transferencia de masa está mejorada, el uso de la extracción con FSC proporciona tiempos de extracción más breves y una eficiencia de extracción mejorada por una mejor penetración en la matriz. (Wright et al., 1987)

Cuando la corriente, en este caso de CO₂, atraviesa el lecho del producto en estas condiciones, el componente de interés es extraído de forma sencilla, posteriormente, se produce una despresurización de manera que el CO₂ pasa de estado supercrítico a gaseoso, baja drásticamente su solubilidad y en este proceso libera el producto extraído en la etapa anterior, se pueden realizar varias etapas de fraccionamiento a diferentes presiones.

Luego el CO₂ es recirculado después de pasar por unos filtros que eliminan parte del soluto residual que puede haber arrastrado el CO₂ y se condensa para almacenarse.

Etapas de la extracción

El proceso de extracción por fluidos supercríticos cuenta con cuatro etapas básicas, las cuales se detallan a continuación y se pueden ver gráficamente en la figura 21.

- **Ajuste de temperatura:** Se lleva el fluido comprimido a la temperatura crítica necesaria, puede realizarse a través de un intercambiador de calor.
- **Presurización:** Se alcanza la presión crítica necesaria del solvente mediante una bomba o un compresor.
- **Extracción:** Se lleva a cabo en un recipiente extractor a alta presión donde se encuentra la matriz que será procesada. El fluido y la matriz entran en contacto y se arrastra el soluto deseado.
- **Separación:** Se separa la sustancia obtenida del solvente (Gallego y Castañeda, 2004)

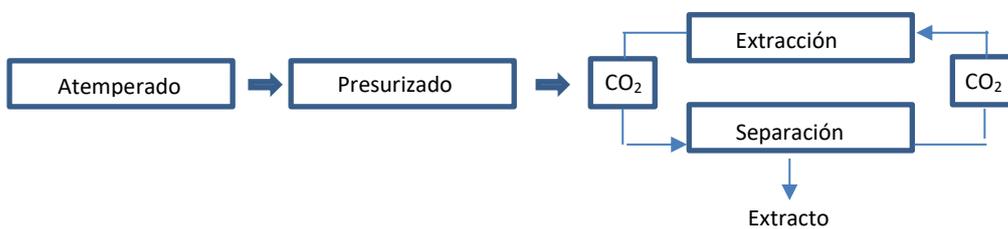


Figura 21. Diagrama de bloques del proceso.

Las particularidades que caracterizan este tipo de plantas son:

- Elevadas presiones de operación
- Propiedades específicas del dióxido de carbono

Las elevadas presiones de trabajo se traducen en una infraestructura especializada con unos espesores de equipo elevados que puedan soportar estas presiones, esto encarece tanto la instalación como la mano de obra que debe ser especializada. Por otra parte, también debe haber sistemas que garanticen la estanqueidad para asegurar las condiciones de operación con sus consiguientes sistemas de seguridad como válvulas, discos de ruptura y conjuntos tanto de sistemas informáticas que automaticen la planta como de enclavamientos y alarmas que garanticen la seguridad.

Las propiedades específicas del CO₂ hacen que haya que prestar especial atención al diseño, ya que, en las despresurizaciones, se produce una exotermia que debe ser neutralizada, ya que si no se produce la formación de nieve carbónica que crea solidificaciones en el interior de las tuberías y las válvulas.

La diferencia elevada de presiones entre distintos puntos de la instalación, hacen que el CO₂ pueda causar abrasión en los internos tanto de las válvulas manuales como de control y las juntas.

5.3.1. El CO₂ como disolvente

El Dióxido de carbono, es un gas inocuo utilizado ampliamente en la industria alimentaria, cosmética, farmacéutica y química como disolvente en las extracciones, entre otras se dirige a operaciones de obtención de extractos herbales a partir de plantas aromáticas, la mejora de propiedades de alimentos (desgrasado, extracción de colesterol de aceites y otras).

Se han estudiado una gran variedad de fluidos supercríticos para la extracción que cubre un amplio rango de temperaturas, presiones, pesos moleculares y polaridades, aun así, el dióxido de carbono es el más usado por su presión crítica moderada de 7.2 MPa y baja temperatura crítica 31°C siendo la elección óptima para la extracción de compuestos termolábiles.

Las ventajas del CO₂ como disolvente son las siguientes:

- Baja toxicidad, es una sustancia considerada como segura
- Baja inflamabilidad, no es combustible ni explosivo
- Bajo coste, está disponible en cantidades industriales a un precio razonable
- Baja reactividad
- Facilidad de alcanzar condiciones supercríticas
- Baja agresividad medioambiental, es menos dañino para el medio ambiente que los disolventes tradicionales
- Su estado es gaseoso en condiciones ambientales
- Tiene buena compatibilidad con detectores

A demás de las ventajas intrínsecas, encontramos ventajas adicionales en la extracción de aceite de CBD como:

- Sin color, olor ni sabor
- No deja residuo en el producto final ni en el producto agotado lo que facilita su posterior uso como subproducto.
- Las condiciones de extracción poco enérgicas no dañan los componentes termolábiles de las flores de cáñamo.

Sin embargo, el CO₂ tiene importantes limitaciones sobre todo para la extracción de compuestos polares ya que al tratarse de un gas apolar no son solubles los compuestos polares, como azúcares, polisacáridos, aminoácidos, proteínas, sales inorgánicas, etc. Este problema, tiene solución utilizando un cosolvente que modifique la polaridad del CO₂ pero cambiaría su presión y temperatura críticas y se formaría un sistema ternario en el que se dificultan aún más las condiciones de operación.

El CO₂ utilizado que se utilizaría en esta instalación, sería de calidad alimentaria, certificado por el sistema de seguridad alimentaria ISO 22000 y almacenado en recipientes criogénicos en estado líquido, como el que se puede ver en la figura 22.



Figura 22. Depósito criogénico de CO₂ (Fuente: Directindustry)

5.4. Establecimiento de las variables de operación.

En este apartado, se muestran varios experimentos relacionados con la extracción de fluidos supercríticos para la posterior fijación de las variables de operación en la planta de extracción para el aceite de CBD.

5.4.1. Estudios previos

Publicación 1: Estudio Comparativo de la extracción de cafeína con CO₂ supercrítico y acetato de etilo. (Ordoñez, et al., 2006)

En este trabajo, se evalúa el método de extracción con dióxidos de carbono supercrítico para la obtención de cafeína a partir de granos de café y se hace una comparativa con el método Soxhlet, se desarrollan varios experimentos que incluyen variaciones de presión, temperatura y tiempo de extracción y permite combinar de la forma más eficiente estas variables.

Se estableció una variable dependiente, el rendimiento y tres independientes, presión temperatura y tiempo de extracción. La cantidad de CO₂ se mantuvo constante para cada experimento. Como se ve en la tabla 10, se establecen dos niveles, bajo y alto.

Tabla 10. Factores y niveles de operación

Factor	Nivel
Presión	200 bar (alto)
	110 bar(bajo)
Temperatura	80°C (alto)
	60°C (bajo)
Tiempo	120 min (alto)
	60 min (bajo)

La totalidad de extractos obtenidos con CO₂, presentan un rendimiento superior a 1,3g de cafeína por kilogramo de café, en la tabla 11 se puede comprobar, los ensayos (3',5',6' y 7') se realizaron utilizando CO₂ como solvente y acetato de etilo como cosolvente.

Diseño de un sistema de extracción de aceite de cáñamo para su uso en la industria farmacéutica y cosmética

Tabla 11. Rendimiento de cafeína en la extracción con CO2 supercrítico

Ensayo	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Tiempo de extracción (Min)	A: Muestra B: Duplicado	Rendimiento (G Cafeína/ KG Café)
1	110	60	60	A	1,326
				B	1,306
2	110	60	120	A	1,476
				B	1,485
3	110	80	120	A	1,492
				B	1,486
4	110	80	60	A	1,425
				B	1,414
5	200	80	120	A	1,610
				B	1,594
6	200	80	60	A	1,504
				B	1,490
7	200	60	120	A	1,531
				B	1,519
8	200	60	60	A	1,490
				B	1,513
3'	110	80	120	A	0,038
				B	0,041
5'	200	80	120	A	0,044
				B	0,040
6'	200	80	60	A	0,071
				B	0,077
7'	200	80	120	A	0,042
				B	0,038

Las conclusiones alcanzadas con este experimento aplicables a nuestra instalación son las siguientes:

- Las mejores condiciones de extracción de cafeína con CO₂ supercrítico se obtienen bajo los niveles experimentales de alta presión (200bar), alta Temperatura (80°C) y tiempo de extracción largo (120 minutos), como se observa en la tabla 11.
- La presión y el tiempo de extracción son los efectos con mayor influencia sobre el rendimiento, como observamos en la figura 23 siendo el efecto presión el que generó un valor más alto en la variable de respuesta.

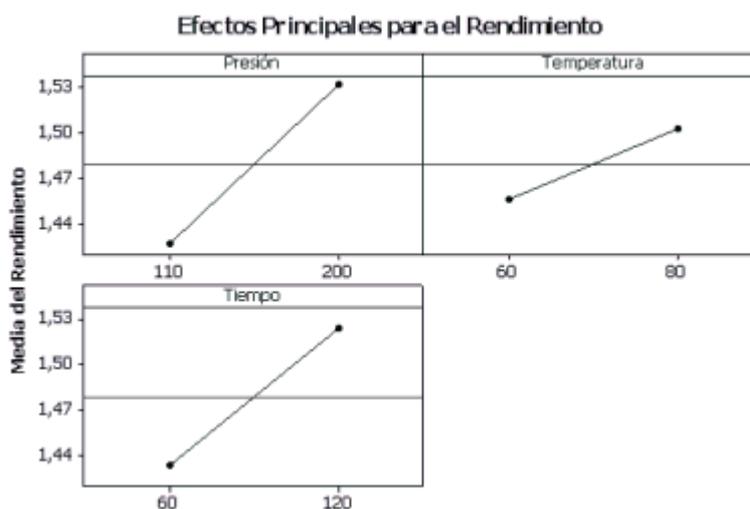


Figura 23. Efectos principales.

- La extracción Soxhlet proporcionó un mayor rendimiento en peso de extracto como se observa en la tabla 12, pero una menor especificidad frente a la extracción con CO₂ supercrítico, ya que el grado de pureza obtenido en Soxhlet era menor que con SCO₂.

Tabla 12. Resultados extracción Soxhlet.

	Muestra	Duplicado
Masa de café verde (g)	40,12	40,08
Masa de extracto (g)	13,96	13,49
Masa de cafeína (g)	0,14	0,14
Rendimiento (g cafeína/ kg de café)	3,53	3,45

- El coste operativo de la extracción con SFC es menor que en Soxhlet aunque requiere una mayor inversión inicial. Esto se puede ver reflejado en la tabla 13, donde se comprueba que tanto el coste del solvente como el energético es mayor en la extracción con Soxhlet, haciendo que el coste total por gramo de cafeína obtenida sea menor en la extracción con CO₂ en este caso la unidad monetaria son pesos colombianos.

Tabla 13. Comparativa de costes entre los dos métodos.

Costos de operación	Extracción con CO ₂	Extracción Soxhlet
Costo de solventes	CO ₂ (190g) \$ 707 N ₂ (36mL) \$ 32	Acetato de etilo (100mL) \$ 6300
Costos energéticos	0,11 kW (80oC) \$ 27	0,16 kW (110 oC)
Costos totales	\$ 766	\$ 6338
Costos totales por g de cafeína obtenida	\$ 476	\$1795

Publicación 2: Extrapolation from pilot plant to industrial scale SFE: A case study, (Jean-Yves Clavier et al., 1996)

Clavier, realizo en 1996 la extracción supercrítica de 7 especias en condiciones típicas de operación 40-60 °C y 250-300 bar encontrando que al representar el rendimiento (en % sobre el máximo) frente al producto de la solubilidad del extracto por la relación de SCO₂/especia las curvas se superponían como observamos en la figura 24, en la leyenda podemos ver el valor de solubilidad asignado a cada especia.

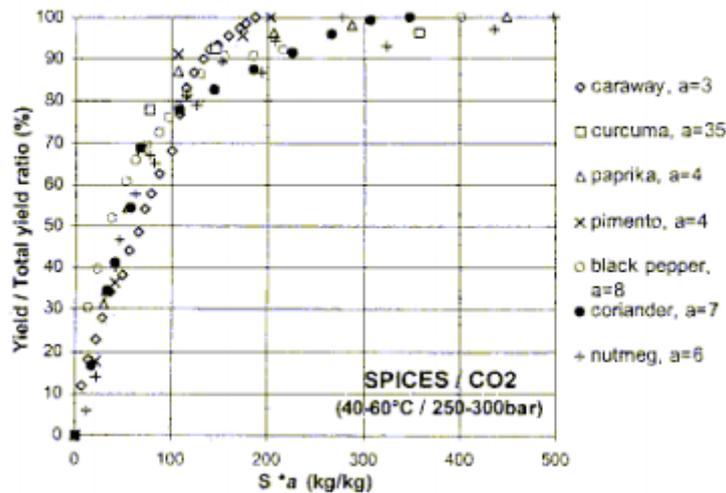


Figura 24. Resultados de los experimentos de Clavier et al.

Observamos que para una relación de S-a de 200, se alcanza en prácticamente todos los ensayos un rendimiento del 90%. Es decir, en las especias con solubilidad mayor se necesita una menor relación de SCO₂ por kg de materia vegetal.

También propone un método de escalado del reactor a partir de las relaciones m_s (flujo de SCO₂ kg/h) M_f (masa de materia vegetal en el reactor en Kg) y M_s (masa de disolvente con que se trata cada carga de sólido en Kg). El cociente m_s/M_f es inversamente proporcional al tiempo de residencia del SCO₂ en el extractor.

Las características del material introducido en el reactor eran las mostradas en la tabla 14:

Tabla 14. Características de la materia vegetal utilizada en el experimento de Clavier

Granulometría de la semilla	0,5-1,5mm
Humedad	8%
Gravedad específica aparente	550kg·m ³
Cantidad de aceite	3,8% w/w

La conclusión obtenida es que la relación entre la masa de sólido introducida en el extractor M_f y la masa de disolvente con que se trata la carga de sólido M_s influyen directamente en el rendimiento. Las condiciones de la materia vegetal también es una variable a considerar.

Publicación 3: Extracción con CO₂ supercrítico de oleorresina y otras fracciones de pimentón dulce y picante. (J. Pablo Fernández-Trujillo, 2008)

En este artículo, se revisan las condiciones para la extracción de pimentoón mediante CO₂ supercrítico. Se utilizan cosolventes para extraer los capsaicinoides como etanol y agua. Da especial importancia al pretratamiento de las muestras como la trituración o el peletizado

Tabla 15. Condiciones de extracción para diferentes experimentos

Materia prima y características	Tiempo presión y temperatura	Flujo de CO ₂	Rendimientos y recuperación (%)	Referencia
Picante y finamente molido	6,5h a 12MPa/40°C + 32MPa/ 40°C	ND	$\eta_{\text{capsaicinaT}}=15.5$ y $\eta_{\text{carotT}}=3$	Coenen y Hagen (1983)
Pimiento picante en polvo (400-600 μm) 10-11% Hr	40 Mpa/55°C	1-1.5mL/min	$\eta_T=11.5$ recup.89% capsaicin, 84% tocof, 48% g-tocof	Daood et al (2002)
Jalapeño peletizado 280-3190 μm	4-4.5h a 32 ó 36 Mpa/40-45°C	3-4L/min	$\eta_T=14$ $\eta_{\text{capsaicinT}}=0.04$ ó $\eta_{\text{capsaicinT}}=0.012$	Del Valle et al.(2003)
C.annuum cv. Scotch Bonnet iofilizado	400 atm/50°C 30 min+ 600atm/50°C 90 min	ND	$\eta_T=16.4$ $\eta_{\text{capsaicinaT}}=3.8$	Yao et al. (1994)
Chili (var. Byedige)	40 Mpa/40°C	0.49kg de CO ₂ /h	$\eta_T=12.6$ 96%capsaic. 80% color	Perva-Uzunalic et al (2004)
C. frutescens	$\rho_{\text{CO}_2}=800\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ / 55°C 15 min (estático+dinámico)	1mL/min	$\eta_T=ND$ $\eta_{\text{capsaicinT}}=0.076$	Peusch et al. (1997)
C. frutescens 230 μm	20-22 Mpa/40°C, 10 min	ND	$\eta_T=5.2$ $\eta_{\text{capsaicinT}}=0.25$ $\eta_{\text{tocofT}}=0.9$	Duarte et al. (2004)

En la tabla 15, se observa que la mayoría de los autores recomiendan una temperatura de 40°C en vez de 55. En general, la temperatura de 40°C presenta una mayor selectividad en la extracción con CO₂ (Jaren-Galán et al., 1999). Las presiones oscilan sobre 40MPa obteniendo rendimientos comprendidos entre 5,2 y 16,4%.

Publicación 4: Paprika (*Capsicum annum*) Oleoresin Extraction with Supercritical Carbon Dioxide. (Jarén-Gálan et al., 1999)

En este artículo, se realizan 2 experiencias de laboratorio, en continuo y en discontinuo para determinar los rendimientos de extracción de la oleoresina de pimentón. Todos los experimentos fueron realizados en muestras de pimentón que pesaban 1g a 40°C con un caudal de CO₂ de 3L/min (5.8g/min). Se utilizaron cosolventes en 1% de proporción w/w con el SFC-CO₂.

Los datos que arroja este experimento en modo continuo se muestran en la tabla 16.

Tabla 16. Resultados de la extracción continua.

	Volumen de extracción (L)		
	50	100	200
Presión (Mpa)	Rendimiento de extracción de ORP (%)		
13,79 MPa	10,3	10	-
20,68 MPa	10,8	10	-
27,58 MPa	10,3	10,6	8,9
34,47 MPa	9,3	11,3	10,9
41,37 MPa	9,9	11,6	-
48,26 MPa	10	12,3	-

La extracción discontinua, se componía de dos pasos, el primero a baja presión y un segundo a una presión más alta. Todas las combinaciones de alta y baja presión fueron probadas en un rango de 2000-7000 psi. Durante los dos pasos el volumen de CO₂ circulado fueron 50L. No se utilizaron cosolventes ya que habría muchas variables para analizar. Los resultados se pueden observar en la tabla 17.

Tabla 17. Resultado de la extracción discontinua.

Presión (Mpa)		Rendimiento de extracción ORP (%)				
Etapas 1	Etapas 2	9	8	9,2	9,4	10,5
13,79						
-	20,68	2,5	-			
-	27,58		2,8			
-	34,47			2,3		
-	41,37				1,7	
-	48,26					1,7
total		11,5	10,8	11,5	11,1	12,2

Tabla 17(cont). Resultado de la extracción discontinua

Etapa 1	Etapa 2	Rendimiento de extracción ORP (%)				
20,68			7,9	8,1	8,5	7,8
-	27,58		2,9			
-	34,47			2,8		
-	41,37				2,7	
-	48,26					2,5
total			10,8	10,9	11,2	10,3
Etapa 1	Etapa 2	Rendimiento de extracción ORP (%)				
27,58				9,2	9,4	9,2
-	34,47			2,3		
-	41,37				2,4	
-	48,26					3,6
total				11,5	11,8	12,8

Como se observa, los rendimientos obtenidos de la extracción continua y discontinua no difieren demasiado, se alcanza en la continua un rendimiento máximo de 12,3% mientras que en la discontinua 12,8% a la presión de 48,26MPa. Lo que sí que tiene importancia como se ve en el experimento en continuo, es el volumen de extracción, el cual a las mismas presiones se obtiene un rendimiento de extracción mayor cuanto mayor es el volumen de materia prima, esto ocurre en el paso de 50L a 100L luego con un volumen mayor no se ve este efecto.

5.4.2. Condiciones de operación del proceso

Atendiendo a la bibliografía consultada en el apartado anterior, se procede a fijar las variables de operación, teniendo en cuenta que no se ha encontrado datos específicos para la extracción de flores de cáñamo, se ha considerado como producto similar del pimentón molido y seco, el cual se procesa con fluidos supercríticos para extraer oleorresina de pimentón (ORP). La ORP es un colorante comúnmente usado en la industria alimentaria bajo la denominación codificada E160c.

La extracción se realizará de forma continua, pero si diseñará la instalación con dos recipientes extractores conectados al circuito, de esta manera se ahorran tiempos de preparado ya que el recipiente por el que no está circulando el CO₂ se dejará listo para empezar la extracción en cuanto acabe la extracción actual.

Se han encontrado artículos en los que se añadían rellenos de columna inertes en el extractor para aumentar la superficie específica, pero no había resultados concluyentes con su relación al rendimiento por lo que se desecha esta idea.

Las condiciones de operación serán las mostradas en la tabla 18.

Tabla 18. Condiciones de extracción.

Temperatura	40°C
Presión MPa	40MPa
Tiempo	120 minutos
Flujo de disolvente	750kg/hr
Volumen de disolvente	50kg/kg de materia vegetal
Cosolvente	No
Cantidad de materia prima	30kg
Volumen de materia prima	45L

Como se observa en la tabla 18, existe una gran desproporción entre el flujo de disolvente y la cantidad de materia a extraer, por lo que, si se implanta un buen sistema de control a la temperatura del disolvente, la extracción se puede considerar isotérmica, aun así, la torre de extracción estará dotada de un encamisado para asegurar que no se produzca un gradiente de temperaturas.

5.5. Descripción de la producción

Como se ha comentado en apartados anteriores la extracción se realizará a través de CO₂ supercrítico. En este apartado, se calcula el volumen de producción aproximado.

Sabiendo la producción de flores proporcionada por el fabricante de semillas, es de 600-800 kg/ha se ha estimado la producción menor, ya que una sobre fertilización de la tierra podría aumentar los niveles de THC cosa que no interesa.

Por lo que se obtiene la tabla 19, donde se muestra una estimación de los rendimientos respecto a la superficie de cultivo anual.

Tabla 19. Rendimientos en base a el suministrador de la semilla

Concepto	Cantidad
Superficie de Producción anual	333 ha
Peso de flores obtenido	200 Tn
Peso de semillas obtenidas	266, 66 Tn
Peso de biomasa obtenida	3333,33 Tn

La extracción del aceite tiene lugar después del secado en el que se reduce la humedad relativa del 80% al 5%, y el posterior triturado de las flores, en la figura 25, se muestra la materia prima en el punto descrito.



Figura 25. Flores de cáñamo secas y molidas preparadas para la extracción (Fuente: Laverderrevolución).

Como la cosechadora Farmax descrita en el apartado de cosecha, separa las flores de las semillas, se omite el paso de separar las semillas de la flor siendo las semillas otro residuo valorizable. En la tabla 20 se muestra la reducción de peso post secado que serán los kg de materia prima con los que se trabajará.

Tabla 20. Reducción de peso post secado.

	Cantidad (kg)
Peso de flores obtenido (80% Hr)	200 000
Materia seca	40 000
Peso de flores post secado (5% Hr)	56 000

El peso de la flor inicial después del proceso de secado se reduce en un 62% obteniendo así una cantidad de flor seca a tratar de 56.000kg en el transcurso de la temporada.

La planta industrial donde se llevará a cabo el proceso estará en funcionamiento 16 h/día y durante 5 días/semana, con dos turnos de trabajadores de 8 horas cada turno. Por ello, la materia prima tratada mensualmente debe de ser de 4700 kg aproximadamente, la masa de flores de cáñamo tratadas diariamente serán 240 kg.

