

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA DENTRO DEL CICLO DE VIDA DE CULTIVOS DE CANNABIS AGROINDUSTRIAL EN SISTEMAS TRASLUCIDOS.

Santiago Isaac Celis Merchán

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y FACULTAD DE ESTUDIOS AMBIENTALES Y  
RURALES  
MAESTRÍA EN ENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD  
BOGOTÁ D.C.

2022

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA DENTRO DEL CICLO DE VIDA DE CULTIVOS DE CANNABIS AGROINDUSTRIAL EN SISTEMAS TRASLUCIDOS.

Autor:

Santiago Isaac Celis Merchán

Trabajo de grado realizado para cumplir con uno de los requisitos para optar al título de Magister en Energía y sostenibilidad

Director:

Armando Sarmiento López

Co – director

Pedro Jaime Pineda, M.Sc

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y FACULTAD DE ESTUDIOS AMBIENTALES Y  
RURALES

MAESTRÍA EN ENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD

BOGOTÁ D.C.

2022

Resolución 13 del 6 de julio de 1946 «por la cual se reglamenta lo concerniente a Tesis y Exámenes de Grado en la Pontificia Universidad Javeriana»

Artículo 23. La Universidad no se hace responsable por los conceptos emitidos por sus alumnos en sus trabajos de tesis. Sólo velará porque no se publique nada contrario al dogma y a la moral católica y porque las tesis no contengan ataques personales contra persona alguna, antes bien se vean en ellas el anhelo de buscar la verdad y la justicia.

## **Agradecimientos**

A mi director y co - director del proyecto de grado por la disposición, interés en el tema elegido y apoyo durante el desarrollo del trabajo de grado.

A mi hermano quien me animó a continuar preparándome para los retos personales y profesionales.

A mi Esposa quien estuvo a mi lado durante todo el proceso académico apoyándome en los momentos difíciles y celebrando los buenos momentos, sin ella este logro no hubiera sido posible.

A mi hija que es el motor principal de mi vida.

## I. Contenido

I.	Contenido .....	5
II.	Glosario .....	8
III.	Resumen .....	9
IV.	Summary .....	9
V.	Introducción .....	9
VI.	Metodología de la investigación .....	12
VII.	Planteamiento del problema .....	13
VIII.	Objetivos.....	16
1	Estado del arte de la implementación de sistemas de energía renovable en los procesos de producción de Cannabis Agroindustrial.....	17
1.1	Historia del cannabis.....	17
1.2	Transición legal del cannabis .....	18
1.3	Mercado Internacional.....	20
1.4	Cannabis en Colombia.....	22
1.4.1	Historia del cannabis en Colombia .....	22
1.4.2	Marco normativo de la producción de cannabis .....	22
1.4.3	Mercado Nacional.....	24
1.4.4	Sinergias entre el sector de cannabis agroindustrial y sector energético .....	25
1.5	Descripción de los tipos de cultivo de cannabis .....	27
1.5.1	Tipos de cultivo de cannabis.....	27
1.5.2	Proceso de cultivo de cannabis en invernadero .....	29
1.5.3	Elaboración de derivados .....	30
1.5.3.1	Extracción por fluidos supercríticos .....	31
1.5.3.2	Extracción por alcohol/etanol.....	32
1.5.3.3	Extracción por hidrocarburos .....	32
1.5.3.4	Extracción por Hidrodestilación y arrastre de vapor .....	34
1.6	Impactos ambientales asociados al ciclo de vida de cultivos de cannabis .....	35
1.6.1	Demanda de agua .....	35
1.6.2	Contaminación de fuentes hídricas .....	36
1.6.3	Calidad de aire .....	37
1.7	Implementación de sistemas de energía solar fotovoltaica en cultivos de cannabis.....	37
2	Estimación de los requerimientos energéticos asociados al ciclo de vida del Cannabis agroindustrial en el caso de estudio .....	38
2.1	Requerimientos energéticos del ciclo de vida del cannabis .....	38
2.2	Generalidades del estudio de caso .....	41
2.3	Descripción del ciclo de vida del cultivo en el estudio de caso .....	43

2.3.1	Cultivo de plantas madre .....	44
2.3.2	Etapa de germinación.....	45
2.3.3	Crecimiento vegetativo .....	46
2.3.4	Etapa de floración .....	46
2.3.5	Etapa de Cosecha .....	47
2.3.6	Etapa de secado y manicurado .....	48
2.3.7	Etapa de transformación. ....	50
2.4	Análisis del ciclo de vida del cultivo de Aurora Medicinal .....	51
2.5	Identificación de requerimientos energéticos del estudio de caso.....	52
3	Implementación de un sistema de energía solar fotovoltaico en el cultivo del caso de estudio	54
3.1	Simulación del Sistema Solar Fotovoltaico en SolarGis - PVSyst .....	54
3.2	Diseño conceptual de Sistema Solar Fotovoltaico .....	58
3.3	Estructuración de Costos .....	60
4	Análisis de la implementación de un sistema solar fotovoltaico en el cultivo de Cannabis agroindustrial.....	61
4.1	Análisis Ambiental.....	61
4.2	Evaluación Financiera .....	