Para calcular el volumen se han utilizado datos del pimentón molido, ya que no ha sido posible encontrar la densidad de flores de cáñamo molidas.

Para tratar diariamente 240 kg, teniendo en cuenta que la duración de la extracción son 2 horas se deben realizar 8 extracciones/día tratando en cada extracción 30 kg de flores secas, por lo que sabiendo la densidad (650 kg/m³), el volumen del recipiente deberá de ser de 45 L.

En la tabla 21 se detallan los volúmenes con los que se trabajará para conseguir los objetivos fijados y mantener la planta activa durante toda la temporada.

Tabla 21. Volúmenes de tratamiento de materia prima.

	m ³	Litros
Volumen para procesar en la temporada	86,15	86153,85
Volumen mensual	7,18	7179,49
Volumen diario	0,36	358,97

Para estimar la producción de aceite de CBD se debe tener en cuenta que las flores contienen un 3% de aceite de CBD, según el suministrador de las semillas, también se fija un estándar de calidad sobre la pureza del producto resultante debe ser entre 91-95% en CBD ya que el extracto contiene otros productos como puede ser agua, pequeñas cantidades de THC, terpenos u otras sustancias.

Por lo que haciendo un cálculo estimativo sobre la cantidad en kilogramos de aceite de CBD obtenida, según el porcentaje de recuperación aproximado extraído de la bibliografía:

$$\begin{aligned} & \text{Cantidad de aceite de CBD producido por extracción (Kg)} \\ & = \text{cantidad de materia prima extraída en kilogramos} \times \\ & \text{cantidad de aceite en \%} \left(\frac{w}{w} \right) \times \text{cantidad de CBD recuperada \%} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Aceite de CBD} &= 34 \text{ Kg de flores de cáñamo} \times \frac{3\%}{100} \times \frac{94\%}{100} \\ &= 0.9588 \text{ kg de CBD puro} \end{aligned}$$

Es decir, por extracción se obtiene aproximadamente 1Kg de CBD, al día 8kg y el total de la producción de aceite de CBD por temporada es de 1580 kg.

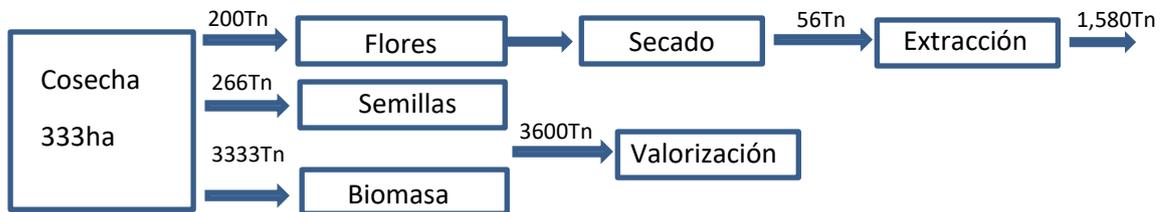


Figura 26. Diagrama de bloques con peso de materia a tratar

5.6. Descripción de la operación

Se cuenta con dos cilindros extractores incorporados al circuito, uno de ellos en funcionamiento, el otro, con el sistema de válvulas cerrado, lleno y listo para empezar el proceso en cuanto acabe el anterior, de forma que no se pierda tiempo en cada extracción.

La carga de estos cilindros se realiza manualmente, introduciendo 30 kg cada dos horas con la ayuda de una grúa o un trasportín. Una vez concluido el proceso de llenado y asegurados los cierres, se instala el cilindro extractor y se abre el circuito para hacer pasar el CO₂ mediante un juego de válvulas y bomba. La presión en el extractor se lleva hasta 40 MPa y el disolvente fluye durante 2 horas a través de la matriz sólida con un flujo de 750kg de CO₂/hr.

El agotamiento de las flores de cáñamo no se conoce con exactitud, pero se estima en un 95%.

El SCO₂, con el aceite de CBD disuelto, pasa por una válvula de estrangulamiento despresurizándose hasta 6 MPa, separando de esta forma el soluto del disolvente en un evaporador flash, las condiciones del disolvente ya no son supercríticas.

Del separador obtenemos dos corrientes, la corriente líquida con su concentración en mayor parte de aceite pasa a un ebullidor, para eliminar los posibles restos de disolvente mediante evaporación, la segunda corriente, que ahora se encuentra en forma gas donde el aceite es prácticamente insoluble, pasa por varios filtros para asegurar que no ha arrastrado partículas de aceite y se licua en un condensador a 15 °C para para almacenarlo en el depósito y volver a incorporarlo al proceso.

Al finalizar el proceso, un compresor extrae el CO₂ sobrante alojado en el cilindro extractor, de esta forma se evita la liberación a la atmósfera asegurando que casi el 100% del CO₂ es recirculado.

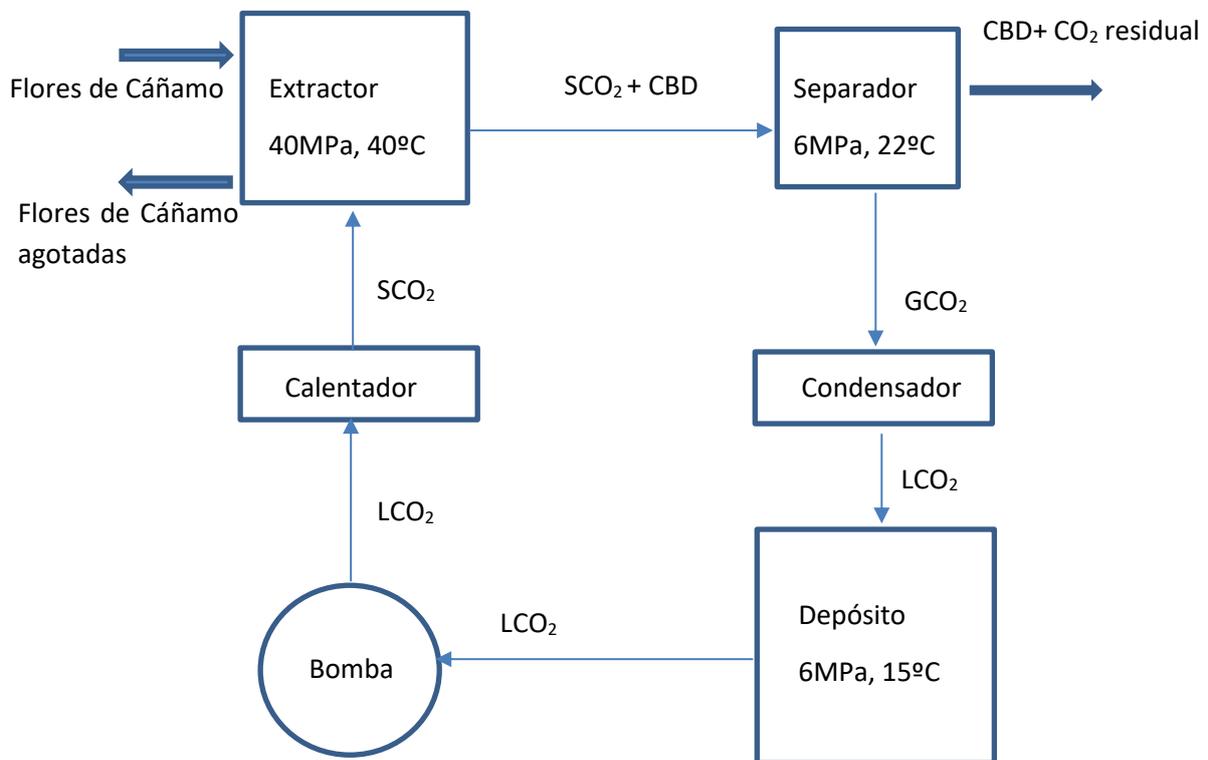


Figura 27. Diagrama de flujo del proceso

5.7. Valorización de residuos

En la realización de este trabajo, se ha buscado en todo momento la sostenibilidad medioambiental y la economía circular, por lo que no se puede obviar la valorización de varios residuos generados en el proceso de extracción, aproximadamente 3600 Tn como se puede ver en la figura 26.

A continuación, se describen los procesos de tratamiento de residuos que se podrían efectuar.

5.7.1. Codigestión anaerobia de la Biomasa

La codigestión anaerobia se utiliza en el campo y la industria como método de aprovechamiento de los residuos para la producción de biogás, un combustible energético y poco contaminante. La diferencia principal de una digestión y una codigestión, es que en esta última se mezclan residuos ricos en nutrientes como estiércol o fangos de depuradora, con residuos agrícolas como la biomasa del cáñamo.

La finalidad de la codigestión es aumentar el rendimiento del proceso de generación de biogás y el mejor aprovechamiento de las instalaciones.

5.7.1.1. La biomasa

De acuerdo con la directiva europea de energías renovables, se describe biomasa como la fracción degradable de productos biológicos residuales procedentes de la agricultura (incluyendo sustancias animales y vegetales), silvicultura e industrias relacionadas, incluida la pesca y acuicultura, así como la fracción de residuos biodegradables industriales y municipales. En la biomasa se incluye una amplia variedad de materiales sin procesar como madera, cultivos agrícolas, subproductos del procesamiento de la madera, agricultura y productos de la industria forestal, estiércol y fracción orgánica de corrientes residuales.

En el caso de la cosecha que se ha realizado en apartados anteriores, la cantidad de biomasa es muy elevada, se generan de 10-12 Tn/ha por lo que esta biomasa puede ser utilizada para la generación de energía.

En Europa, ya se realizan cultivos energéticos de alto rendimiento para la fabricación de biogás, el cual se utiliza en plantas de cogeneración, estas plantas son populares en países como Alemania, Austria, Italia y Dinamarca. Como observamos en la figura 28 el cultivo de cáñamo con fines energéticos está considerado un cultivo marginal comparado con otros como puede ser la caña de azúcar.

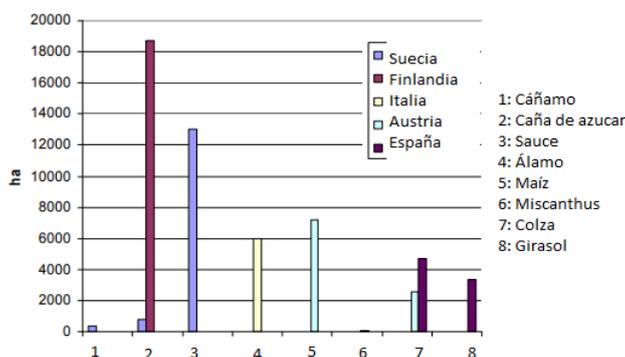


Figura 28. Cantidad de cultivos energéticos en Europa (Fuente: OP.europa).

5.7.1.2. Fundamentos

La digestión anaerobia es un proceso biológico de fermentación que se genera de forma natural en ausencia de oxígeno, mediante la acción de un grupo de bacterias, se descompone en productos gaseosos denominados “biogás” y en digestato, una mezcla de productos minerales y compuestos de difícil degradación. Este tipo de digestión presenta ciertas ventajas frente a la digestión aerobia, como la menor producción de biomasa de lodos, lo que conlleva un menor tamaño de instalaciones, también presenta una mejor actividad en residuos húmedos y a la hora de eliminar patógenos.

Otra ventaja a tener en cuenta es la escasa emisión de olores y la gran calidad que posee el producto sólido resultante como abono, por lo que, para este proyecto, sería muy interesante poder suministrar este abono a los productores de cáñamo.

Las principales desventajas relacionadas con la codigestión anaerobia son, unos tiempos de proceso mayores frente a la aerobia, necesidades de inversión más altas y aumento del control del proceso debido a la delicadeza de las bacterias que actúan en ausencia de oxígeno.

5.7.1.3. Etapas

El proceso de digestión anaerobia consta de cuatro etapas fundamentales, en cada una de estas etapas interviene un tipo diferente de bacterias que produce diferentes reacciones y para que esto ocurra y las poblaciones de microorganismos se desarrollen de forma óptima las condiciones tienen que ser las adecuadas.

- Etapa de Hidrólisis: Esta etapa consiste en la descomposición de los polímeros complejos constituyentes de la biomasa. Se obtienen moléculas más simples y solubles como azúcares, alcoholes y aminoácidos. En esta etapa las variables más importantes para tener en cuenta son el pH, la temperatura, la composición del sustrato y el tamaño de partícula de este.
- Etapa de acidogénesis: En este punto, se transforman las moléculas simples, aunque de un gran tamaño, formadas en la primera etapa, en compuestos más pequeños como ácido acético, butírico o propiónico. Algunas de estas moléculas son fermentadas y otras oxidadas en las siguientes etapas.
- Etapa acetogénica: Los compuestos intermedios no solubles formados en la acidogénesis, son oxidados por bacterias acetogénicas, se da la transformación de ácido láctico o etanol en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.
- Etapa metanogénica: En esta etapa actúan dos bacterias, las acetoclásticas, encargadas de reaccionar con el ácido acético y las bacterias hidrogenífilas consumidoras de hidrógeno, la actuación de estas dos bacterias da como resultado el metano y el CO₂ los principales componentes del biogás. Para que esto ocurra, hay que tener especial control de los parámetros de operación como el pH y la temperatura, ya que las bacterias que intervienen son especialmente sensibles a los cambios de condiciones.

En la figura 29 se observa un esquema de las etapas del proceso de digestión.

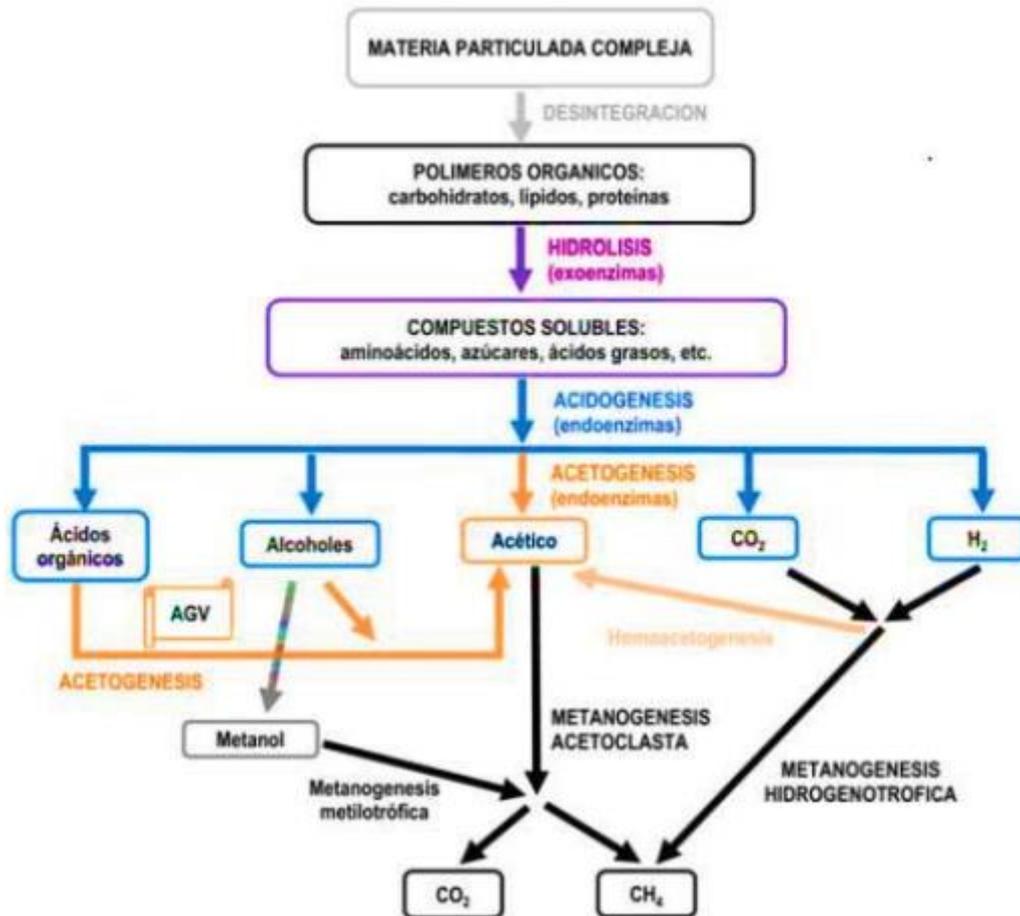


Figura 29. Etapas del proceso de digestión (Fuente: Agrowaste).

5.7.1.4. Productos

A continuación, se detallan las características de los productos obtenidos por medio de la codigestión anaerobia, una corriente gaseosa como producto principal de la instalación llamada biogás, utilizada como combustible y la otra una corriente húmeda llamada digestato o biol, el cual se utilizará como abono.

- **Biogás:** Los componentes principales que forman el biogás son metano y dióxido de carbono, la cumbre de producción en el proceso de biogás se encuentra en las etapas intermedias donde la población bacteriana está en su punto máximo y tiene capacidad para generar más producto, a partir de este momento la población empieza a disminuir por falta de sustrato y el rendimiento cae. La composición del biogás varía dependiendo de la materia orgánica utilizada, en la tabla 22 se observa la composición obtenida de residuos agrícolas y de lodos de depuradora.

Tabla 22. Componentes del biogás dependiendo del origen.

Componente	Residuo agrícola	Lodos de depuradora
CH ₄	50-80%	50-80%
CO ₂	30-50%	20-50%
H ₂ O	Saturado	Saturado
H ₂	0,2	0,5
H ₂ S	10-700ppm	0-1%
NH ₃	trazas	trazas
CO	0,1	0,2
N ₂	0-1%	0-3%
O ₂	0-1%	0-1%
Compuestos orgánicos	trazas	trazas

- **Digestato:** Es el producto resultante de la fermentación del estiércol y el agua durante la codigestión. Es rico en componentes orgánicos y nutrientes como fósforo, nitrógeno o potasio. Su composición también depende en gran medida de la materia orgánica introducida como alimento en el digestor, ya que es muy similar salvo por la eliminación de patógenos y la regulación de la relación C/N. Se puede someter a un proceso de extracción para separar en una corriente líquida y otra sólida pudiendo ser utilizadas ambas como fertilizantes.

5.7.1.5. Fangos de depuradora

Como se ha especificado en apartados anteriores, en la codigestión se deben aportar elementos ricos en nutrientes junto con la biomasa, en este caso se opta por los fangos de depuradora. La línea de fangos es una corriente en las depuradoras de aguas residuales, esta línea, contiene restos eliminados de la corriente líquida de entrada. Como se observa en la figura 30, la generación de fangos en las EDARU tiene una tendencia ascendente hasta 2017, teniéndose que tratar este residuo.

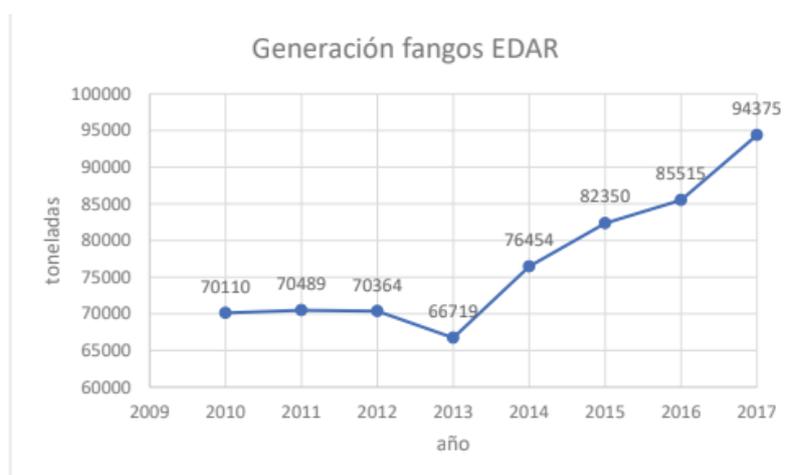


Figura 30. Generación de fangos EDAR hasta 2017. (Fuente: Gobierno de Navarra)

Los lodos se diferencian en función de dos posibles clasificaciones, según su origen y según su peligrosidad. Según su origen pueden proceder de estaciones de depuración de aguas residuales urbanas (EDARU) o de la depuración de aguas residuales industriales (EDARI) los cuales tienen una composición muy distinta debido a la procedencia de las aguas que se depuran. Según su peligrosidad encontramos fangos no peligrosos y peligrosos, estos últimos tienen contenido en sustancias perjudiciales como pueden ser metales pesados, patógenos o productos químicos.

En las EDAR hay dos líneas de fangos, una proveniente del decantador primario, la cual no ha sufrido ningún tipo de descomposición, ya que este decantador se sitúa antes del proceso biológico por lo que son muy reactivos y generan malos olores. La segunda línea de fangos proviene del decantador secundario, la cual ha sido sometida a un proceso biológico como puede ser una digestión, también hay EDAR que incorporan otros procesos biológicos como un tanque anóxico para eliminar el N_2 , por lo que estos fangos han permanecido más tiempo en el proceso, tienen menos contenido de compuestos reactivos, no se descomponen fácilmente y generan menos olores, también encontramos un mayor contenido de agua, entre el 98.5-99.5%. En la tabla 23 se observa la composición de los fangos en función al decantador del que provienen.

Tabla 23. Composición de fangos con relación al decantador del que proviene

	Decantador primario	Decantador secundario
SS (g/HE·d)	30-36	18-20
SSV (%)	70-80	80-90
pH	5.5-6.5	6.5-7.5
P(%)	0.5-1.5	1.5-2.5
N(%)	2-5	1-6
Carbohidratos(%)	8-10	6-8
Proteínas(%)	4-14	20-30
Grasas(%)	12-16	3-5

La elección del tipo de fango es un punto importante en el proceso de diseño del proceso ya que como se explicará a continuación los parámetros de control son fundamentales para el éxito de la digestión.

5.7.1.6. Variables de control

Los microorganismos que intervienen en el proceso son muy sensibles al medio en el que viven, por lo que, si no se trabaja en los rangos correctos, afectaría directamente a la colonia de microorganismos reduciendo el rendimiento drásticamente. A continuación, se detallan las principales variables que afectan al proceso.

- **Temperatura:** Es posible la proliferación de la colonia en tres rangos de temperatura para llevar a cabo la metanogénesis, psicrófilo (15-24°C), mesófilo (35-37°C) y termófilo (50-60°C). La temperatura está directamente relacionada con la actividad bacteriana, pero también se deben ajustar los costes de energía por lo que habitualmente se trabaja sobre 35°C. Es importante controlar también la estabilidad ya que las fluctuaciones de temperatura podrían perjudicar al proceso.

- Agitación: En la digestión, la agitación es necesaria para garantizar la homogeneización de la mezcla y un desarrollo uniforme de las colonias bacterianas, también tiene efecto sobre la uniformidad de la temperatura en el reactor.
- pH: Es indicador de la cantidad de metano en el biogás. El valor óptimo, se encuentra entre 6.6-7.6 será necesario el control de pH en especial debido a las bacterias metanogénicas las cuales por debajo de 6.6 se observa una reducción de su desarrollo.
- Tiempo de retención: Es el tiempo que permanece la materia orgánica en el digestor, es decir, la relación entre el volumen del digestor u el caudal de alimento que se introduce en el sistema. Está relacionado directamente con la producción de biogás ya que cuanto más tiempo permanece la materia orgánica en el digestor, mayor es la degradación y por lo tanto mayor volumen de biogás generado.
Se trabaja con tiempos de entre 20 y 25 días con cargas de 1 a 5kg de sólidos por metro cúbico de digestor, pero depende en gran medida del tipo de sustrato utilizado, no se ha encontrado bibliografía sobre la biomasa del cáñamo.
- Carga orgánica: La carga orgánica, es la cantidad de materia orgánica que se introduce en el digestor, es el principal determinante del tamaño del digestor.
- Humedad: La humedad durante el proceso, se tiene en la carga de materia orgánica. Se humedece hasta alcanzar el grado óptimo, mayor cantidad de agua conlleva una mejor digestión ya que se consigue la disolución de la materia orgánica, el rango óptimo es entre el 70 y el 90%. Si el alimento está demasiado seco, la agitación no se producirá correctamente.
- Ácidos grasos volátiles y alcalinidad: Los ácidos grasos volátiles, junto con la alcalinidad hacen de tampón en el sistema para garantizar que el pH sea adecuado para la población bacteriana, los ACG son subproductos de la fase de acidogénesis.

5.7.1.7. Usos del biogás

Una vez que se ha conocido el biogás como una alternativa energética sostenible, se explicarán sus usos y aplicaciones, cabe tener en cuenta que el biogás está compuesto por varios productos, algunos de ellos se comportan como impurezas dependiendo de la aplicación que se le quiera dar, por ello será necesario depurar la corriente de biogás de algunos elementos como el agua, el CO₂ o el H₂S. Los diferentes usos que se le puede dar son los siguientes:

- En una caldera para generación de calor o electricidad
- En motores o turbinas para generar electricidad
- En pilas de combustible, previa realización de H₂S y otros contaminantes de las membranas
- Introducirlo en una red de transporte de gas natural (después de la purificación y aditivación).
- Uso como material base para la síntesis de productos de elevado valor añadido como metanol o gas natural licuado.
- Combustible de automoción.

Además de los usos externos, también podría servir internamente, instalando un sistema de cogeneración que permitiría un ahorro en agua caliente y electricidad, junto con la conexión a la red para la venta del excedente eléctrico. Los costes asociados a instalaciones de residuos orgánicos mediante digestión aerobia son elevados, y la productividad es baja en términos de la

energía contenida en el biogás respecto a la cantidad de residuo tratado. Por lo que es una tecnología que sigue en desarrollo para poder aumentar el rendimiento. En la figura 31 vemos la equivalencia de biogás con otro tipo de combustibles, como observamos pese a que el rendimiento es menor, el biogás se obtiene de forma menos contaminante que el resto de las energías que aparecen en la imagen.

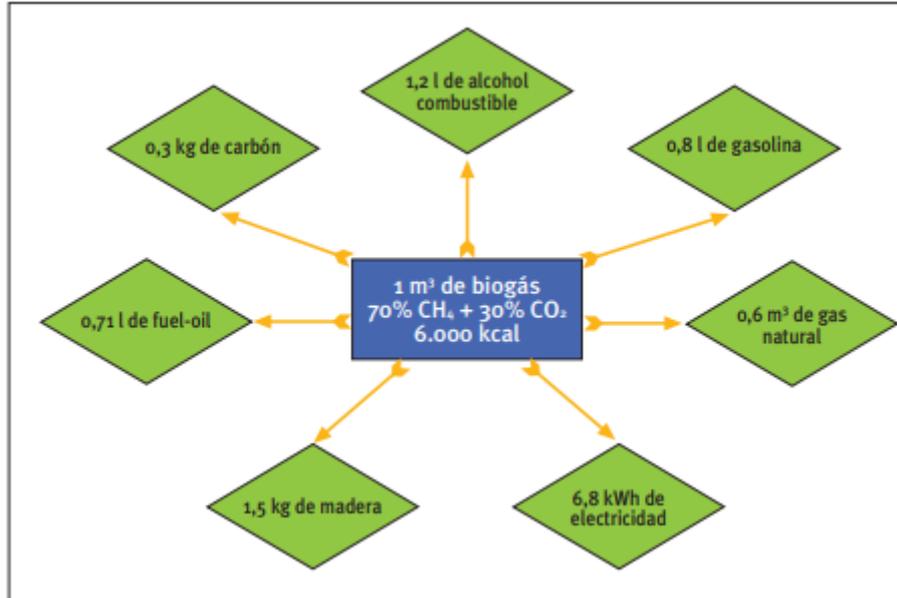


Figura 31. Equivalencia de 1m³ de biogás con otro tipo de combustibles (Fuente: CIEMAT)

5.7.2. Producción de biodiesel a partir de semillas de cáñamo

En el siguiente apartado, se estudiará una valoración energética para uno de los residuos obtenidos en el proceso de extracción de aceite de CBD, las semillas de cáñamo, según la producción indicada por el suministrador de semillas, la producción de semillas que tiene la planta son 800-1000Kg/Ha por lo que en los apartados siguientes se hablará sobre el biodiesel y el potencial de las semillas de cáñamo para producirlo.

5.7.2.1. ¿Qué es el biodiesel?

El biodiesel, es una energía renovable alternativa a los combustibles fósiles, está compuesto por grupos de ácidos grasos de cadena larga llamados mono-alquil esters, se produce a través de una transesterificación de la biomasa, la cual se detallará en apartados siguientes. Este combustible, es producido por cultivos dedicados, principalmente de aceite de soja en Estados Unidos, aceite de palma en Asia y aceite de colza en Europa. La calidad del combustible depende de ciertas características como el valor calorífico, la gravedad específica, el punto de inflamación, contenido en azufre, viscosidad, punto de enturbiamiento, punto de fluidez y estabilidad a la oxidación. Es característico su color verdoso como vemos en la figura 32.



Figura 32. Aspecto verdoso del biodiesel.

También toma una gran importancia el punto de inflamación que es la temperatura mínima a una presión de 1 atm a la cual el combustible se inflama, este valor toma gran importancia en la distribución transporte y almacenaje. El punto de enturbiamiento es la temperatura bajo la cual la parafina contenida en el combustible precipita haciendo que este tenga un aspecto turbio, las ceras solidificadas pueden dañar filtros de combustible e inyectores diésel.

Según el comité europeo de normalización (CEN) existe una serie de características para que un combustible generado orgánicamente sea aceptado como biodiesel, se hablará de ellas en el apartado de legislación.

5.7.2.2. Las semillas de cáñamo

La semilla de cáñamo se compone de 30-35% de peso en aceite. El Ministerio de agricultura y alimentación de la columbia británica en Canadá, informa en su ficha de cultivos especiales el rendimiento de semillas de cáñamo, con una tasa de extracción del 35% y la conversión del aceite de semillas de cáñamo en biodiesel, que es del 97% por lo que tiene un rendimiento bastante elevado, esto quiere decir que la perdida de producto debido a la saponificación es muy baja.

Realizando un cálculo rápido aplicado al sistema productivo planteado se puede hacer una estimación de la cantidad de biodiesel que se podría producir por hectárea. Se estima una media de 900 kg de semilla por hectárea con una densidad de aceite de 1.163L/kg

$$L \text{ de biodiesel por hectaria} = 900 \frac{\text{Kg de semillas}}{\text{Ha}} * 35\% \text{ de contenido en aceite} * 1.163 \frac{\text{L}}{\text{Kg}} * 97\% \text{ de rendimiento del proceso} = 355.35 \text{L/ha}$$

En la tabla 24 se muestra el rendimiento de otros cultivos especializados en la producción de biodiésel, el cáñamo está por debajo de otros cultivos en cuanto a rendimiento.

Tabla 24. Rendimiento en litros por hectárea de otro tipo de cultivos energéticos

Cultivo	litros/hectárea
Aceite de palma	4752
Alga	3000
Cocotero	2151
Colza	966
Cacahuete	842
Girasol	767
Maíz	700
Cáñamo	355

5.7.2.3. Métodos utilizados para la producción de biodiésel

Los métodos de producción del biodiésel, varían dependiendo de varios factores como la naturaleza de la materia prima o el tipo de catalizador a utilizar (ácido o básico). Entre los métodos más utilizados se encuentran:

- Transesterificación (ácida, básica y enzimática)
- Pirólisis

A continuación, se desarrollarán estos dos métodos.

5.7.2.3.1. Transesterificación

El aceite normalmente no puede introducirse en un motor de combustión diésel debido a impurezas como ácidos grasos libres, fosfolípidos, esteroides, agua y otras. Para abordar este problema, se debe someter a un proceso químico ligero llamado transesterificación, que produce un combustible más limpio y ambientalmente seguro, cuyo componente principal son los ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga. (S.N. Naik, 2006)

Este proceso, utiliza un alcohol de cadena corta como metanol o etanol que se desprotona con una base, para formar un nucleófilo, el cual reacciona con los triglicéridos para formar alquil ésteres y glicerol, en la figura 33 se muestra esta reacción simplificada.

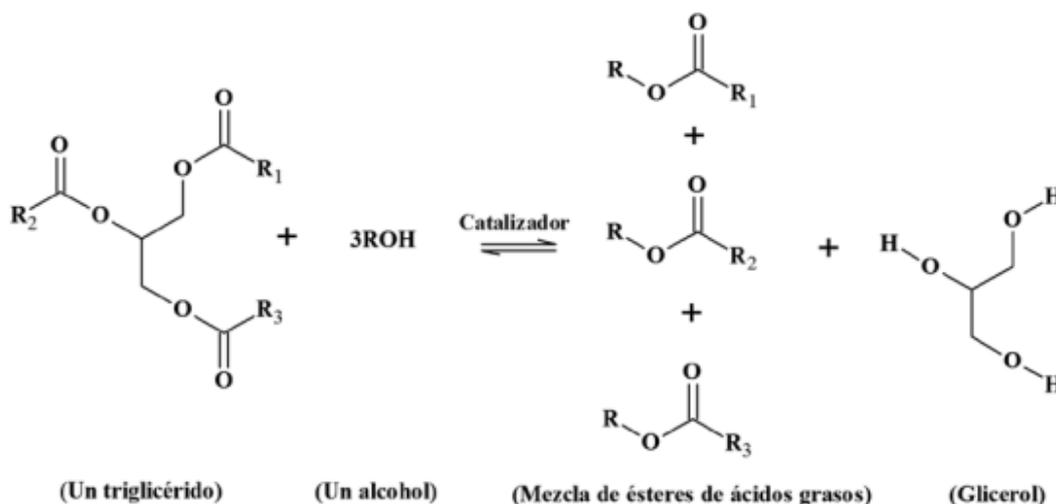


Figura 33. Mecanismo químico de transesterificación.(Fuente: CEUPE)

Debido a que esta reacción es reversible, se utiliza alcohol en exceso para desplazar el equilibrio hacia los productos. El etanol es más comúnmente usado debido a su bajo costo y sus ventajas químicas y físicas (es polar y es un alcohol de cadena corta), además este reacciona rápidamente con los triglicéridos y se disuelve fácilmente en álcalis. Para realizar la transesterificación estequiométricamente completa es necesario mantener una relación molar de alcohol a triacilglicérido de 3:1, en la práctica se utilizan relaciones mayores para aumentar el rendimiento, la velocidad de reacción depende tanto de las condiciones de operación como del tipo de catalizador y del tipo y variedad de triacilglicéridos presentes en el aceite. La catálisis puede ser homogénea, heterogénea o por resinas.

5.7.2.3.2. Transformación por pirólisis

La pirólisis, consiste en la descomposición química de los materiales plásticos por degradación térmica en ausencia de oxígeno. Las semillas son introducidas en una cámara cilíndrica y sometidas a altas temperaturas, entorno 370°C a 420°C, los gases liberados en el proceso se condensan en dos etapas para alcanzar un destilado de hidrocarburos, es decir, petróleo de bajo contenido en azufre. De cada tonelada introducida en la cámara cilíndrica, se obtienen aproximadamente 750L de diésel y 250L de queroseno.

El mecanismo de acción responsable es la descomposición radical, generando compuestos altamente reactivos ricos en oxígeno. Los biocombustibles obtenidos de esta forma no pueden usarse como tal, ya que su poder calorífico es bajo, se deben tratar con catalizadores oxidoreductores, como zeolitas o algunos basados en metales que eliminan el oxígeno de los biocombustibles. Normalmente requieren de una fuente adicional de hidrógeno para su reducción.

5.7.2.4. Aplicaciones

El biodiesel puede utilizarse en estado puro con la categorización de B100 o puede ser mezclado con diésel de petróleo para el funcionamiento de motores de combustión, actualmente legislaciones de varios países están imponiendo un porcentaje mínimo de biodiesel en el diésel tradicional, como por ejemplo en Argentina desde 2014 todo el diésel debe contener un 10% de biodiesel.

La compañía de trenes británica Virgin Trains dispone del Tren Real el cual funciona completamente con biodiesel B100.

El biodiesel también puede ser usado como combustible de calefacción con una mezcla biodiésel-aceite de 20:80 para no tener que modificar ningún componente de la caldera.

5.7.2.5. Ventajas e inconvenientes

El biodiesel es un combustible renovable y una alternativa energética a los combustibles fósiles, disminuye notablemente las principales emisiones de los vehículos como monóxido de carbono y los hidrocarburos volátiles. También supone un ahorro de las emisiones de CO₂ por lo que es un buen aliado para luchar contra la emisión de los gases de efecto invernadero.

La producción de biodiesel supone una opción viable para una modificación de los cultivos, que están sometidos a presiones de los mercados y el abandono de estos por la poca rentabilidad que tienen actualmente.

En cuanto a inconvenientes, la explotación de plantaciones de palmas para extraer el aceite y procesarlo para fabricar biodiesel supone un gran problema de deforestación, destrucción de parques naturales y amenaza de especies debido a la destrucción de su hábitat. En indonesia por ejemplo, ha supuesto la destrucción del parque nacional de Tanjung Puting de Kalimantan.

También hay que considerar su menor capacidad energética que puede ser compensada con el índice de cetano, lo cual produce una combustión más completa con menor compresión.

Hay que considerar que el biodiesel es un producto hidrófilo y degradable razones que dificultan su almacenamiento y transporte.

6. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN

A continuación, se va a realizar el diseño de cada una de las unidades que conforman la instalación.

6.1. Extractor

El recipiente extractor se carga con las flores de cáñamo molidas, se cierra y se hace circular el SCO_2 con una presión de 40 MPa, la matriz sólida permanece dos horas en contacto con el fluido supercrítico para asegurar una buena extracción.

La capacidad del extractor será de 45 L de materia prima, posicionándose dos contenedores intercambiables para así operar de manera semicontinua, cuando se acaba la etapa de extracción, se despresuriza el contenedor con el circuito cerrado y se intercambia por el otro previamente llenado, esto hace que mientras se separa el CO_2 del producto obtenido pueda empezar otra etapa de extracción.

Dimensiones de extractor.

El tamaño del extractor se ha elegido de acuerdo con la cantidad de materia prima a tratar y el tiempo que se pretende tener la instalación en funcionamiento

El diseño del tubo extractor se ha realizado de forma que tenga un diámetro y altura manejables ya que la carga de este se realiza a mano con ayuda de una grúa elevadora, por lo tanto, se han estimado las siguientes dimensiones mostradas en la tabla 25.

Tabla 25. Dimensiones del extractor

Altura	1 m
Diámetro	24 cm
Volumen	45 L

Material del cuerpo del extractor.

El cuerpo del extractor debe ser químicamente inerte, también resistente a presiones y temperaturas moderadas, por lo que debe tener un espesor considerable, en principio se ha hecho una estimación de 0.5 a 1cm de espesor a falta de contrastar el diseño experimentalmente.

El material elegido es Acero inoxidable austenítico refractario 1.4845 (designación EN). Los altos contenidos de cromo y Níquel que poseen estos aceros le proporcionan una alta resistencia a la corrosión a elevada temperatura, están indicados para aplicaciones en resistencias eléctricas, hornos, aplicaciones a altas temperaturas y calentadores de aire. Poseen una alta resistencia mecánica y tenacidad. Tiene una resistencia satisfactoria a los ciclos de temperatura, se recomienda cuando hay riesgo de choque térmico pudiendo alcanzar temperaturas máximas de trabajo de hasta 950 °C.

6.2. Separador.

El aceite obtenido del proceso de extracción se separa del SCO_2 por despresurización, ya que de esta forma disminuye la solubilidad (hasta 10^7 veces) y este puede ser recogido como líquido a la salida de un evaporador flash.

El vapor viaja a una velocidad de diseño que minimiza el arrastre de cualquier partícula de líquido, ayudado por el *demister* (punto 1 figura 34), que es un dispositivo que evita el arrastre de gotas por el principio coalescencia.

El punto 2 de la figura 34 corresponde a un distribuidor de entrada. La gran desventaja de este separador es el coste energético que conlleva recomprimir el CO_2 , un coste compensable por el alto valor añadido al producto.

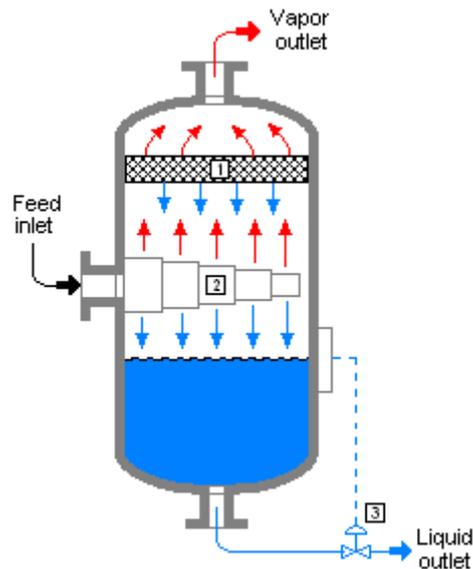


Figura 34. Evaporador Flash (Fuente: Chemical Process Equipment: Selection and Design).

Es requisito indispensable para que el separador sea efectivo que haya un espacio de aire dentro de la cámara, si el drenaje es insuficiente este puede fallar por lo que tiene que haber un sensor de nivel de líquido (punto 3 figura 34) para garantizar su funcionamiento. (Wallas & Stanley, 1988).

En la instalación se incorporarán dos separadores, uno para separar el SCO_2 del CBD, el cual pasará a un depósito intermedio, posteriormente se llevará a cabo una descarboxilación la cual purificará el extracto convirtiendo los ácidos cannábicos en cannabinoides y separando los residuos del disolvente que puedan quedar en la corriente de interés, para después pasar a otro separador donde se eliminan definitivamente estos residuos. En el segundo separador, la cantidad de gases será mucho menor, estos se podrán recircular al sistema después de atravesar un filtro.

Los parámetros de diseño del separador son los siguientes:

- Información del proceso, tanto para el líquido como para el gas, tal como Densidad y viscosidad, tensión superficial, Flujo y Presión y temperatura de operación. También se deben considerar otros aspectos generales como la pegajosidad del material, si se

produce arrastre de sólidos o si hay variaciones fuertes en el flujo de Vapor/gas y Líquido.

- Definición del tipo de separador los hay horizontales, verticales y esféricos y servicio
- Selección de los criterios de diseño para el servicio requerido, consideraciones adicionales y la configuración del separador
- Dimensionamiento del recipiente a través del cálculo de:
 - a) Velocidad crítica del vapor
 - b) Área requerida para el flujo de vapor
 - c) Relación L/D
 - d) Volumen de retención de líquido en el recipiente
 - e) Diseño y especificación de internos
 - f) Volumen del recipiente
- Definición y dimensionamiento de las boquillas de entrada y salida
- Cálculo de caída de presión en el equipo. (Díaz, 2009)

6.3. Ebullición tipo caldera.

En este equipo se produce una evaporación del LCO_2 para separarlo del aceite de CBD y además se produce una descarboxilación del aceite.

La descarboxilación, es el proceso de emplear calor para convertir los ácidos cannabinoides en cannabinoides activos, este proceso se realiza aplicando calor a temperaturas específicas y durante periodos de tiempo precisos. Químicamente, se elimina un grupo carboxilo de los ácidos cannabinoides, liberando dióxido de carbono. Por lo que compuestos como el CBDA se descarboxilan convirtiéndose en CBD y aumentando el grado de pureza de este en el producto final.

Las condiciones perfectas para la descarboxilación implican temperaturas bajas y un periodo de calentamiento relativamente largo, este proceso garantiza que el 95% de los cannabinoides se conviertan en su forma fenólica conservando los terpenos aromáticos.

Según una patente de GW Pharma Limited se realizan dos pasos para la descarboxilación:

- Paso 1: Se lleva el producto a temperaturas de 100°C a 110°C durante 10-20 minutos. Preferiblemente 115°C durante 15 minutos.
- Paso 2: Si el material es derivado de plantas con alto contenido en CBD (definidas como >90% como porcentaje total de contenido de cannabinoides) como ocurre en este caso, se llevará a 140°C durante 30 minutos.

Con este procedimiento se consiguen los resultados HPLC mostrados en la tabla 26.

Tabla 26. Resultados HPLC sobre el procedimiento de descarboxilación

Datos HPLC de la descarboxilación de CBDA de material vegetal			
Temperatura	Tiempo (horas)	CBD/CBD+ CBDA	CBD peak area/ 0.1g of herb
105°C	cero	0,15	4769
	0,5	0,22	5262
	1	0,86	5598
	2	0,93	5251
	4	0,98	5242
120°C	0,5	0,91	5129
	1	0,97	5217
	2	0,99	5037
	4	1	5200
140°C	0,5	0,96	5440
	1	1	5105
	2	1	5157
	4	1	5005

6.4. Bomba

El elemento impulsor se puede considerar un compresor o una bomba ya que el disolvente se puede manejar como fluido supercrítico o como líquido. Con un compresor se dificulta el control del flujo, tiene un mayor coste de inversión y un consumo mayor de electricidad por lo que se opta por una bomba.

La bomba requiere la presencia de un condensador anterior para licuar el gas y enfriarlo por debajo de su punto de ebullición y de un evaporador posterior que lo devuelve a condiciones supercríticas.

Se opta por una bomba hidráulica de diafragma que es una bomba alternativa de desplazamiento positivo, la cual funciona mediante el movimiento lineal repetido de un mecanismo, parecida a la mostrada en la figura 35, la característica principal de esta bomba es que utiliza una membrana flexible llamada diafragma que se flexiona, cambiando el volumen interno de la bomba, este movimiento combinado con dos válvulas una a la entrada y otra a la salida, permite que el fluido entre y salga de la bomba. La elección de esta bomba se justifica ya que se busca una dosificación precisa a pesar de los cambios de presión, en esta bomba el flujo es pulsado, esto puede causar vibraciones excesivas o daños en el sistema hidráulico denominados golpes de ariete. Desplazamiento positivo, significa que la bomba convierte energía mecánica a hidráulica con una cantidad relativamente menor de fluido y velocidad. (Solorzano, 2016).

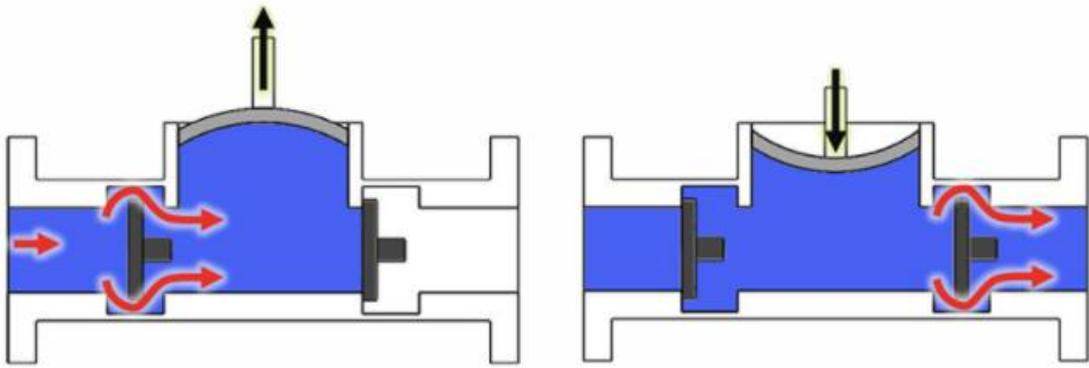


Figura 35 Bomba de diafragma (Fuente: Dienerprecisionpumps).

Para calcular el caudal que debe desplazar la bomba, nos apoyamos en el dato de flujo de disolvente, el cual debe de ser 750 kg/hr, como este está en condiciones supercríticas su densidad aumenta enormemente y es de 0.469 g/cm^3 . Por lo que después de realizar los cálculos pertinentes la bomba deberá desplazar un caudal de 1.6 L/hr como mínimo, confiando en la posible escalabilidad de la producción se dimensiona la bomba para un caudal de 5 L/hr.

Para ello se elige la empresa Lewa, que tiene un catálogo especializado en bombas para extracción con fluidos supercríticos, las ventajas que la empresa ofrece para esta aplicación son las siguientes:

- Hermeticidad
- Diseño de bombas de alta presión y sus periféricos para gas licuado (equipo de refrigeración).
- Son adecuadas para fluidos de baja viscosidad, no lubricantes
- Alta fiabilidad de funcionamiento
- Poco desgaste y sin contaminación por partículas debido a las pocas piezas móviles en la cabeza de la bomba
- Fáciles de limpiar
- Admiten el diseño higiénico para aplicaciones farmacéuticas
- Admiten la instalación en zonas con peligro de explosión.

Para determinar la bomba que más se ajusta a la instalación diseñada se ha consultado su catálogo con la curva de Caudal y presión obteniendo los siguientes resultados, mostrados en la figura 36:

Diseño de un sistema de extracción de aceite de cáñamo para su uso en la industria farmacéutica y cosmética

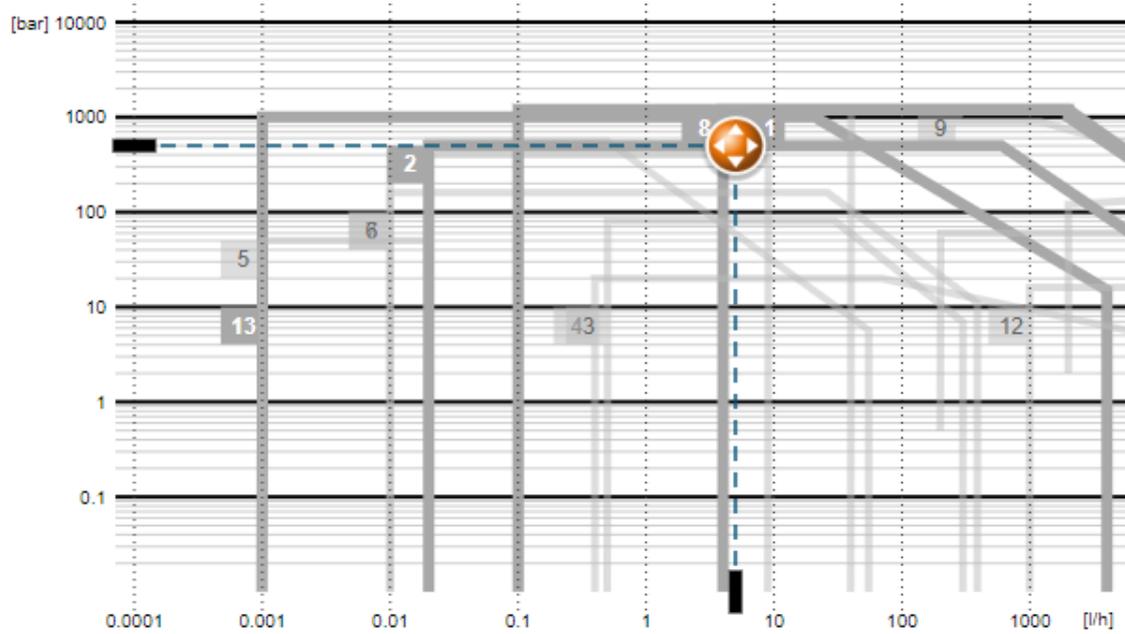


Figura 36. Gráfica caudal-presión para la selección de la bomba(Fuente: Lewa).

La bomba seleccionada es LEWA ecoflow diaphragm metering pump M900 series, con las especificaciones mostradas en la tabla 27 y el aspecto de la bomba se muestra en la figura 37.

Tabla 27. Especificaciones de la bomba elegida.

Caudal mínimo	0,1 L/h
Caudal máximo	114000 L/h
Presión máxima	50 MPa
Temperatura de operación máxima	150°C
Viscosidad máxima	100000mPa*s

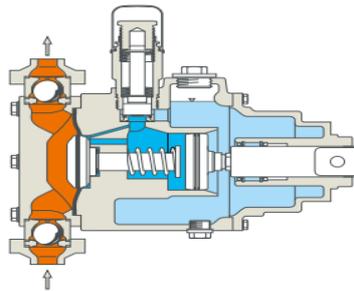


Figura 37. Lewa ecoflow M900 series (Fuente: Lewa)

6.5. Intercambiador.

Los intercambiadores de calor son dispositivos diseñados para transferir el calor entre dos fluidos, en este caso sirve para enfriar el LCO₂ para que entre al tanque subenfriado y no de problemas de cavitación.

Se ha optado por intercambiadores de carcasa y tubos ya que los fluidos supercríticos se caracterizan por su alta conductividad que dota de una gran eficiencia a estos intercambiadores.

En la figura 38 se muestra un esquema con los elementos del intercambiador seleccionado. Este tipo de intercambiador está compuesto por tubos cilíndricos montados dentro de una carcasa, un fluido circula por el interior de los tubos y otro por el exterior

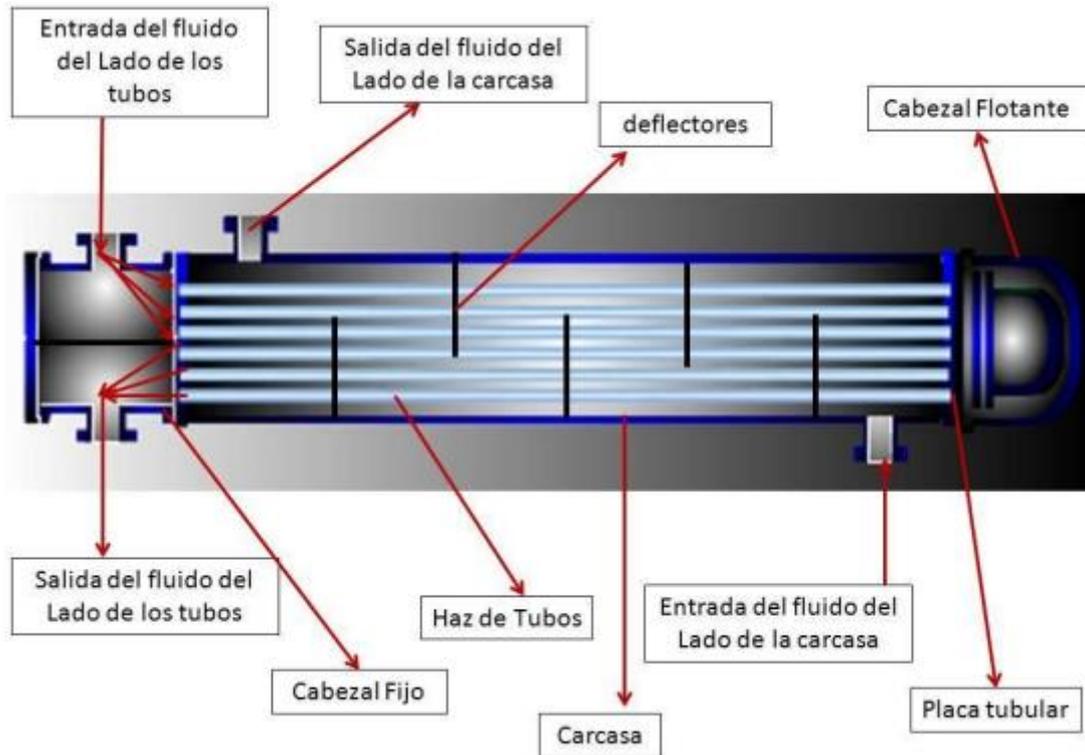


Figura 38. Intercambiador de carcasa y tubos (Fuente: Chemical Process Equipment: Selection and Design).

En el caso de esta instalación el fluido se enfría, circulando por los tubos interiores mientras que el fluido a menor temperatura circula por el exterior. En la tabla 28 se pueden ver las condiciones de operación para este intercambiador.

Tabla 28. Condiciones del intercambiador

Tipo de fluido	Tubos		Carcasa	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Flujo de entrada (kg/hr)	750		15000	
Flujo líquido (kg/hr)	-	750	15000	15000
Flujo vapor (kg/hr)	750	-	-	-
Temperatura de servicio (°C)	22	15	7	17
Presión de servicio (MPa)	6	6	0,1	0,1

Tabla 29. Propiedades físicas de las corrientes

Propiedades físicas	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor
ρ (kg/m ³)	720	240	999,96	-
μ (kg/m·s)	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	-
Cp (kJ/kg·K)	3	2	4,198	-

Según el diagrama de fases del CO₂, el cual se muestra en la figura el CO₂ a una temperatura de 15°C y una presión de 6MPa se encuentra en estado líquido. En la tabla 29 se pueden observar propiedades de las corrientes como densidad, viscosidad o calor específico.

6.6. Elementos de control.

La seguridad es primordial en cualquier entorno industrial y más en la industria química, en este caso se debe prestar especial atención en el campo de la presión de trabajo que llega a ser hasta 400 veces la presión atmosférica donde el riesgo de daños graves se hace evidente. La liberación de la energía acumulada en el fluido constituye el mayor riesgo ya que se puede traducir en explosiones, para evitar este riesgo es importante implementar una serie de medidas tanto de seguridad como de control que permitirán obtener un grado de seguridad en el entorno de trabajo.

Estas medidas se inician en el diseño y se llevan a cabo durante todo el proceso de extracción, los recipientes a presión deben mantenerse dentro de las condiciones de seguridad iniciales. El estudio de seguridad se aplicará a diferentes elementos de la instalación como:

- Equipos principales.
- Elementos de seguridad.
- Estrategia de control.
- Materias primas y productos.

6.6.1. Equipos Principales

La seguridad enfocada a los equipos principales tiene especial importancia en el diseño de estos, el extractor se compone de dos recipientes cilíndricos los cuales serán manipulados varias veces al día, tanto para cargarlos como para vaciarlos, por lo que se deben incluir cierres especiales en las tapas, el cierre más común es el de abrazadera cuya disposición se puede ver en la figura 39, también los hay de rosca o pernos los cuales garantizan la estanqueidad del cilindro extractor.

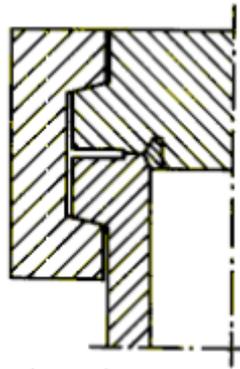


Figura 39. Cierre de abrazadera. (Fuente: Wurth)

El resto de los equipos como la bomba, los separadores flash, la caldera o el intercambiador deberán ser probados previamente a la puesta en funcionamiento de la planta para controlar fugas, deformaciones o defectos que puedan tener, ya que estarán sometidos a grandes presiones, el punto crítico son las soldaduras ya que son el punto más débil de los equipos. Además, deberán comprobarse los manómetros y las válvulas de seguridad.

En cuanto al depósito, se almacena en condiciones criogénicas, este será un depósito fijo, recubierto de un envolvente que dote al recipiente del aislamiento necesario para evitar pérdidas y mantener tales temperaturas.

El envolvente puede ser una cámara de aislamiento al vacío, que debe estar dotada de un sistema capaz de eliminar la presión que pueda generarse en la misma.

Este tipo de depósitos criogénicos, suelen estar contruidos concéntricamente, un interior fabricado en acero inoxidable austenítico y otro exterior de acero al carbono, protegido con un acabado superficial anticorrosión especial para exteriores, la cámara entre los dos depósitos está rellena de un material aislante de alta capacidad al que se le incorpora otro material higroscópico y se le realiza el vacío. Deberá disponer de un dispositivo que permita la medida del vacío.

Este depósito deberá ubicarse fuera de la nave con su cubeto de seguridad correspondiente cumpliendo la normativa de distancias de seguridad respecto a otros elementos de la instalación.

Para reponer las pérdidas de CO₂ se pueden utilizar botellones a presión o que el proveedor rellene el depósito con un camión con cisterna criogénica. Las válvulas del depósito deberán someterse a verificaciones y ensayos para comprobar su correcto funcionamiento.

Para las tuberías y conducciones deberá cumplir el principio básico de minimización de los puntos de conexión, ya que es principalmente donde se producen las fugas. La disposición de las líneas de tuberías debe facilitar los trabajos de mantenimiento y operación por lo que se hace esencial una buena planificación del entramado de tuberías y la localización de los elementos de control y seguridad, si fuera necesario, se pueden considerar puntos de acceso alternativos como escaleras de servicio o pasarelas. También deben evitarse las tuberías y conexiones flexibles ya que debido a las altas presiones pueden estar sometidas a esfuerzos que limiten su resistencia.

6.6.2. Elementos de seguridad

En cuanto a la seguridad activa, deberá de implementarse un sistema de seguridad central que envíe señales hacia los diversos equipos de control, además un sistema de detección de fugas con la información centralizada en un punto de control con presencia continuada.

Las inspecciones de seguridad tendrán que ser periódicamente realizadas por el personal de la planta y de acuerdo con un procedimiento preestablecido de revisión y control, los elementos a los que se debe someter esta inspección serán:

- Sistemas de alivio de emergencia.
- Manómetros.
- Alarmas y sistemas automáticos de parada de emergencia.
- Detectores de gases.
- Sistemas de bloqueo y drenaje.
- Caudalímetros.

Todos los recipientes a presión y las líneas de tuberías seleccionadas, deberán estar dotados de manómetros, presostatos y líneas de venteo. Además, se instalarán caudalímetros para controlar el flujo.

Hablando de la seguridad pasiva, los equipos, deberán incorporar sistemas de seguridad frente a sobrepresiones como válvulas de seguridad y discos de ruptura, estos últimos pueden verse en la figura 40. Un disco de ruptura es un sistema de alivio instantáneo de sobrepresiones o depresiones.

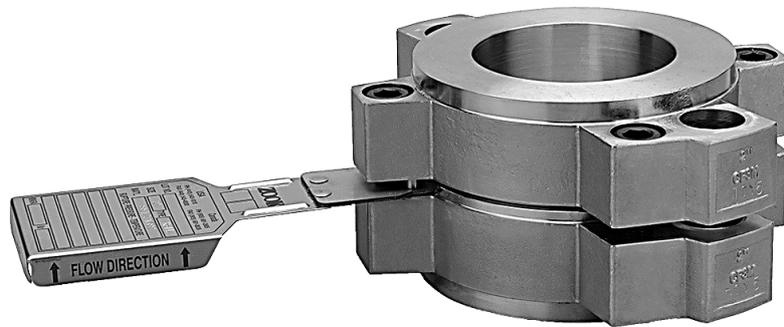


Figura 40. Disco de ruptura (Fuente: Aurriss)

También es conveniente la instalación de limitadores de exceso de flujo que son válvulas automáticas que limitan el caudal de trabajo.

Como elementos de retención, se encuentran las válvulas antirretorno y de seguridad que impiden la parada total de la instalación si se produce una avería.

6.6.3. Estrategia de control

La instrumentación ha permitido el avance tecnológico de la automatización de los procesos industriales, gracias a esta se puede lograr un control casi total sobre las variables de operación en cada punto de la instalación, por ello, es necesario un sistema de control exhaustivo implementando unos lazos que abarquen cada proceso y sus variables más importantes.

También es necesario un sistema de parada generalizado, garantizando que, en caso de detener la actividad, la instalación quede en el punto más seguro.

También se deberán instalar pulsadores manuales ya que los riesgos con consecuencias más graves pueden prevenirse mediante sistemas automáticos de actuación en caso de emergencia, estos deben someterse a un mantenimiento para asegurar su fiabilidad.

7. LEGISLACIÓN ESPAÑOLA Y EUROPEA

En este apartado, se tratará la normativa y leyes tanto españolas como europeas de todo el proceso de producción, desde el cultivo hasta la valorización de residuos, así como el conocimiento de las mejores técnicas disponibles (MTD's) para cada caso. También se comentarán algunos estándares de calidad que se deben cumplir y las subvenciones a las que se podrían optar.

7.1. Cultivo y Cosecha

En cuanto a la cosecha, para cultivar cáñamo industrial dentro de la Comunidad europea, no se necesita ningún tipo de permiso, puesto que el cultivo es totalmente legal en los países miembros, no obstante, se deben tomar ciertas precauciones. Como se ha comentado anteriormente, se ha elegido una de las semillas autorizadas por la UE, según el reglamento nº639/2014 artículo 1 cuyo punto primero dice así:

“A los efectos del artículo 32, apartado 6, del Reglamento (UE) n.o 1307/2013, la admisibilidad de las superficies utilizadas para la producción de cáñamo estará supeditada a la utilización de semillas de las variedades enumeradas en el catálogo común de las variedades de las especies de plantas agrícolas a fecha de 15 de marzo del año con respecto al cual se conceda el pago y publicadas de conformidad con el artículo 17 de la Directiva 2002/53/CE del Consejo (). Las semillas se certificarán de conformidad con la Directiva 2002/57/CE del Consejo”.*

La semilla de la variedad futura 75 consta en este catálogo como vemos en la figura 41.

#	Variety name	Species (Subspecies)	Common catalogue status
1	Futura 75	85 - Hemp	Registered

Figura 41. Lista del catálogo común de las variedades de las especies de plantas agrícolas. (Fuente: OPEuropa.eu)

Se ha contactado con un cultivador de cáñamo de la localidad de Ribarroja, el cual explicó el procedimiento previo al cultivo que tuvo que realizar, a continuación, se detalla el modus operandi.

- Primer paso: Asegurarse de que se cumple el punto primero del reglamento 639/2014, también guardar la tarjeta de certificación de la semilla, así como las facturas de compra de estas.
- Segundo paso: Acudir a la OCA (Oficina Comarcal Agraria) en la que se encuentra inscrita la localidad en la que se realizará el cultivo y dar de alta la plantación de cáñamo en el REGEPA (Registro General de la Producción Agrícola). Como vemos en la figura 42 proporcionada por el cultivador, vemos un formulario en el que se indica la provincia, el municipio y la ubicación exacta de la parcela, así como el producto que se cultivará, la variedad y la superficie de cultivo, también si es de cultivo o regadío. Como curiosidad el cáñamo para la producción de flores es tan reciente que la legislación aún no lo contempla, por lo que sólo se podrá inscribir el cultivo para la obtención de fibra o como planta oleaginosa.

Figura 42. Formulario de Inscripción en el REGEPA (Fuente: Laverderevolución)

- Tercer paso: Dirigirse al cuartel de la guardia civil perteneciente a la localidad donde se encuentre el cultivo, así como a algún otro cercano si se considera necesario. Una vez allí se entregará por registro de entrada, varios documentos, entre los que se encuentran la fotocopia de la certificación de la semilla, factura de compra de esta y la documentación obtenida en la OCA que demuestra que nuestro cultivo se encuentra dado de alta. También es conveniente realizar una declaración por escrito de las intenciones de cultivo para que quede constancia que las autoridades han sido debidamente informadas.
- Cuarto paso: Una vez informadas las autoridades es conveniente poner in situ carteles explicativos como se muestra en la figura 43, donde se detalla que es un cultivo industrial y la variedad. Esto evita en primer lugar llamadas a las autoridades para denunciar el cultivo y posibles hurtos.



Figura 43. Carteles informativos a pie de cultivo. (Fuente: Laverderevolución)

Según el punto 2 del reglamento nº 639/2014, descrito a continuación, este obliga a los productores a realizar análisis sobre el contenido de THC para verificar que el cultivo se encuentra en los límites legales.

“Los Estados miembros establecerán un sistema para determinar el contenido de Δ 9-tetrahidrocannabinol (en lo sucesivo, “contenido de THC”) en las variedades de cáñamo que les permita aplicar el método establecido en el anexo III.”

Por lo que en la etapa de cultivo se deberán realizar análisis por el método propuesto en el reglamento y se deberán conservar los registros de los resultados en los que se indicará el contenido de THC expresado en porcentaje con dos decimales, el procedimiento utilizado, el número de pruebas realizadas, la indicación del punto en el que se tomó la muestra y las medidas adoptadas a escala nacional.

Si la media de todas las muestras de una variedad dada sobrepasa el contenido de THC establecido en el artículo 32, apartado 6 del reglamento (UE) nº 1307/2013 que dice así.

“Las superficies dedicadas a la producción de cáñamo solo serán hectáreas admisibles si las variedades utilizadas tienen un contenido de tetrahidrocannabinol no superior al 0,2 %.

La semilla puede ser retirada del catálogo común de variedades de las especies agrícolas, pasando a no ser una semilla aprobada por la UE cosa que puede acarrear problemas legales.

7.1.1. Procedimiento para el análisis de THC

El objetivo de este procedimiento es la terminación del contenido de Δ 9-tetrahidrocannabinol en variedades de cáñamo (*Cannabis sativa* L.), hay dos procedimientos contemplados.

Procedimiento A: Controles de la producción de cáñamo a que se refieren el artículo 32, apartado 6 del reglamento (UE) nº1307/2013 y el artículo 30, letra g), del Reglamento de Ejecución (UE) n.o 809/2014 de la Comisión.

Procedimiento B: Se aplicará en los casos referidos en el artículo 36, apartado 6, del reglamento (UE) nº 809/2014. Esto es el caso siguiente: *“cuando un Estado miembro implante un sistema de autorización previa para el cultivo de cáñamo, el nivel mínimo de los controles sobre el terreno podrá reducirse al 20 % de las superficies declaradas...”*

7.1.1.1. Toma de muestras

Las muestras se tomarán durante el día, excluyendo las orillas del cultivo y siguiendo un patrón para garantizar la representatividad. Para cada procedimiento se actuará de la siguiente forma:

Procedimiento A: Se tomará una parte de 30cm con al menos una inflorescencia femenina de cada planta seleccionada, las cuales se marcarán. El muestreo se realizará en un plazo de veinte días después de inicio de la floración y diez días después del final de esta.

Procedimiento B: Se tomará el tercio superior de cada planta seleccionada. El muestreo se efectuará en el plazo de diez días a partir del final de la floración. En el caso de variedades dioicas, sólo se tomarán plantas femeninas.

7.1.1.2. Tamaño de la muestra

Procedimiento A: La muestra consistirá en partes de 50 plantas por campo

Procedimiento B: La muestra consistirá en partes de 200 plantas por campo.

Cada muestra, se depositará en una bolsa de tela o papel, evitando que sea aplastada y se enviará al laboratorio para su análisis. El estado miembro podrá establecer una segunda toma de muestra con fines de análisis contradictorio, la cual quedará en posesión del productor o del organismo encargado del análisis.

7.1.1.3. Secado y conservación

El secado comenzará lo antes posible en el plazo de 48 horas después de haber tomado las muestras, se realizará a temperatura por debajo de 70°C. Las muestras deberán secarse hasta tener una humedad comprendida entre 8-13%. Tras el secado, se conservarán sin aplastarlas en un lugar oscuro y a una temperatura inferior a 25°C

7.1.1.4. Determinación del contenido de THC

En primer lugar, se debe preparar la muestra de ensayo eliminando los tallos y las semillas de más de 2mm, luego la muestra se tritura hasta obtener un polvo semifino que pase por un tamiz de 1mm de malla, el polvo puede conservarse hasta diez semanas a una temperatura menor a 25°C y en un lugar oscuro y seco.

Luego se preparan los reactivos que según la normativa serán:

- Δ^9 -tetrahidrocannabinol, de pureza cromatográfica
- Escualano, de pureza cromatográfica, como patrón interno.

La solución de extracción serán 35mg de escualano por 100mL de hexano, una vez listo se pesan 100mg de la muestra de ensayo en polvo, se ponen en un tubo de centrifuga y se añaden 5mL de la solución de extracción con el patrón interno. Se introduce la muestra en un baño de ultrasonidos durante veinte minutos para luego centrifugarlo durante cinco minutos a 3000rpm, se retira la solución sobrenadante de THC y se inyecta en el cromatógrafo efectuando el análisis cuantitativo.

El equipo consta de un cromatógrafo de gases con detector de ionización de llama e inyector con/sin fraccionamiento y una columna que permita una buena separación de los cannabinoides por ejemplo, una columna capilar de vidrio de 25cm de longitud y 0,22mm de diámetro, impregnada con una fase apolar de fenil-metil-siloxano al 5%.

La calibración deberá ser de tres puntos en el procedimiento A y de cinco puntos en el procedimiento B, con inclusión de los puntos de 0.04 y 0.5 mg/ml THC en la solución de extracción. El volumen inyectado será de 1 μ L. Los resultados se expresarán con dos cifras decimales en gramos de THC por 100 gramos de muestra analítica seca. Se aplicará una tolerancia de 0.03g/100g.

7.1.2. Normas para la solicitud y concesión de ayudas al cultivo del cáñamo.

En el Real Decreto 1729/1999, de 12 de noviembre, por el que se establecen las normas para la solicitud y concesión de las ayudas al lino textil y al cáñamo, tiene por objeto el establecimiento de las normas para la concesión de ayudas a estos cultivos a partir de la campaña de comercialización 1999/2000. A continuación, se hará un resumen sobre los requisitos para la adjudicación de la ayuda.

1. Realizar una declaración de superficie sembrada y una declaración de cultivo
2. Acompañar a esta primera con una copia de los contratos y/o de los compromisos de transformación al órgano competente de la comunidad autónoma a más tardar el día final de campaña y, en cualquier caso, con anterioridad al pago de la ayuda.
3. La superficie, debe haber sido totalmente sembrada y cosechada, para ello se deben realizar las operaciones siguientes:
 - a) Efectuar la recolección después de la formación de semillas
 - b) Poner fin al ciclo vegetativo de la planta, y
 - c) Utilizar el tallo, en su caso, desprovisto de las semillas

Se considerará que ha concluido la formación de las semillas contemplada en el apartado a), si el número de semillas de cáñamo que han alcanzado su forma y volumen definitivos es superior al 50% de la producción total de semillas de cáñamo.

En el caso de recolección por siega, la barra guañadora deberá encontrarse como máximo a 20 centímetros del suelo en el cáñamo, manteniendo las superficies segadas en condiciones que permitan la comprobación de la altura de corte durante los 20 días siguientes a la fecha de presentación de la solicitud de ayuda.

4. El rendimiento de varilla sin desgranar debe ser, al menos igual a 1,5 toneladas/hectárea.

El rendimiento medio considerado será igual a la cantidad total producida de varilla sin desgranar expresada en toneladas, con un contenido máximo en humedad e impurezas del 5%, dividida por la superficie expresada en hectáreas.

7.2. Normativa y legislación del aceite de CBD

Para determinar la situación legal del CBD en España, debemos acudir a la normativa internacional sobre fiscalización de estupefacientes. Esto se debe a que el estado español carece de definiciones autónomas, dado que ni la ley de estupefacientes 17/1967, ni el código penal, ni la Ley de Seguridad Ciudadana explican si se encuentra fiscalizado.

En primer lugar, debemos entender que significa el concepto de fiscalizado, según la RAE, fiscalizar, es sujetar a la inspección fiscal cierta cosa, entendiendo como inspección fiscal, las actuaciones realizadas por los Inspectores de Hacienda Pública o agencia tributaria.

Actualmente, vienen fiscalizadas de manera expresa las sumidades floridas, los extractos y las tinturas de la planta y el THC. No aparece en ningún caso fiscalizado el CBD en sí mismo.

La ausencia de la fiscalización expresa del CBD, genera dudas de interpretación ya que no consta en las listas que fiscalizan estupefacientes y que inspiran la legislación sobre drogas.

Ahora basándose en la siguiente información:

- Consta una lista de semillas autorizadas para producir cáñamo industrial como establecen los Reglamentos CE 73/09, 1307/2013, 809/2014 y 2017/1155.
- El Cannabis Sativa está reconocido como producto agrícola, tal y como se establece en el capítulo 57 del anexo I del Tratado sobre el funcionamiento de la Unión Europea
- Este tipo de cultivo está reconocido en España por el Real Decreto 1729/1999 del que se ha hablado anteriormente por el que se establecen las normas para la solicitud de ayudas a este cultivo.
- El CBD no está incluido en las listas de fiscalización de estupefacientes y, por tanto, el CBD no es un estupefaciente.
- La OMS ha manifestado que el CBD no cumple con los criterios para considerarlo una sustancia que cause daño a la salud, al contrario, ha reconocido un valor terapéutico sin contradicciones, debido a que no genera dependencia y carece de efectos psicoactivos y tóxicos.

Se puede afirmar, que tanto el cultivo como la obtención del CBD por medios naturales legales, es decir no sintéticos y de acuerdo con la normativa explicada anteriormente, así como su empleo en la elaboración de productos es completamente lícito.

Ahora bien, en España el CBD no se ha registrado como un complemento alimenticio, es decir, no consta en la lista de suplementos alimenticios autorizados de la Agencia Española de Medicamentos y Productos Sanitarios (AEMPS) la cual consta en el Real decreto 130/2018 cuya disposición final primera con relación a las restricciones de comercialización dice así:

“De acuerdo con lo dispuesto en el Tratado de Funcionamiento de la Unión Europea, se seguirán aplicando las restricciones nacionales o prohibiciones vigentes en materia de complementos alimenticios que contengan nutrientes no incluidos en la lista del anexo I o en las formas no incluidas en el anexo II del Reglamento (CE) n.º 1170/2009, de la Comisión, de 30 de noviembre de 2009.”

Con esto, las conclusiones que se pueden extraer de este apartado es que el CBD no es ilegal, pero no puede venderse para el consumo humano, la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) con su agencia correspondiente en España AECOSAN (Agencia para Asuntos

del Consumidor, Seguridad Alimentaria y Nutrición) ordenó a finales de el 2018 intervenciones de productos con CBD destinados a uso alimenticio. AECOSAN publicó una nota informativa sobre el uso de cannabinoides como alimento el 25 de marzo de 2019 en la que dice que los alimentos derivados del cáñamo autorizados para ser comercializados por la Unión Europea se limitan exclusivamente a los provenientes de las semillas del cáñamo como aceite, proteína de cáñamo, harina de cáñamo y siempre y cuando provengan de variedades de cáñamo autorizadas.

Hace mención directa al CBD el cual considera nuevo alimento, debido a que no se ha podido demostrar historial de consumo significativo ni seguro en la UE por lo que cae bajo el ámbito de aplicación del Reglamento (UE) 2015/2283 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de noviembre de 2015, relativo a los nuevos alimentos.

Además AECOSAN en su comunicado, insta a las empresas que quieren comercializar este producto en el ámbito alimentario, a presentar la solicitud de nueva autorización de un nuevo alimento a la Comisión Europea, en cuya solicitud dice que si el nuevo alimento puede tener un efecto sobre la salud humana, la Comisión solicitará a la EFSA que lleve a cabo una evaluación de riesgos y adoptará su dictamen en un plazo de 9 meses a partir de la fecha de recepción de una solicitud válida de la Comisión.

Por lo que hasta que el CBD esté en la lista de suplementos alimenticios autorizados de la AEMPS, es ilegal venderlo para consumo humano y, por lo tanto, su uso está limitado a uso externo hasta que se regule. Por ello, en todos los productos que contienen CBD es necesario indicar que es para uso tópico como vemos en la figura 44.



Figura 44. Bálsamo corporal a base de CBD (Fuente: Amazon)

También algunas empresas optan por no mencionar el CBD directamente, como se muestra en la figura 45 y decir que se trata de aceite de cáñamo de espectro completo, esto conlleva el inconveniente que no es posible saber el porcentaje de CBD exacto que contiene el producto.



Naturally Essential Extracto de cáñamo en aceite de cáñamo (espectro completo verdadero de toda la planta) – cuentagotas
10 ml – 300 mg
Marca: Naturally Essential
★★★★★ 1 valoración

Figura 45. Producto de aceite de cáñamo con denominación de espectro completo. (Fuente: Amazon)

7.3. Legislación sobre sistemas a presión

En la instalación, se trabaja a presión, por lo que en este apartado se hace referencia al reglamento de equipos a presión y sus instrucciones técnicas complementarias.

El reglamento de Equipos a presión vigente fue aprobado por el RD 2060/2008 por el que se rige, la prescripción para la instalación, puesta en servicio, inspecciones periódicas, reparaciones y modificaciones de los equipos a presión con presión máxima admisible superior a 0,5 bar. Como equipos a presión están también incluidos los conjuntos de equipos, tuberías, los recipientes a presión simples y los recipientes a presión transportables.

También se aprueban las instrucciones técnicas complementarias que son documentos que aclaran o complementan las reglamentaciones técnicas vigentes en materia de prevención y seguridad, a continuación, se nombrarán algunas que afectan directamente a los elementos de la instalación.

ITC EP-1: Calderas, se aplica a la instalación, reparación e inspecciones periódicas de calderas y sus elementos asociados (economizadores, sobre calentadores, etc.)

ITC EP-6: Recipientes a presión transportables, se aplica a las condiciones de utilización y a los centros de recarga de los recipientes a presión transportables para usos industriales, alimentarios y medicinales.

Para el caso del CO₂ alimentario, además de lo indicado anteriormente deberán cumplirse los siguientes requisitos.

- a) No se podrán recargar botellas con gas licuado residual sin venteo previo del mismo
- b) En botellas equipadas con válvula de presión residual con dispositivo antirretorno (VPR) se deberá comprobar el buen funcionamiento de la VPR antes de proceder a la recarga.
- c) En botellas sin VPR se deberá asegurar que los recipientes estén libres de contaminación interior mediante controles de presión residuales, purgados o volteos de la botella con la válvula abierta. Si se detectase humedad o indicio de contaminantes, se desmontará la válvula de la botella, se realizará una inspección visual interna y una posterior limpieza mediante granallado, chorreado o limpieza química.

ITC MIE AP-9: Se incluyen en el campo de aplicación de esta ITC los sistemas frigoríficos cuyo volumen bruto interior sea superior a 14 decímetros cúbicos y cuya presión de trabajo sea superior a un bar efectivo.

ITC MIE-AP13: Abarca los intercambiadores de calor de placas (ICP), quedando exceptuados de los preceptos aquellos cuyo potencial de riesgo sea igual o inferior a 100.

La directiva 2014/68/UE del parlamento europeo y del consejo, relativa a la armonización de las legislaciones de los estados miembros sobre la comercialización de equipos a presión también ha sido consultada.

7.4. Legislación sobre medio ambiente

La legislación sobre medio ambiente es necesaria tenerla en cuenta tanto en el proceso de diseño como en las operaciones diarias en la instalación

Para el tema de agua se debe acudir a el RD legislativo 7/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido de la ley de suelo y rehabilitación urbana, la cual tiene como objetivo regular la igualdad en el ejercicio de los derechos y en el cumplimiento de los deberes constitucionales relacionados con el suelo, así como, un desarrollo sostenible, competitivo y eficiente del medio urbano.

También la ley 5/2002, de 3 de junio sobre vertidos de aguas residuales industriales a los sistemas públicos de saneamiento.

Con el objetivo de eliminar progresivamente las sustancias que agotan la capa de ozono (SAO), la Unión Europea publicó el Reglamento (CE) nº 1005/2009 en el que se prohíbe o regula el uso de productos con la denominación SAO para evitar la degradación de la capa de ozono.

8. CONCLUSIONES

Para concluir el trabajo, se puede comprobar que se han cumplido los objetivos planteados al inicio de este, al ser un trabajo bibliográfico se ha hecho una búsqueda de información exhaustiva pese a las limitaciones encontradas debido a la novedad del tema tratado y a la opacidad que existe actualmente con las investigaciones de esta índole.

A pesar de esto, se ha diseñado un proceso eficiente y moderno para la extracción de CBD el cual podría ser modelizado a pequeña escala experimental para comprobar su viabilidad a gran escala.

En cuanto a la extracción con CO₂ se ha demostrado con hechos experimentales que se trata de un proceso más limpio, seguro y rentable que las extracciones convencionales, aunque se necesita una gran inversión inicial, el coste a largo plazo es menor, además de beneficiar al medioambiente.

También hay que tener en cuenta la rentabilidad de este proyecto, las flores de cáñamo secas según el sindicato agrario COAG, tienen un valor de 2500€/Kg, y por supuesto, no se puede obviar el alto valor añadido del producto final, el cual según la empresa Green Brothers, especializada en la comercialización de este tipo de productos, el kilogramo del aceite de CBD con un porcentaje en peso entre 91-95% de este cannabinoide, puede llegar a alcanzar los 6900€.

Por estas razones, se considera que se ha propuesto una alternativa ecológica para paliar la precariedad en el sector agrícola, creando un sistema de rotación viable tanto medioambiental como económicamente que sustituye a productos como la veza la cual cotizó este año a 0.15€/kg en la lonja agropecuaria de León.

Actualmente, la maquinaria agrícola especializada en el cáñamo no está lo suficientemente desarrollada en Europa, lo que dificulta algunas tareas de cultivo, también hay que tener en cuenta que el cáñamo es actualmente un cultivo marginal, si se promoviese su cultivo, se avanzaría en el campo de la investigación sobre esta maquinaria, lo que facilitaría su laboreo.

Se han estudiado diversas soluciones para la valorización de los residuos, ya que la principal desventaja del sistema productivo planteado es la gran cantidad de residuos ecológicos generados, como puede ser la biomasa y las semillas, las cuales no son útiles en el diseño de instalación planteado. Por ello, se ha llevado a cabo un estudio para el tratamiento de ambos residuos, para la biomasa se ha propuesto un codigestor anaerobio donde se introduciría la biomasa junto con lodos de depuradora para generar biogás. Para las semillas de cáñamo se ha propuesto la transesterificación para la producción de biodiesel, ambos productos de la valorización se consideran energías poco contaminantes cumpliendo así con el objetivo número siete de los objetivos para el desarrollo sostenible adoptados por los estados miembros de la Unión Europea. Desafortunadamente el alcance de este proyecto no ha permitido profundizar más en el tema, pero se ha creído imprescindible al menos plantear este tipo de soluciones.

En cuanto a la parte de legislación, se ha arrojado luz tanto sobre el cultivo como sobre el tratamiento y comercialización de los productos derivados del cáñamo, los cuales en un futuro cercano serán regulados correctamente abriendo de esta manera el mercado como ha pasado en otros países como Canadá.

9. BIBLIOGRAFÍA

Asegrain. (2020, Septiembre 30). *Resumen informe trimestral Grain Stocks*. Asegrain. Obtenido de:

<https://asegrain.com/2020/09/30/resumen-informe-trimestral-grain-stocks/>

Fecha de consulta: 10/20

Carlos V. (n.d.). *Molturación o Molienda*. Comarca de la Vera. Obtenido de:

<http://www.comarcadelavera.com/pimenton/molturacion-o-molienda>

Fecha de consulta: 11/20

D.Civantos. (n.d.). *¿Cuáles son los métodos más comunes para extraer CBD?* Dinafem.org. Obtenido de:

<https://www.dinafem.org/es/blog/metodos-comunes-extraccion-cbd/>

Fecha de consulta: 11/20

Díaz, A. (2009). *Parámetros requeridos en el diseño de separadores para manejar mezclas gas líquido*. Obtenido de:

<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/16078/1/PAR%C3%81METROS%20REQUERIDOS%20EN%20EL%20DISE%C3%91O%20DE%20SEPARADORES%20PARA%20MANEJAR%20MEZCLAS%20GAS-L%C3%8DQUIDO.pdf>

Fecha de consulta: 10/20

Gorchs Altarriba, G. (2006). *VIAVILITAT TÈCNICA I ECONÒMICA DEL CÀNEM INDUSTRIAL ALS SECANS FRESCALS I SEMIFRESCALS DE CATALUNYA*. UPC. Obtenido de:

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/744/canem.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Fecha de consulta: 10/20

Growbarato.net. (n.d.). *Futura 75*. Semillas de cáñamo Futura 75. Obtenido de: <https://www.growbarato.net/semillas-de-canamo/4570-futura-75.html>

Fecha de consulta: 09/20

Historia Cáñamo. (n.d.). Historia del cáñamo: todo lo que debes saber sobre el legado del cáñamo. Obtenido de:

<https://www.royalqueenseeds.es/content/200-historia-del-canamo-todo-lo-que-debes-saber-sobre-el-legado-del-canamo>.

Fecha de consulta: 09/20

LaMota. (n.d.). *¿Cuál es la temperatura y humedad ideal para el cultivo de marihuana en interior?* LaMota. Obtenido de:

<https://www.lamota.org/es/blog/temperatura-humedad-ideales-cultivo-marihuana-interior/#:~:text=La%20temperatura%20ideal%20para%20una,la%20potencia%20de%20los%20cogollos.>

Fecha de consulta: 09/20

López Bellido, L. (2002). *Cultivos industriales*. Mundi-Prensa. Obtenido de:

<https://www.cuspide.com/9788484760757/Cultivos+Industriales/>

Fecha de consulta: 10/20

LSMC. (2019, 08 17). *Cáñamo y la fitorremediación en Chernobyl*. Sagradamariaclub. Obtenido de:

<http://www.sagradamariaclub.org/estudios-cientificos/canamo-fitorremediacion-chernobyl/#:~:text=En%20una%20primera%20prueba%20realizada,los%20almacena%20en%20sus%20tejidos.>

Fecha de consulta: 10/20

Ministerio de agricultura, pesca y alimentación. (s.f.). *Ministerio de agricultura, pesca y alimentación*. Obtenido de:

<https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/informacion/plataforma-de-conocimiento-para-el-medio-rural-y-pesquero/observatorio-de-tecnologias-probadas/material-de-riego/riego-gravedad.aspx>

Fecha de consulta:11/20

Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente. (n.d.). *Cereales de invierno*. Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente. Obtenido de:

https://www.fega.es/sites/default/files/imported/PwfGcp/imagenes/es/Fega_Manual_CHinvierno.pdf

Fecha de consulta: 11/20

Nuteco. (2019, abril 1). *EL TRIGO EN ESPAÑA: EL SEGUNDO CULTIVO CON MÁS REPRESENTACIÓN Y MÁS VALORADO*. Agraria San Antón. Obtenido de:

<https://www.agrariasananton.es/trigo-en-espana-segundo-cultivo-con-mas-representacion/#:~:text=El%20trigo%20es%20el%20segundo,y%20finalmente%20Arag%C3%B3n%20y%20Extremadura.>

Fecha de consulta:11/20

ONU. (n.d.). Resoluciones aprobadas por la conferencia de las naciones unidas para la aprobación de una convención única sobre estupefacientes. In *Convención única de 1961 sobre estupefacientes*. Obtenido de:

<https://www.un.org/es/sections/documents/general-assembly-resolutions/>

Fecha de Consulta: 11/20

Perez, T. (2015, Noviembre 13). *Beneficios y ventajas de la rotación de cultivos*. Borau. Obtenido de:

<http://borauhermanos.com/beneficios-y-ventajas-de-la-rotacion-de-cultivos/#:~:text=Beneficios%20de%20la%20rotaci%C3%B3n%20de,la%20erosi%C3%B3n%20h%C3%ADdrica%20y%20e%C3%B3lica.>

Fecha de consulta: 10/20

Pimecsa. (n.d.). *MOLINO DE MARTILLOS MTS*. Pimecsa. Obtenido de:

https://www.pimecsa.com/es/productos/solidos/molino-de-martillos?gclid=CjwKCAiAv4n9BRA9EiwA30WND_JQ8EYQ7DTwx1ZxlgUghUDlwEvhUiSmbULNlnvHpogM7gmaheEo2hoCancQAvD_BwE

Fecha de consulta: 10/20

Redacción. (n.d.). *MONOCULTIVO*. Flores. Obtenido de:

<https://www.flores.ninja/monocultivo/#:~:text=Desventajas%20del%20monocultivo,a%20elementos%20pat%C3%B3genos%20o%20nocivos.&text=En%20los%20monocultivos%2C%20el%20suelo,del%20paisaje%20en%20zonas%20tur%C3%ADsticas.>

Fecha de consulta: 10/20

Robinson, R. (1999). *El gran libro del cannabis: Guía completa de los usos medicinales, comerciales y ambientales de la planta más extraordinaria del mundo*. Editorial Inner Traditions /Bear & Company. .

Fecha de consulta: 10/20

Roshental, E. (n.d.). *Marijuana Grower's Handbook*. Oaksterdam University.

Fecha de consulta: 11/20

Solorzano, R. (2016, junio 5). *Principios Ingenieriles Básicos - Bombas Hidráulicas*. Hydraulics & pneumatics. Obtenido de:

<https://www.hydraulicspneumatics.com/hp-en-espanol/article/21886594/principios-ingenieriles-bsicos-bombas-hidrulicas>

Fecha de consulta: 11/20

Wallas, & Stanley. (1988). *Chemical Process Equipment: Selection and Design*. Butterworth-Heinemann.

Fecha de consulta: 11/20

Zambeza Seeds. (2016, Enero 13). *DIFERENCIAS ENTRE EL CANNABIS SATIVA, INDICA Y RUDERALIS*. Zambeza Seeds. Obtenido de:

<https://www.zambeza.es/blog-diferencias-entre-el-cannabsi-sativa-indica-y-ruderalis-n13>

Fecha de consulta: 11/20

10. ANEXOS

A continuación se anexarán algunos artículos científicos de los que se ha extraído información sobre todo para determinar las variables del proceso.

GENERALIDADES

FLUIDOS SUPERCRÍTICOS

Un fluido supercrítico (FS) se define como una sustancia que está por encima de sus valores críticos de temperatura y presión; condiciones bajo las cuales no se condensa (al disminuir la temperatura isobáricamente o al aumentar la presión isotérmicamente) ni se evapora (al aumentar la temperatura isobáricamente o al disminuir la presión isotérmicamente). Las propiedades del FS son intermedias entre las del fluido en fase líquida y en fase gaseosa, combinando un elevado poder de solvatación con una elevada difusividad. Además, presenta las ventajas de utilizar sustancias no tóxicas, en reemplazo de solventes que presentan impactos importantes sobre la salud humana o el ambiente.

PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS FLUIDOS SUPERCRÍTICOS

La viscosidad de los fluidos supercríticos (FS) es de 5 a 30 veces inferior a la de los líquidos [1], lo que implica que los analitos difundan más fácilmente en FS que en fases líquidas. Además, como los FS poseen una tensión superficial prácticamente nula, su penetrabilidad en los materiales porosos es mucho más alta. La consecuencia más importante derivada de estas propiedades es que los FS permiten realizar extracciones más rápidas y eficientes que los disolventes convencionales. En la tabla 1 se observa una comparación entre propiedades físicas y de transporte másico de gases, líquidos y FS.

PROPIEDAD	GAS	FS	LÍQUIDO
Densidad (g/ml)	0,001	0,1 - 1	1
Viscosidad (cP)	0,01	0,1-0,01	1
Difusividad (cm ² /s)	0,1	0,001 - 0,0001	< 0,00001

Tabla 1. Propiedades físicas de gases, líquidos y FS. (Fuente. D.S. Murray, & P.J Hansen, *J. Chem. Education*. 1995, pp. 72, 851)

Los gases tienen la más alta difusividad y por lo tanto, la más alta tasa de transferencia de masa. Sin embargo, al tener la más baja densidad, se reduce su poder de solvatación debido a la dependencia directa que

existe entre estas dos propiedades. Por su parte, los líquidos poseen alto poder solvatante y limitaciones en la transferencia de masa.

ANTECEDENTE

La primera extracción exitosa de cafeína de granos de café fue lograda por el químico alemán Runge en 1820. Desde ese momento se logró identificar que los constituyentes del café eran posibles causantes del insomnio y se dio inicio a la historia del café descafeinado. Sin embargo, los avances técnicos no llegaron sino hasta fin de siglo, cuando Ludwig Roselius decidió hacer pre-tratamiento sobre los granos empleando vapor antes de someterlos a un solvente. El descubrimiento de Roselius hizo posible la primera producción de café descafeinado a escala industrial al fundar HAG en Bremen (Alemania) en 1912. Esta misma empresa fue la que décadas más tarde recibió la licencia de la patente del proceso de descafeinación usando dióxido de carbono (1970's), el cual fue descubierto y desarrollado por el señor Kurt Zosel. Operaciones similares se iniciaron en Estados Unidos a través de la empresa General Foods, la cual también tomó la licencia de la patente.

En la actualidad se han realizado numerosos estudios sobre solubilidad de cafeína en FS y la extracción de ésta con FS desde diferentes fuentes vegetales [2, 6] y sobre múltiples aplicaciones de los FS [7, 10].

METODOLOGÍA

DISEÑO EXPERIMENTAL

Para la extracción con CO₂ supercrítico se estableció una variable dependiente (rendimiento) y tres independientes (presión, temperatura y tiempo de extracción). La cantidad de CO₂ se mantuvo constante para cada experimento en 47 ± 0,5 g.

Para llevar a cabo la extracción de cafeína con CO₂ supercrítico se formuló un diseño factorial completo 2³ con dos niveles, uno alto y uno bajo, con tres factores (presión, temperatura y tiempo de extracción)

dando un total de 8 experimentos cada uno con un duplicado, resultando un total de 16 experimentos (Tabla 2).

FACTOR	NIVEL
Presión	200 bar (alto)
	110 bar (bajo)
Temperatura	80°C (alto)
	60°C (bajo)
Tiempo	120 min (alto)
	60 min (bajo)

Tabla 2. Factores y niveles de experimentación.

A partir de los resultados obtenidos con el diseño anterior, se seleccionaron los experimentos con el mayor rendimiento y se hizo una evaluación individual empleando acetato de etilo como co-solvente, con el fin de determinar su influencia sobre el rendimiento frente a las pruebas realizadas inicialmente. En esta fase se llevaron a cabo 4 experimentos, cada uno con un duplicado, para un total de 8 experimentos más.

PROCEDIMIENTOS

Extracción con CO₂ Supercrítico

Para obtener los extractos con CO₂ supercrítico se empleó un equipo de extracción a escala laboratorio diseñado por el Ingeniero Químico Ignacio Rodríguez, éste fue construido en el taller de mecánica fina del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia.

Como se aprecia en la Figura 1 el equipo consta de: un recipiente de extracción de acero inoxidable 316 (a), de 200 mL, aprox., el cual se recubre con una chaqueta de calentamiento eléctrica para alcanzar la temperatura de extracción, un recipiente de separación del mismo material que el extractor y de capacidad similar (b), en el que se presenta la precipitación de la cafeína, y un regulador de presión alta-alta con dos manómetros incorporados que se encuentra entre los recipientes a y b, éste permite determinar la caída de presión entre el extractor y el separador. Dentro del montaje del equipo de extracción se incluyen dos cilindros de gas, uno que contiene CO₂ líquido (solvente de extracción) y otro con N₂ (el cual es emplea-

do para presurizar el sistema hasta las condiciones en las que debe darse la extracción). Ninguno de los dos gases es recirculado en el proceso.

Para realizar cada una de las extracciones se procedió de la siguiente manera: una vez cargada la muestra en el recipiente extractor, éste fue saturado con CO₂ líquido; luego de alcanzar la presión y la temperatura de extracción, dichas condiciones eran mantenidas durante el tiempo de extracción planteado; posteriormente se procedía a despresurizar el recipiente extractor, permitiendo el flujo de extracto hacia el recipiente de separación. Por último, dicho extracto era sometido a análisis de espectroscopia infrarroja y a análisis cuantitativo. Para los ensayos con cosolvente, éste era adicionado junto con la muestra al cargar el recipiente extractor.

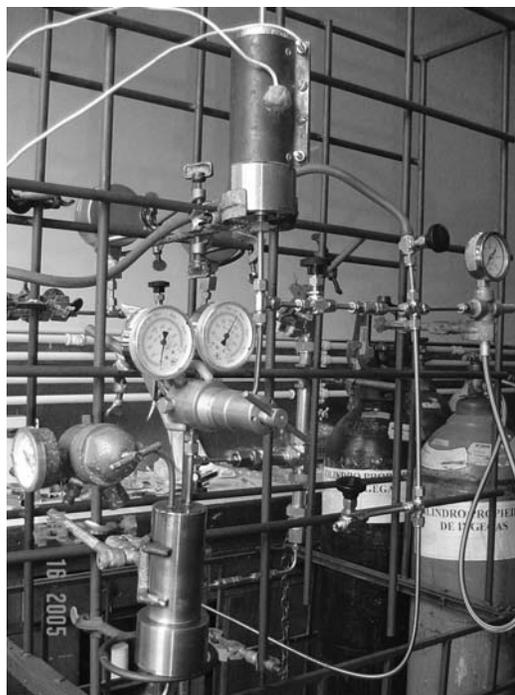


Figura 1. Equipo de extracción con fluidos supercríticos.

Fuente: Laboratorio de Altas Presiones, Departamento de Química-Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia (Bogotá, Colombia).

Extracción Soxhlet con acetato de etilo

Para obtener el extracto de cafeína con acetato de etilo como solvente, se empleó un equipo de extracción Soxhlet clásico, éste consta del recipiente contenedor de solvente (en el cual, al final de la extracción, queda el extracto), la cámara de extracción (en la que se deposita la muestra), y un condensador (para condensar sobre la muestra los vapores de solvente que provienen del contenedor de solvente), ver figura 2.

En esta técnica, los granos de café se colocan en un cartucho de material poroso situado en la cámara de extracción del equipo Soxhlet. Luego se calienta el acetato de etilo situado en el recipiente contenedor de solvente hasta ebullición, el vapor de solvente asciende hasta el condensador, lo cual permite que el solvente se deposite gota a gota sobre la muestra, con ello se realiza la extracción de los analitos. Cuando el nivel de disolvente condensado en la cámara de extracción alcanza la parte superior, éste reboza y desciende hacia el recipiente contenedor de solvente por el sistema de sifón (parte lateral de la cámara de extracción), retornando junto con los analitos al recipiente contenedor de solvente. Este proceso se repite múltiples veces hasta que se completa la extracción de los analitos de la muestra y se concentran en el disolvente, lo cual constituye el extracto final.

Para dicha extracción se empleó 100 mL de solvente (acetato de etilo), la extracción se realizó a presión atmosférica (0,98 atm) durante 17 h.

ANÁLISIS DE EXTRACTOS DE CAFEÍNA

Caracterización de cafeína mediante espectroscopia de infrarrojo (IR)

Los extractos de mayor rendimiento obtenidos con CO₂ y el obtenido por Soxhlet fueron sometidos a análisis de espectroscopia infrarroja (IR), con el propósito de determinar las bandas características de los grupos funcionales de los componentes de los extractos obtenidos y de comparar dichos espectros con el de cafeína patrón.

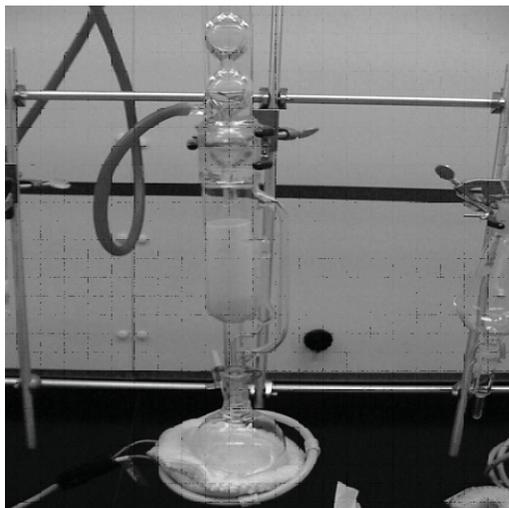


Figura 2. Equipo de extracción Soxhlet.

Fuente: Laboratorio de Altas Presiones, Departamento de Química-Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia (Bogotá, Colombia).

Curva patrón de cafeína mediante espectrofotometría ultravioleta (UV)

Para cuantificar la cafeína contenida en cada uno de los extractos obtenidos se realizó una curva patrón con ocho valores distintos de concentración de cafeína (1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 10,0 partes por millón, ppm), las lecturas de absorbancia se efectuaron a una longitud de onda de 273 nm, empleando un Espectrofotómetro UV. Frente a esta curva se compararon cada uno de los extractos obtenidos, tanto por el extracción con CO₂ supercrítico como por Soxhlet con acetato de etilo; mediante medición de las respectivas absorbancias fue posible cuantificar la cantidad de cafeína extraída y, por tanto, los rendimientos de la extracción.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ANÁLISIS CUALITATIVO DE LOS EXTRACTOS

El análisis de los espectros IR mostró una alta concordancia entre el espectro de los extractos obtenidos por medio de la extracción con CO₂ supercrítico y el espectro de la cafeína patrón, lo cual nos permite

inferir que dichos extractos contienen cafeína en un alto grado de pureza. En contraste, el espectro del extracto obtenido por extracción Soxhlet presentó diferencias significativas con respecto al de cafeína patrón, se deduce que éste contiene cafeína en un bajo grado de pureza. De tal forma, se demuestra una mayor especificidad en la extracción con CO₂ supercrítico para la obtención de extractos enriquecidos en cafeína.

EXTRACCIÓN CON CO₂ SUPERCRÍTICO

La totalidad de extractos obtenidos con CO₂ supercrítico presentaron un rendimiento superior a 1,3 g de cafeína por kg de café. Los ensayos tres, cinco, seis y siete alcanzaron los mayores valores en cafeína extraída (1,5 g/kg de café, aprox.). El mayor rendimiento en la extracción se alcanzó con las condiciones más fuertes de extracción (1,60 g cafeína/kg de café, a 200 bar, 80 °C y 120 min), ver tabla 3. Comparando dicho contenido con el conocido para *Coffea arabica* (15 g cafeína/kg de café, aprox.) se observa un bajo rendimiento en la extracción de cafeína con CO₂ supercrítico.

Por otra parte, al realizar las extracciones con CO₂ como solvente y acetato de etilo como cosolvente (ensayos 3', 5', 6' y 7') se observó un menor rendimiento en la cantidad de cafeína extraída (inferior a 0,08 g/kg), ver tabla 3.

A continuación se realizará un análisis de la influencia de cada uno de los factores ensayados sobre el rendimiento en la extracción (teniendo en cuenta los efectos principales y la interacción entre los efectos). Para ello se empleó el software estadístico MINITAB14® el cual permite elaborar graficas de interacción así como analizar la varianza de los datos (ANOVA).

Efectos principales

Mediante la figura 3 se puede afirmar que los tres factores en estudio (Tiempo, Presión y Temperatura) tienen un efecto significativo sobre la extracción, ya que se analizó de manera independiente su efecto sobre la variable respuesta (Rendimiento). En cada cuadrante, la recta presenta un cambio significativo en la media del rendimiento para cada nivel. Sin embargo, Presión y Temperatura son factores que parecen tener un efecto más fuerte sobre la respuesta.

ENSAYO	PRESIÓN (BAR)	TEMPERATURA (°C)	TIEMPO DE EXTRACCIÓN (MIN)	A: MUESTRA B: DUPLICADO	RENDIMIENTO (G CAFEÍNA/KG CAFÉ)
1	110	60	60	A	1,326
				B	1,306
2	110	60	120	A	1,476
				B	1,485
3	110	80	120	A	1,492
				B	1,486
4	110	80	60	A	1,425
				B	1,414
5	200	80	120	A	1,610
				B	1,594
6	200	80	60	A	1,504
				B	1,490
7	200	60	120	A	1,531
				B	1,519
8	200	60	60	A	1,490
				B	1,513
3'	110	80	120	A	0,038
				B	0,041
5'	200	80	120	A	0,044
				B	0,040
6'	200	80	60	A	0,071
				B	0,077
7'	200	80	120	A	0,042
				B	0,038

Tabla 3. Rendimiento de cafeína en la extracción con CO₂ supercrítico.

Ensayos 1 a 8: con CO₂ como solvente. Ensayos 3', 5', 6' y 7': con CO₂ como solvente y acetato de etilo como cosolvente.

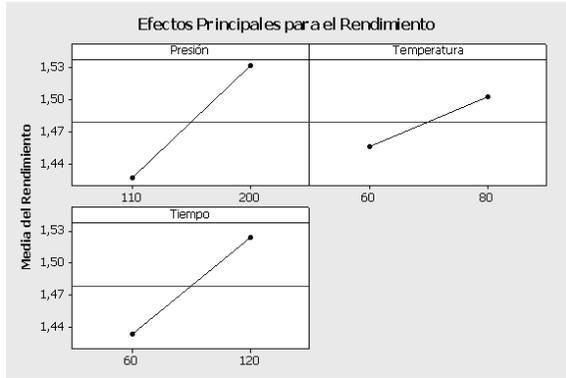


Figura 3. Efectos principales.

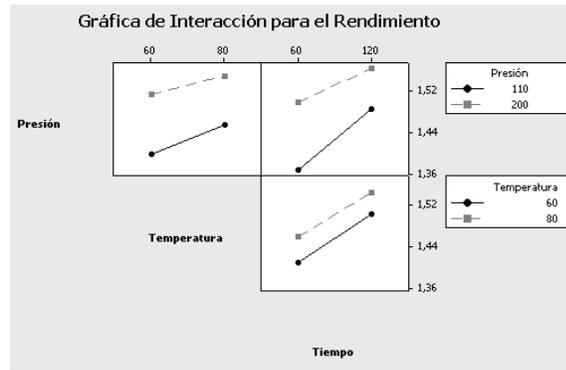


Figura 4. Interacciones entre Efectos.

Interacciones entre efectos

En la figura 4 se puede identificar de qué forma se encuentran interrelacionados los efectos. En el único cuadrante en el que se puede identificar interacción entre factores es en el que se relaciona Presión-Tiempo, dado que existe una diferencia apreciable en el valor de las pendientes de las rectas que se están comparando [11]. Por otra parte, en los cuadrantes que relacionan Temperatura-Presión y Temperatura-Tiempo, existe la misma variación de respuesta entre niveles para cada factor, dado que los valores de las pendientes de las rectas que se comparan son muy cercanos, por ende no existe una interacción importante entre los factores involucrados.

Análisis de ANOVA

De la tabla ANOVA se examinan la magnitud de los valores de (p) (*p-values*) para determinar cuán significativos son los datos y/o las interacciones entre éstos.

El modelo que muestra la tabla 4 contiene tres efectos principales: Presión, Temperatura y Tiempo, y los valores de (p) de cada uno de ellos están por debajo

del nivel alfa establecido ($\alpha = 0.05$), lo que indica que todos son significativos. De igual forma, la doble interacción presente en la tabla (Presión-Tiempo) resulta ser significativa al tener valores (p) de cero, lo que indica que el efecto del Tiempo depende de la Presión.

EXTRACCIÓN SOXHLET

En la tabla siguiente se relacionan los resultados obtenidos con la extracción Soxhlet.

	MUESTRA	DUPLICADO
Masa de café verde (g)	40,12	40,08
Masa de extracto (g)	13,96	13,49
Masa de cafeína (g)	0,14	0,14
Rendimiento (g cafeína / kg café)	3,53	3,45

Tabla 5. Resultados de la extracción Soxhlet.

Teniendo en cuenta que el extracto obtenido mediante extracción Soxhlet contenía cafeína en menor grado de pureza respecto a los extractos obtenidos con CO₂, resulta poco importante que con extracción Soxhlet se logre alcanzar un mayor rendimiento en peso de extracto.

TÉRMINO	EFEECTO	COEFICIENTE	P
Constante		1,47881	0,000
Presión	0,10512	0,05256	0,000
Temperatura	0,04613	0,02306	0,000
Tiempo	0,09063	0,04531	0,000
Presión - Tiempo	-0,02638	-0,01319	0,001
S = 0,0114766 R-Sq = 98,65% R-Sq (adj) = 97,97%			

Tabla 4. Análisis de Varianza para el Rendimiento

COSTOS DE OPERACIÓN	EXTRACCIÓN CON CO ₂	EXTRACCIÓN SOXHLET
Costo de solventes	CO ₂ (190 g) \$ 707 N ₂ (36 mL) \$ 32	Acetato de etilo (100 mL) \$ 6300
Costos energéticos	0,11 kW (80 oC) \$ 27	0,16 kW (110 oC) \$ 38
Costos totales	\$ 766	\$ 6338
Costos totales por g de cafeína obtenida	\$ 476	\$ 1795

Tabla 6. Estimación comparativa de costos.

RELACIÓN COSTO-RENDIMIENTO

Con base en las mejores condiciones encontradas para la extracción con CO₂ supercrítico y junto con las características de montaje y operación de la extracción Soxhlet, se hizo una evaluación económica simple para cada técnica, teniendo en cuenta los costos operativos más importantes involucrados en cada caso. La tabla 6 muestra de forma general dicha evaluación.

Esta simple evaluación económica muestra que la extracción Soxhlet presenta un mayor costo de operación por cada gramo de cafeína extraída, siendo el costo de los solventes el ítem que marca la diferencia y favorece la extracción con CO₂ supercrítico.

CONCLUSIONES

- El diseño y análisis de los experimentos muestran que las mejores condiciones de extracción de cafeína con CO₂ supercrítico se obtuvieron bajo los niveles experimentales de alta Presión (200 bar), alta Temperatura (80°C) y Tiempo de extracción largo (120 minutos).
- La presión y el tiempo de extracción son los efectos con mayor influencia sobre el rendimiento, siendo el efecto de la presión el que generó un valor más alto en la variable de respuesta.
- A pesar que la extracción Soxhlet proporcionó un mayor rendimiento en extracto que la extracción con CO₂ supercrítico, su especificidad resultó ser menor, poniendo en evidencia una ventaja de la extracción

con CO₂ supercrítico sobre la tecnología convencional de extracción.

- El costo de operación de la extracción con CO₂ supercrítico es mucho menor que el de la extracción Soxhlet; sin embargo, dadas las características de los equipos requeridos en la extracción con CO₂ supercrítico, la inversión inicial de capital para ésta es mayor. Por otra parte, el hecho que el grano de café verde no entre en contacto con solventes orgánicos, al extraer con CO₂, permite obtener un grano de café sin aroma residual del respectivo solvente.
- Antes de pretender llevar el proceso de extracción de cafeína con CO₂ supercrítico a una escala superior, es imprescindible desarrollar trabajos posteriores tendientes a incrementar el rendimiento durante la extracción.

1. DEFINICIÓN DE EXTRACTO SUPERCRÍTICO

La oleorresina de pimentón (ORP) es el extracto líquido graso de frutos del género *Capsicum* maduros y secos, con viscosidad media, colores rojizos y con aroma típico de pimentón según calidades, orígenes, genotipo de procedencia y método de extracción, y que contiene una mezcla compleja de más de 100 compuestos (Fernández-Trujillo, 2007a).

La extracción mediante fluidos supercríticos con CO₂ como disolvente (ESCO₂) es una tecnología utilizable para obtener extractos similares a la ORP clásica o sus fracciones (del Valle y Aguilera, 1999; del Valle *et al.*, 2003a, b; Mukhopadhyay, 2000; Rozzi y Singh, 2005) e incluso componentes de naturaleza lipídica o capsaicinoides individuales (Skerget *et al.*, 1998). El extracto se obtendría mediante el contacto de un fluido en condiciones supercríticas y del pimentón peletizado, o del pimientito seco triturado. Existen plantas para ORP o extractos de pimentón por ESCO₂ en India, E.E.U.U. y también en Europa (Alemania, España), aunque con producción muy limitada prácticamente bajo pedido.

La gran ventaja de la ESCO₂ es la práctica ausencia de residuos y la fácil recuperación del disol-

vente, así como los menores peligros y riesgos, y en ciertos casos ahorros de energía sustanciales respecto a extracción o destilación convencionales (del Valle y Aguilera, 1999). El posterior tratamiento para la eliminación de residuo de CO₂ consiste básicamente en una descompresión, e intercambio de calor. Con ello el CO₂ reduce su densidad y se vaporiza, separándose del soluto extraído. El CO₂ se recupera para su reciclado y, con aportación de CO₂ gas de reposición, se recicla mediante compresión hasta las presiones requeridas para la ESCO₂ (del Valle y Aguilera, 1999; Mukhopadhyay, 2000). Las temperaturas de la ESCO₂ pueden ser relativamente bajas o incluso inactivar las bacterias Gram positivas y negativas, no necesitando esterilización posterior. De esta manera el extracto puede quedar libre de contaminación microbiana (Díaz-Reinoso *et al.*, 2006).

La ESCO₂ tiene también inconvenientes. Por ejemplo, Daood *et al.* (2002), Illés *et al.* (1999) y Gnayfeed *et al.* (2001) han descrito las dificultades de extracción de los diésteres de las xantofilas en determinadas condiciones, así como el riesgo de isomerización de *trans* a *cis* de los carotenoides. Los tiempos de extracción de la ESCO₂ para la capacidad instalada son otro inconveniente desde el punto de vista económico (Rosa y Meireles, 2005). Aunque determinados tiempos

Tabla 1
Condiciones de extracción supercrítica con CO₂ utilizadas para diferentes especies de pimiento dulce y *Capsicum annuum* picante. ND indica no determinado y η_T el rendimiento total. El ratio se expresa en kg CO₂/kg materia prima.

Materia prima y características	Tiempo, Presión y Temperatura	Ratio y flujo CO ₂	Rendimientos (%) y otros	Referencia
Pimentón de 14% humedad	30 MPa/40 °C	ND	ND Descompresión a 4 MPa	Govindarajan (1986)
Pimentón de 10.8% humedad	10,3-34,5 MPa/ 50 °C 30 MPa/50 °C, 2h	ND 20:1 (kg · kg muestra ⁻¹)	ND $\eta_T = 13,5$	Krukonis (1994) Ehlers <i>et al.</i> (2006)
<i>C. annuum</i> SZ-178 Picante (400–600 μ m; 10–11% humedad)	40 MPa/55 °C	1-1,5 mL · min ⁻¹	$\eta_T = 7,95$	Gnayfeed <i>et al.</i> (2001)
Pimentón en semicontinuo	15 MPa/40 °C	51.4:1 kg/kg	$\eta_{\text{pigmentosT}} = 1,9$ $\eta_{\text{aromasT}} = 12,1$	Skerget <i>et al.</i> (1998)
Pimentón 165 μ m	15-40 MPa/40°C en semicontinuo	30:1 kg · kg muestra ⁻¹	$\eta_T = 13.0$	Skerget y Knez (2001)
	2 etapas 9 MPa/40 °C + 40 MPa/40 °C	35:1 kg/kg 36.1 L · h ⁻¹ 29,5 L · h ⁻¹ ρ CO ₂ ND	$\eta_T = 1 - 11$	Skerget y Knez (1997 y 2001);
<i>C. annuum</i> (capsaicinoides totales)	$\rho = 800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} / 55 \text{ °C}$ 15 min (estático) + 15 min (dinámico)	1 mL · min ⁻¹	η_T ND; $\eta_{\text{capsaicinT}} = 0.0011$	Peusch <i>et al.</i> (1997)
<i>C. annuum</i> ND μ m (capsaicinoides)	35 MPa y 50 °C, 3 h	ND	η_T ND; (var.) $\eta_{\text{capsaicinT}} \sim 0.07$	Vesper y Nitz (1997a)
Pimentón húngaro 200 μ m, 20% semillas	35 °C y 40 MPa	1-1,5 mLmin ⁻¹	$\eta_T = 7.4$; $\eta_{\text{capsaicinT}}$ ND	Illés <i>et al.</i> (1999)

sean mejores que la extracción por disolventes, sigue siendo un reto el mejorarlos y, sobre todo, que los rendimientos de ambos métodos sean comparables. Por ejemplo para capsainoides son ligeramente inferiores con ESCO₂ o existen problemas de extracción (Gnayfeed *et al.*, 2001; Peusch *et al.*, 1997a).

En trabajos anteriores revisamos el procesado de pimiento para pimentón y la extracción convencional de ORP con disolventes orgánicos (Fernández-Trujillo, 2007a, 2007b; Fernández-Trujillo y Escarabajal, 2006). El objetivo de este trabajo es revisar las condiciones de proceso y las innovaciones más recientes en la extracción de ORP o sus fracciones mediante CO₂ supercrítico, así como el análisis de algunos de sus peligros y puntos de control crítico.

2. EXTRACCIÓN MEDIANTE FLUIDOS SUPERCRÍTICOS DE PIMENTÓN

2.1. Pretratamiento de las muestras

Los pretratamientos del pimiento mejoran los rendimientos totales con ESCO₂ (Tabla 2). Por ejemplo, las muestras molidas a partir de laminados y luego peletizadas y acondicionadas a baja humedad tienen un rendimiento mayor que aquellas no molidas previamente (Del Valle *et al.*, 2003

b). Ello se debe a que la extracción de fracciones de interés aumenta con una mejor distribución y conectividad de los poros. La humedad del producto (entre el 7,2 y el 8%) tiene un menor efecto que el tipo de peletización (Uquiche *et al.*, 2005). Además, la reducción del tamaño de las partículas aumenta la transferencia de materia, pero disminuye la compactación del pelet, y ambos factores tienen efectos opuestos sobre el rendimiento volumétrico de la extracción (masa de soluto recuperado por unidad de tiempo y volumen del recipiente) (Uquiche *et al.*, 2005).

2.2. Elección de condiciones de presión y temperatura, densidad y consumo del CO₂

El CO₂ supercrítico habitualmente tiene una pureza del 99,995%. En las Tablas 1 y 2 señalamos las condiciones de temperatura y presión (T y P) en ESCO₂ con mejores resultados, según la fracción de interés, que oscilan entre 40 y 55 °C y 10,3 a 40 MPa. En general se obtienen mejores resultados mediante extracción en condiciones dinámicas frente a las estáticas. Se observa una leve falta de claridad en las recomendaciones sobre las mejores condiciones del proceso, tanto de la materia prima como en las experimentales, como por ejemplo en flujo de CO₂ o condiciones de descompresión.

Tabla 2
Condiciones de extracción supercrítica con CO₂
utilizadas para pimiento picante. ND indica no determinado y η_T el rendimiento total.

Materia prima y características	Tiempo, Presión y Temperatura	Flujo de CO ₂	Rendimientos y recuperación (%)	Referencia
Picante y finamente molido	6.5 h a 12 MPa/40 °C+ 32 MPa/ 40 °C	ND	$\eta_{\text{capsaicinT}} = 15.5$ y $\eta_{\text{carotT}} = 3$	Coenen y Hagen (1983)
Pimiento picante en polvo picante (400–600 μm , 10–11% de humedad)	40 MPa/55 °C	1-1,5 mL · min ⁻¹	$\eta_T = 11,5$ Recup. 89% capsaicin, 84% α ó β -tocof., 48% g-tocof.	Daood <i>et al.</i> (2002)
Jalapeño peletizado 280-3190 μm	4-4,5 h a 32 ó 36 MPa/40-45 °C	3-4 L min ⁻¹ (NPT), 5-10 min	$\eta_T = 14$ $\eta_{\text{capsaicinT}} = 0,04$ ó $\eta_{\text{capsaicinT}} = 0,012$	Del Valle <i>et al.</i> (2003 a, 2003 b); Uquiche <i>et al.</i> (2005)
<i>C. annuum</i> cv. Scotch Bonnet liofilizado	400 atm/50 °C 30 min + 600 atm/ 50 °C 90 min		$\eta_T = 16,4$ $\eta_{\text{capsaicinT}} = 3,8$	Yao <i>et al.</i> (1994)
Chili (var. Byedige) 360 μm	40 MPa/40 °C	0,49 kg CO ₂ · h ⁻¹	$\eta_T = 12,6$ 96% capsaic. 80% color	Perva-Uzunalic <i>et al.</i> (2004)
<i>C. frutescens</i>	$\rho_{\text{CO}_2} = 800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ / 55°C 15 min (estático + dinámico)	1 mL · min ⁻¹	$\eta_T = \text{ND}$ $\eta_{\text{capsaicinT}} = 0,076$	Peusch <i>et al.</i> (1997)
<i>C. frutescens</i> 230 μm	20–22 MPa/ 40 °C, 10 min	0.06–0.07 cm s ⁻¹	$\eta_T = 5.2$ $\eta_{\text{capsaicinT}} = 0.25$ $\eta_{\text{tocofT}} = 0.9$	Duarte <i>et al.</i> (2004)

La P y la T afectan a la solubilidad de la ORP en CO₂, aunque ello también depende de la materia prima. En general, la temperatura de 40 °C presenta una mayor selectividad en la extracción con CO₂ (Jarén-Galán *et al.*, 1999). Aunque la mayoría de los autores recomiendan 40 °C en vez de 55 °C (Tablas 1 y 2), Daood *et al.* (2002) obtuvieron un máximo de rendimiento de extracción (~11,5%) a 40 MPa y 55 °C.

Una mínima densidad del CO₂ es necesaria para extraer ORP picante (entre 600-1000 kg · m⁻³) (Daood *et al.*, 2002). Una mayor densidad también aumenta la economía de la ESCO₂ con independencia de la temperatura utilizada, porque al igual que con un aumento de P, aumenta la solubilidad del aceite en CO₂ (Daood *et al.*, 2002).

Para extracción total de carotenoides, Govindarajan (1986) ya citaban diferentes combinaciones T-P en ESCO₂ tanto con pimentón dulce como picante, existiendo discrepancias entre autores según la materia prima de partida y otras condiciones de proceso como la densidad y flujo de CO₂, condiciones dinámicas o estáticas, masa de materia prima de partida, ratio disolvente/materia prima, etc. (Tablas 1 y 2). Krukoniš *et al.* (1994) recomendaron 50°C y 10,3-34,5 MPa. Gnayfeed *et al.* (2001) concluyeron que la extracción de carotenoides y ácidos grasos depende en buena medida de la P utilizada. A P=40 MPa se logran extraer sólo el 56% de los pigmentos iniciales de la muestra, debido probablemente a degradación de los mismos al aumentar la P y la T. Por otra parte Daood *et al.* (2002) han descrito máximo rendimiento de extracción utilizando 40 MPa. Ehlers *et al.* (2006) considera como estándar de ESCO₂ para pimentón 50 °C y 30 MPa.

La P y T influye notablemente sobre los rendimientos de extracción. Jarén-Galán *et al.* (1999) triplicaron la extracción de carotenoides presentes en la ORP aumentando la presión de 13,9 a 41,34 MPa, mientras que Daood *et al.* (2005) incluso quintuplicaron esta proporción entre 10 y 40 MPa.

Daood *et al.* (2002) demostraron para ORP picante que para una misma temperatura y comparando presiones de 20, 30 y 40 MPa, a las P más altas se reducía la razón disolvente CO₂/materia prima (p/p) necesario para obtener un determinado rendimiento. Además, y especialmente a partir de una P de 30 MPa, la solubilidad de la ORP en CO₂ aumenta con el aumento de la T de extracción (Daood *et al.*, 2002), debido a las mejoras en las propiedades de transferencia de materia y la desorción de soluto de la matriz (Del Valle *et al.*, 2003 b).

Duarte *et al.* (2004) recomiendan para 10 min de extracción de ORP de *C. frutescens* L. 20-22 MPa a 40 °C y CO₂ de densidad de 844 kg · m⁻³ (rendimiento total del 90%), con un consumo de 90 g CO₂ · g⁻¹ pimiento molido (Tabla 2). Estos autores modelizaron el rendimiento en extracción de ORP y capsaicinoides mediante superficies de respuesta según P y velocidad superficial, concluyendo que el

óptimo de P es de 18,6 MPa cuando el tiempo de extracción aumentaba hasta 50 min.

Del Valle *et al.* (2003 b) han resumido los consumos medios de CO₂ por unidad de peso de pimentón para unas condiciones recomendadas de ESCO₂ como sigue: 130 kg · kg⁻¹ para aromas a 12 MPa y 40 °C, 50 kg · kg⁻¹ para la extracción por fraccionamiento de los pigmentos restantes a 32 MPa y 40 °C, 7 kg · kg⁻¹ para la extracción total a 40 MPa y 35 °C, y 5 kg · kg⁻¹ para la extracción total a 40 MPa y 55 °C.

2.3. ESCO₂ por pasos para fraccionar componentes

El fraccionamiento en ESCO₂ requiere diferentes etapas de extracción con un aumento de P hasta niveles constantes según el componente de interés. Skerget y Knez (1997) obtuvieron mejores calidades de ORP con ESCO₂ a 40 °C en dos pasos, extrayendo primero los componentes aromáticos a 9 MPa (extracto amarillo-naranja y pungente). Luego extraían los carotenoides rojos a 40 MPa, obteniendo un extracto de 80.000 a 190.000 unidades de color. En este trabajo y otro (Skerget *et al.*, 1998) concluyen que a 9 MPa la separación de β-caroteno y capsaicinoides es mayor que a presiones superiores, y que utilizando mayores presiones disminuye la selectividad del CO₂, aumentando el rendimiento de la extracción.

Skerget *et al.* (1998) fijaron 15 MPa como P óptima a 40 °C para extraer los aromas volátiles mediante ESCO₂, con una ORP de 180.000 unidades de color (Tabla 1). En base a estos resultados y otros, Jarén Galán *et al.* (1999) triplicaron la extracción de carotenoides presentes en la ORP a 40 °C, con una ESCO₂ a presión de 13,87 y en una segunda etapa a 41,34 MPa. A bajas presiones se aísla exclusivamente β-caroteno, mientras que las presiones mayores contienen mayores proporciones de capsorrubeno y capsanteno, zeaxanteno y ?-criptoxanteno, y poco β-caroteno (Jarén-Galán *et al.*, 1999; Skerget *et al.*, 1998).

En una experiencia posterior Skerget y Knez (2001) modelizaron este proceso de extracción a partir de datos de Skerget *et al.* (1998), suponiendo una desorción de ciertos componentes en el supuesto de llegar al equilibrio, tanto a partir de pimentón como de pimienta a 40 °C y 150 ó 40 MPa, respectivamente (Tabla 1).

2.4. Extracción fraccionada de carotenoides y capsaicinoides

Las presiones óptimas de ESCO₂ para tocoferoles o capsaicinoides a 55 °C (30 y 20 MPa, respectivamente) son diferentes a las óptimas para los carotenoides (Daood *et al.*, 2002), por lo que una eficiente extracción requiere de al menos dos etapas. Con ESCO₂ se obtienen mejores rendimientos que con propano subcrítico para capsaicinoides y similares para tocoferoles (Daood *et al.*, 2002).

Perva-Uzunalic *et al.* (2004) obtuvieron con 40 MPa y 40 °C en la ESCO₂ (957 Kg · m⁻³ de densidad) la extracción del 96% de capsaicinoides y el 80% del color del chile (15.000 unidades de color). Para ello invirtieron un tiempo para etapa simple de 6 h, con una descompresión a 0,1 MPa y 25 °C. Los valores de los coeficientes de transferencia de materia ($2 \cdot 10^7$ a $11 \cdot 10^7$ m s⁻¹ en el rango de presión de 10 a 40 MPa y de temperatura de 40 a 80 °C), son linealmente dependientes de la densidad del CO₂ en el rango de la ESCO₂ (Perva-Uzunalic *et al.*, 2004).

2.5. Utilización de cosolventes

Los cosolventes aumentan el rendimiento y acortan el tiempo de operación, pero pueden dejar residuos o dificultar la recuperación de la ORP (Subirats *et al.*, 1994). Como cosolventes para aumentar el rendimiento en pigmentos se han utilizado 1% de etanol o acetona (Jarén-Galán *et al.*, 1999), aunque otros autores hayan utilizado 5-10% en otros sistemas (Krukonis, 1988).

Para extraer capsaicinoides, la utilización de cosolventes tiene un límite y es más importante para el pimentón dulce que para el picante. Por ejemplo, si se añade como cosolvente un volumen de agua a la muestra superior al requerido la eficiencia de la ESCO₂ de capsaicinoides empeora (Peusch *et al.*, 1997).

Los carotenoides o aceites esenciales podrían actual también como modificadores internos de la ESCO₂ de los capsaicinoides, pues Peusch *et al.* (1997) han descrito alrededor de un 20% de rendimiento menos al extraer capsaicinas exógenas previamente añadidas a la arena de mar que cuando se extrajeron de pimentón de *C. frutescens*.

En siguientes apartados se muestran algunos ejemplos de utilización de cosolventes.

2.6. Rendimiento del proceso de ESCO₂

El rendimiento total del proceso es variable (5,2 a 17,4% de ORP), y no solamente con la P y la T según vimos anteriormente, sino también varía según la especie y cultivares de *Capsicum*, regiones e incluso estaciones (Tablas 1 y 2; Govindarajan, 1986). La disparidad en cuanto a rendimientos obtenidos se debe en parte al material vegetal a veces fresco o a veces deshidratado utilizado, y a las diferencias en equipos utilizada (casi todos a escala piloto y en varios casos donados por empresas). Tampoco es habitual encontrar datos sobre la precisión de las medidas de P, T o de la velocidad superficial del CO₂ como los facilitados por Duarte *et al.* (2004). Si existe información de datos para diseño de instalaciones de ESCO₂ (Meireles, 2003; Skerget y Knez, 2001), así como para otras especias, sobre cálculo y optimización de costos basándose en rendimiento total y de cada una de sus fracciones (Rosa y Meireles, 2005).

En el caso de pimiento picante, Illés *et al.* (1999) obtuvieron un rendimiento con ESCO₂ del 11,5% y recuperaron un 75% de carotenoides (frente al 13,7% utilizando las condiciones recomendadas en la Tabla 1b). También extrajeron tocoferoles (100% de extracción equivalente a 331 µg · g⁻¹ de ORP de α-tocoferol, 10 de β-tocoferol y 30 de γ-tocoferol a 55 °C y 40 MPa). En el caso de pimiento húngaro se recuperaron el 94-96% de capsaicinoides, 95-98% de β-caroteno y 93-95% de α-tocoferol (Gnayfeed *et al.*, 2001; Tabla 1). Curiosamente, a 35 °C y 20 MPa se extraía el doble de β-tocoferol (20 µg · g⁻¹ ORP) respecto a las condiciones anteriores.

Catchpole *et al.* (2003) utilizaron ESCCO₂ a 40 MPa y 40 °C para extractos de pimiento picante pretriturado. Se obtuvo un rendimiento del 13,1%, un 2,9% más bajo que con acetona. También describieron el ratio disolvente/materia prima del ESCO₂ y las curvas de rendimiento de extracción según la cantidad de disolvente utilizado.

La aplicación de ultrasonidos también podría mejorar la eficiencia de la EFSCO₂, aunque la patente de Riera *et al.* (2004) hasta lo que conocemos, no se ha aplicado todavía para mejorar la extracción de componentes u ORP de pimentón.

2.7. Extracción convencional con disolventes versus ESCO₂

Vesper y Nitz (1997a) compararon la ESCO₂ a 35 MPa y 50°C durante 3 h con la extracción con hexano, a razón de 2 kg pimentón por 5 L hexano. En esta última extracción se obtuvo un rendimiento de 88% ácidos grasos, 74% carotenoides esterificados (de los 234 mg · g⁻¹ materia seca de carotenoides totales), y 0,6% agua. En valores absolutos comparando el extracto de hexano frente al de ESCO₂ encontraron un 6% menos de carotenoides esterificados (con mayor proporción de zeaxanteno que en hexano) un 28% más de ácidos grasos y un 13,4% más de agua y un porcentaje no determinado de ceras.

La mayor variabilidad de la composición de los pigmentos en ESCO₂ respecto al hexano puede estar relacionada, además del mayor contenido en agua, con la influencia de ácidos grasos que esterifican pigmentos o de acil glicerol (Vesper y Nitz, 1997a). Estos autores obtuvieron también peor rendimiento de tocoferoles con hexano frente ESCO₂ (7 versus 9 mg · g⁻¹ materia seca de tocoferoles, respectivamente). Además, la estabilidad de los ácidos grasos al conservar la ORP a 40 °C es menor que la obtenida extrayendo con hexano, aunque la proporción de ácidos grasos poliinsaturados y tocoferoles en la ESCO₂ es mayor (Vesper y Nitz 1997b).

Daood *et al.* (2002), Gnayfeed *et al.* (2001) e Illés *et al.* (1999) utilizaron propano subcrítico (99,95% pureza), y las mejores condiciones (5 MPa y 25 °C), y obtuvieron diez veces más de poder solvente que la ESCO₂. Con pimentón húngaro los ratios para extracción completa disolvente/materia prima y rendimiento son 1:1 y 8,8% p/p para propano y 1:6 y

7,2% p/p para ESCO₂ (Illés *et al.*, 1999). Con ESCO₂ se obtuvieron mejores rendimientos que con propano subcrítico para capsaicinoides y similares para tocoferoles (Daood *et al.*, 2002).

Los ratios de disolvente/materia prima para extracción completa de ORP picante han de ser 1:1,2 para propano subcrítico, frente a 1:1,25 para ESCO₂ de 99,5% pureza (Daood *et al.*, 2002). En el caso de pimiento dulce, estos ratios con propano son 1:1,5, y el rendimiento de extracción con propano a 25 °C y 5 MPa (8,1%) fue similar al de ESCO₂ (Gnayfeed *et al.*, 2001).

2.8. Extracción de β-caroteno

La composición de las ORP en β-caroteno oscila entre 1 y un 3% (Jarén-Galán *et al.*, 1999). La ESCO₂ combinada con acetales ha sido utilizada para extraer β-caroteno de pimentón, con un flujo de 1,5 mL · min⁻¹ durante 10 min en la cámara de extracción a 40 °C y 33,8 MPa, más los acetales. Estos actúan como modificadores reaccionando con el agua del sistema para originar alcohol y acetona (Weathers *et al.*, 1999). Utilizando como cosolvente 2,2-dimetoxipropano al 1,92% v/p se aumentó la eficiencia de extracción de β-caroteno de pimentón seco en 1,5 (2,5 de aumento en el caso de humidificar con agua al 0,38% v/p). Añadiendo ácido acético glacial al 20% de la equivalencia estequiométrica aumentó el rendimiento de extracción total, pero decreció la de β-caroteno (Weathers *et al.*, 1999).

Otro procedimiento para extraer β-caroteno ha sido el combinar la ESCO₂ (30 °C y 60 MPa, 10 kg CO₂ · h⁻¹ y ratio CO₂/pimentón de 80:1, con 2 min de tiempo residencia en el extractor), con adsorción mediante silica-gel (Ambrogi *et al.*, 2003). Mediante este procedimiento se fraccionan los carotenoides rojos esterificados (por adsorción, especialmente los diesterificados) de los amarillos (especialmente monoésteres y libres, que se recuperan al reducir la presión del fluido supercrítico posteriormente). Con menores ratios CO₂/pimentón de 30:1 y adsorción selectiva es posible obtener una fracción de la cual el ~56% de pigmentos son β-caroteno y está exenta de capsanteno, aunque si tiene ~8% de β-criptoxanteno. Sin embargo, se requiere aumentar la eficiencia del proceso probando otros absorbentes compatibles con los disolventes orgánicos (celulosa, ciclodextrinas).

2.9. Extracción de pigmentos clorofílicos

La ESCO₂ también puede ser utilizada para extraer pigmentos clorofílicos (Del Valle *et al.*, 2003 a, b; Uquiche *et al.*, 2005). También puede disminuirse la solubilidad de estos pigmentos a 45 °C y 36 MPa con un aumento de humedad de los pelets. Además, esta solubilidad depende más de la P (con un aumento de absorbancia del 82% desde 22 a 50 MPa) que de la T (con un aumento máximo del 29% de 35 a 45-65 °C).

2.10. Extracción de capsaicinoides

Los capsaicinoides están destinados fundamentalmente a la industria farmacéutica y se separan de los pigmentos mediante partición entre disolventes hidrocarbonados y etanol o metanol (Peusch *et al.*, 1997). Para el diseño de ESCO₂ de pimiento picante un dato importante es que la solubilidad de la capsaicina en CO₂ disminuye en presencia de β-caroteno, pero que la solubilidad del β-caroteno en CO₂ no cambia en presencia de capsaicina (Skerget y Knez, 1997). Las condiciones más habituales utilizadas para extraer capsaicinoides con ESCO₂ (Tablas 1 y 2) han sido 40-45 °C y 40-45 MPa, aunque la temperatura de 55 °C a 40 MPa también ha dado relativamente buenos resultados (Tabla 2), especialmente en pimentón de bajo contenido en picante.

Como ejemplo de resultados recientes con estas condiciones, Catchpole *et al.* (2003) obtuvieron un 1,9% de capsaicinoides mediante ESCO₂ (40 °C y 40 MPa) un resultado similar al mejor resultado con acetona o dimetil éter. Para *Capsicum annuum* L. pungente (Tabla 1), la eficiencia en la extracción de capsaicinoides fue alta a 40 MPa y 55 °C (93% de la presente en la muestra), al igual que para tocoferoles (93 y 47% de α y γ-tocoferol, respectivamente), pero sólo se extrajo un 11% de los carotenoides totales (Gnayfeed *et al.*, 2001). Del Valle *et al.* (2003 b), utilizando las condiciones de la Tabla 2, obtuvieron una ORP con bajo contenido en capsaicinoides. Uquiche *et al.* (2005) a 40 °C y 32 MPa con 40-60 kg CO₂/kg sustrato a velocidad de CO₂ de 1,1 m · s⁻¹, obtuvieron también el mismo rendimiento de capsaicinoides (0,012%, Tabla 2).

Los rendimientos de la extracción de capsaicinoides mediante ESCO₂ oscilan según materia prima entre 0,07 – 8,6% de capsaicinoides respecto a la materia prima total de partida (Tabla 1), y son mejorables utilizando cosolventes. Por ejemplo, Yasumoto *et al.* (1994) lograron recuperar el 94% de la capsaicina añadiendo 1,2% de ácido acético como cosolvente o “entrainer” a 20 °C y 9,8 MPa. Este resultado fue ligeramente mejor que utilizando 1.2% etanol, y un 28-29% mejor que sin cosolventes, aunque se obtendría un 92% de recuperación si se doblase la cantidad de CO₂ en la extracción. Unos resultados similares de porcentaje de recuperación han sido encontrados por Vesper y Nitz (1997a), pero con valores absolutos próximos a 0,07%.

La eficiencia en la ESCO₂ de capsaicinoides depende de la concentración de los mismos en la materia prima de partida. En el rango de contenido en capsaicinoides de 10 a 1400 µg · g⁻¹ muestra se ha recomendado ESCO₂ a 80 °C, densidad del CO₂ de 750 kg · m⁻³ y agua como modificador o cosolvente (Peusch *et al.*, 1997). Esta se añade directamente a la muestra (20 µL agua añadida a 250 y 70 g de pimentón dulce de *C. annuum* y polvo de *C. frutescens*, respectivamente), aumentando el rendimiento del 91% sin agua hasta el 100% con agua como cosolvente. Con la adición de otros cosolven-

tes en vez de agua (metanol o acético) se obtienen peores resultados.

Para extraer cantidades entre bajas e intermedias (0,091-0,126%) de capsaicinoides de *C. frutescens* mediante ESCO₂, Duarte *et al.* (2004) y Gouveia *et al.* (2006) recomendaron 10 min a 40 °C y bajas velocidades, presiones y rendimientos de extracción (2,76 cm · min⁻¹, 16,2 MPa y menos de 1.9% rendimiento).

La ESCO₂ se ha comparado también con la extracción convencional, con resultados no siempre consistentes. En la ESCO₂ del pimiento cv. Scotch Bonnet (Tabla 2), la variedad más rica en capsaicinoides, se obtienen 3,2 y 0,58% de capsaicina y dihidrocapsaicina, un rendimiento 6,5 veces mayor que con una mezcla cloroformo/hexano (Yao *et al.*, 1994). Este resultado no pudo ser confirmado por Peusch *et al.* (1997), que ensayaron diferentes disolventes (30 mL, otras condiciones no definidas) en reflujo durante 5 h para 1 ó 70 g de pimentón o polvo de pimiento picante, respectivamente. Se obtuvo un rendimiento con ESCO₂ de 11 µg · g⁻¹, similar (±10%) al obtenido mediante otros disolventes y un 38% mayor que con hexano.

Gnayfeed *et al.* (2001) concluyeron que, dadas las dificultades para extraer xantofilas rojas (particularmente diésteres de capsanteno) con CO₂, podría combinarse la ESCO₂ y propano subcrítico. De esta manera sería posible obtener ORP de diferente intensidad de color, pungencia y contenido en antioxidantes.

Para la ESCO₂ de capsaicinoides puede combinarse la extracción dinámica con la estática, Peusch *et al.* (1997) mezclaron un peso similar de arena de mar y de pimentón de *C. annuum* ó de polvo de *C. frutescens*, utilizando un tiempo de extracción en condiciones estáticas seguido de otro en condiciones dinámicas. Tras la optimización del proceso de extracción, se comprobó que el tiempo del proceso en condiciones dinámicas influyó más que el de las estáticas en el rendimiento de extracción de los capsaicinoides, aunque al final se fijó como óptimo 15 minutos para cada uno de estas condiciones (Tabla 2). La temperatura y la densidad del CO₂ también han sido optimizados por Peusch *et al.* (1997) (Tabla 2).

3. PELIGROS Y PUNTOS DE CONTROL CRÍTICOS DE LA ESCO₂

En un trabajo anterior revisamos algunos peligros y puntos de control críticos básicos en la extracción de la ORP (Fernández-Trujillo, 2007a), también aplicables aquí. Sin embargo, el CO₂ es fácil de eliminar de la matriz sólida y de recuperar para su reutilización, no siendo tóxico ni peligroso, ni presentando peligro de incendio, aunque la alta presión de trabajo tiene un evidente riesgo y ha de cumplirse la legislación de recipientes a alta presión (RD 1244/1979 y anejos de instrucciones técnicas complementarias ITC-MIE-AP7, ITC-MIE-AP9 e ITC-MIE-AP10; Directiva 97/23/CE; RD 769/1999).

Uquiche *et al.* (2004 y 2005) demostraron microestructuralmente que la homogeneidad de distribución del soluto tras un pretratamiento del pimientón consistente en una molienda fina, un peletizado a alta presión, y una reducción del tamaño de partícula originaban mayor homogeneidad y por tanto mejores resultados con la ESCO₂.

Un riesgo evidente en algunos procesos de extracción puede ser la oxidación de algunos componentes (especialmente ácidos grasos insaturados, terpenos o carotenoides).

Otro punto crítico en la ESCO₂ puede ser la reproducibilidad de resultados de planta piloto o en su pase a escala industrial. Del Valle *et al.* (2003 b), mostraron que la reproducibilidad fue menor con pelets acondicionados a humedad alta o molidos muy finamente, o utilizando una presión muy alta (43 MPa).

Por último, la inversión en tecnología ESCO₂ es mayor que la requiere la extracción convencional. Por tanto se ha de realizar un análisis de coste y beneficio si se quiere implementar. Esta tecnología puede resultar competitiva frente a la extracción convencional para elaborar productos de alto valor añadido que requieran estar libres de residuos de disolventes y cuya extracción tenga unos costes de operación altos (incluyendo los ambientales) frente a la ESCO₂, como por ejemplo nutraceuticos, farmacéuticos, dietéticos, etc. (Perrut, 2004).

4. APLICACIONES DE LAS FRACCIONES OBTENIDAS DE LA ESCO₂ Y DE ESTA TECNOLOGÍA

4.1. Extractos hidrosolubles

Tetsuo e Isao (1987) describieron una metodología utilizada para emulsionar ORP tras su ESCO₂ y a un tamaño de partícula reducido. Consiste en inyectar una mezcla del extracto y el agente emulgente sin reducir la presión tras la ESCO₂ a través de una boquilla pulverizadora de tamaño de poro pequeño. Al pasar la mezcla a través de esta boquilla la presión del fluido supercrítico en estado líquido, se reduce con relación a la presión del tanque de extracción o de separación, y por tanto el gas se evapora, y puede volver a reciclar.

4.2. Aditivos para la ORP y utilización de la misma como aditivo

Al utilizar capsaicina de ESCO₂ como aditivo, los consumidores prefirieron un aceite de oliva con la mitad de capsaicinoides que la concentración comercial -0,0006% frente a 0,0011% p/p - (Duarte *et al.*, 2004). Al añadir al aceite estas fracciones optimizadas en capsaicinoides (que suponen añadir 0,5% p/p de extracto) para producir aceite de oliva extra-virgen aromatizado, el color no se ve afectado y su estabilidad oxidativa a 20-22 °C y bajo luz difusa se halla dentro de los márgenes legales (Gou-

veia *et al.*, 2006). Curiosamente, los extractos producidos a presiones más altas (hasta 23 MPa) presentaron una ligera actividad prooxidante.

4.3. Eliminación de microorganismos y compuestos contaminantes de la ORP

La ESCO₂ se ha propuesto como tecnología para prácticamente eliminar la contaminación microbiana (Díaz-Reinoso *et al.*, 2006). La ESCO₂ puede reducir el contenido en aflatoxinas de la ORP respecto al contenido del pimentón inicial. Ehlers *et al.* (2006) han comprobado que tras la ESCO₂ de pimentón a 30 MPa y 50 °C, un 60% de aflatoxina B₁ y un 70% de aflatoxinas B₂ (ambas del pimentón original) quedaban en el residuo tras la extracción, y menos del 0,5 y 1%, respectivamente, en la fase acuosa.

4.4. Extractos aromatizantes y colorantes

Además de los ejemplos anteriores de los extractos ligeros de ESCO₂ como aromatizante (Gouveia *et al.*, 2006), las fracciones pesadas de concentrado rojo de capsanteno de la ORP son colorantes con valores de 7200 ASTA frente a los 1000-2000 ASTA comerciales.

4.5. Patentes del proceso de ESCO₂ y extractos desodorizados

Coenen *et al.* (1983) recomendaron una T>70 °C y P=35 MPa, separando el extracto mediante disminución de la densidad de la fase gaseosa. Osamu e Itaru (1990) y Tadanori *et al.* (1988) obtuvieron ORP desodorizada utilizando 35-40 °C y 19,6-24,5 MPa, y ratio en peso CO₂/ORP de 50:80. Este extracto se puede rectificar en un extractor de múltiples etapas hasta obtener una concentración cuatro veces superior de color (40.000 unidades de color o más).

4.6. Procesos y usos potenciales

Weller y Breithaupt (2003) señalan la falta de ORP ricas en zeaxantenos en el mercado, que pueden conseguirse mediante ESCO₂ por su selectividad. Ambos compuestos se ha sugerido que pueden disminuir el riesgo de degeneración macular asociado al envejecimiento.

Perrut (2004) señala la posibilidad de utilizar en general la ESCO₂ para extraer ingredientes alimentarios imposibles de obtener mediante extracción convencional del pimentón. También apunta la potencialidad de uso del ESCO₂ para obtener principios activos de interés para nutracéutica, farmacia, cosmética, e incluso aromas y fragancias. Los menores costos de operación de la planta compensan su alto valor añadido y la inversión inicial necesaria.

AGRADECIMIENTOS

A Colciencias (Colombia) por el proyecto sobre ají amazónico 242/2001 en el que el autor participó como colaborador. A Venancio Hidalgo (Ingrenat S.A.) por sus comentarios y sugerencias.

BIBLIOGRAFÍA

- Ambrogi A., Cardarelli D.A. and Eggers R. 2003. Separation of natural colorants using a combined high pressure extraction-adsorption process. *Latin Amer. Appl. Res.*, **33**, 323-326.
- Catchpole OJ, Grez JB, Perry NB, Burgess EJ, Redmond WA and Porter NG. 2003. Extraction of chilli, black pepper, and ginger with near-critical CO₂, propane, and di-methyl ether: analysis of the extracts by quantitative nuclear magnetic resonance. *J. Agric. Food Chem.*, **51**, 4853-4860.
- Coenen H. and Hagen R. 1983. Natürlicher farbstoff sus paprika durch gasextraktion. *Gordian* (Hamburgo), **83**,164-170.
- Coenen H, Hagen R. and Knuth M. 1983. Method for obtaining aromatics and dyestuffs from bell peppers. E.E.U.U. Pat. 4400398 (23.08.1983).
- Daood HG, Ille's V, Gnayfeed MH, Mészáros B, Horváth G. and Biacs PA. 2002. Extraction of pungent spice paprika by supercritical carbon dioxide and subcritical propane. *J. Superc. Fluids*, **23**,143-152.
- Del Valle JM. y Aguilera JM. 1999. Revisión: Extracción con CO₂ a alta presión. Fundamentos y aplicaciones en la industria de alimentos. *Food Sci. Tech. Intl.*, **5**, 1-24.
- Del Valle JM., de la Fuente JC. and Cardarelli DA. 2005. Contributions to supercritical extraction of vegetable substrates in Latin America. *J. Food Engin.*, **67**, 35-57.
- Del Valle JM, Jiménez M. and de la Fuente JC. 2003 a. Extraction kinetics of pre-pelletized Jalapeño peppers with supercritical CO₂. *J Superc. Fluids*, **25**, 33-44.
- Del Valle JM., Jiménez M, Napolitano P, Zetzl C. and Brunner G. 2003 b. Supercritical carbon dioxide extraction of pelletized peppers. *J. Sci. Food Agric.*, **83**, 550-556.
- Díaz-Reinoso B., Moure A, Domínguez H. and Parajo JC. 2006. Supercritical CO₂ extraction and purification of compounds with antioxidant activity. *J. Agric. Food Chem.*, **54**, 2441-2469.
- Directiva 97/23/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 29 de mayo de 1997 relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre equipos a presión. *Diario Oficial CE*, **L 181**, (09.07.1997), 0001-0055.
- Duart, C. Moldão-Martins M, Gouveia AF, Beirão da Costa S, Leitão AE. and Bernardo-Gil, M.G. 2004. Supercritical fluid extraction of red pepper (*Capsicum frutescens* L.). *J. Superc. Fluids*, **30**, 155-161
- Ehlers D, Czech E, Quirin KW. and Weber R. 2006. Distribution of aflatoxins between extract and extraction residue of paprika using supercritical carbon dioxide. *Phytochem. Anal.*, **17**, 114-120.
- Fernández-Trujillo JP. 2007a. Extracción convencional de oleorresina de pimentón dulce y picante I. Generalidades, composición, proceso e innovaciones y aplicaciones. *Grasas y Aceites*, **58**, 252-263.
- Fernández-Trujillo JP. 2007b. Extracción convencional de oleorresina de pimentón dulce y picante II. Puntos críticos y requerimientos comerciales. *Grasas y Aceites*, **58**, 327-333.

DOCUMENTO II: PRESUPUESTO

PRESUPUESTO

En este documento, se llevará a cabo una estimación de los costes, por una parte, se analizarán los costes relacionados con el cultivo y por otra los costes de la instalación.

Costes del cultivo de cáñamo

Tabla 1. Costes cultivo del cáñamo.

Código	Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Precio total
C.1	Semillas Futura 75	37kg/ ha	112,5 €/kg	4162,5 €/ha
C.2	Rotovatar	10hr/ha	45€/hr	450€/ha
C.3	Estiércol + reparto	500kg/ha	3€/kg	1500€/ha
C.4	Pulverización fitosanitaria	4 ud	60€/ha·ud	240€/ha
C.5	Analíticas del suelo	1ud	60€/ud	60 €
C.6	Analíticas cannabinoides	3ud	70€/ud	210 €
C.7	Analíticas metales pesados (Cadmio, Mercurio y Plomo)	1ud	60€/ud	60 €
C.8	Analítica pesticidas	1ud	55€/ud	55 €
C.9	Seguridad privada durante 30 días	24 hr/día	30€/hr	21.600 €
C.10	Agua de riego	3000m ³ /ha	0,1€/m ³	300€/ha
C.11	Alquiler máquina recolectora	3hr/ha	70€/hr	210€/ha

El concepto C.9 relativo a la seguridad privada, se hace esencial en los últimos estadios de la floración donde las flores presentan un aspecto vistoso y se pueden producir hurtos.

La aplicación de los costes depende en gran medida de la superficie, ya que se encuentran varios conceptos que dependen de este término.

Por lo que la tabla total de gastos es la siguiente:

Tabla 2. Desglose cultivo del cáñamo.

Gastos por hectárea de terreno cultivado	6.862,50 €
Gastos fijos	21.985 €

Costes de la instalación.

Los costes de la instalación se han obtenido a través del repositorio de trabajos de la UPV ya que se procedió a pedir presupuesto a diferentes casas comerciales de equipos sin ningún éxito.

Tabla 3. Costes de equipos.

Código	Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Precio total
E-1	Extractor cilíndrico 45L	2	13.000,00 €	26.000,00 €
S-1	Separador flash	2	7.500,00 €	15.000,00 €
C-1	Ebullidor tipo caldera	1	18.000,00 €	18.000,00 €
D-2	Depósito CO ₂	1	36.000,00 €	36.000,00 €
D-1	Depósito intermedio	1	3.600,00 €	3.600,00 €
I-1	Intercambiador	2	10.000,00 €	20.000,00 €
CM-1	Compresor	1	40.000,00 €	40.000,00 €
B-1	Bomba	1	60.000,00 €	60.000,00 €
Subtotal Coste equipos (C_{eq})				218.600,00 €

Para calcular el resto de elementos de la instalación como infraestructuras, tuberías y equipos eléctricos se ha tomado el valor de C_{eq} y se han aplicado unos coeficientes. Los costes obtenidos son los siguientes.

Tabla 4. Otros Costes.

Concepto	Coste
Coste de equipos (C_{eq})	218.600,00 €
Infraestructura (0,7· C_{eq})	153.020,00 €
Tuberías y bombas (0,6·C_{eq})	131.160,00 €
Equipos eléctricos (0,3·C_{eq})	65.580,00 €
Subtotal	568.360,00 €

Además, se requiere de una mano de obra cualificada para poner en funcionamiento la instalación cuyos costes serían.

Diseño de un sistema de extracción de aceite de cáñamo para su uso en la industria farmacéutica y cosmética

Tabla 5. Coste de mano de Obra.

Código	Descripción	Cantidad(h)	Precio Unitario (€/h)	Precio total (€)
MO.1	Técnico de calidad	160	15	2.400,00 €
MO.2	Encargado de material	160	12	1.920,00 €
MO.3	Ingenieros químicos	320	25	8.000,00 €
MO.4	Peones	160	9	1.440,00 €
MO.5	Empaquetadores	320	9	2.880,00 €
MO.6	Técnicos de laboratorio	380	15	5.700,00 €
			Subtotal	22.340,00 €

El presupuesto de ejecución material es la suma de estos dos costes, el cual asciende a:

Tabla 6. Coste de ejecución material.

Instalación	568.360,00 €
Mano de Obra	22.340,00 €
Subtotal	590.700,00 €

A este presupuesto se le aplicará un porcentaje de gastos generales del 14% y un beneficio industrial del 6% obteniendo de esta manera el presupuesto de ejecución por contrata:

Tabla 7. Coste de ejecución por contrata.

Concepto	Coste
Ejecución material	590.700,00 €
Gastos generales (14%)	82.698,00 €
Beneficio industrial (6%)	35.442,00 €
Subtotal	708.840,00 €

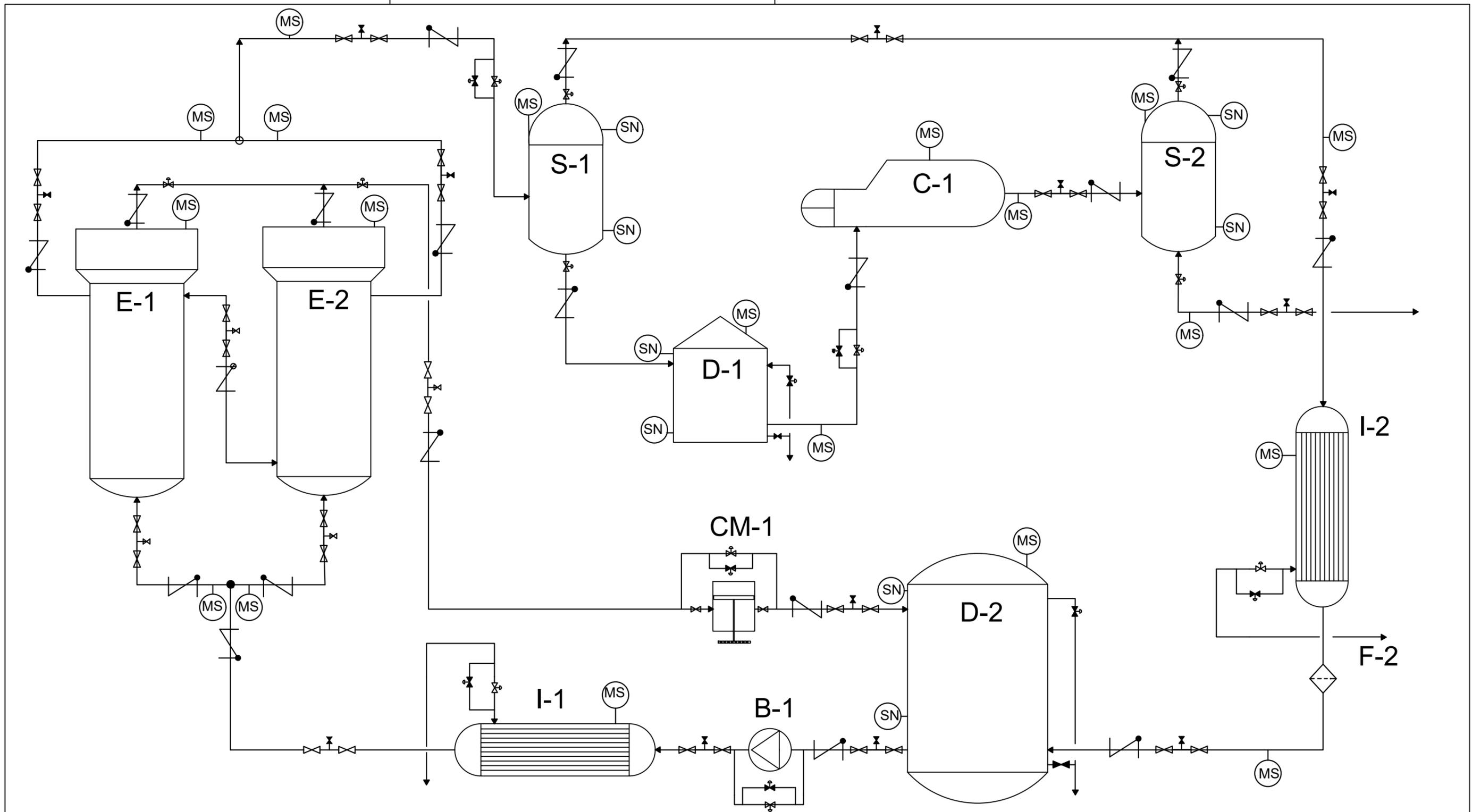
Por último, se ha de aplicar el impuesto sobre el valor añadido o IVA el cual es un 21% y se obtendría el coste del presupuesto total de la instalación.

Tabla 8. Coste total.

Concepto	Coste
Ejecución por contrata	708.840,00 €
IVA(21%)	148.856,40 €
Total	857.696,40 €

De esta forma, el presupuesto total necesario estimado para llevar a cabo la instalación sería de **Ochocientos cincuenta y siete mil seiscientos noventa y seis con cuarenta céntimos.**

DOCUMENTO III: PLANOS



Código	Descripción	Código	Descripción	Código	Descripción	Código	Descripción
E	Extractor	I	Intercambiador		Válvula de seguridad	MS	Multisensor
S	Separador Flash	B	Bomba	SN	Sensor de nivel		
D	Depósito	CM	Compresor		Válvula de retención		
C	Caldera	F	Filtro		Válvula reguladora		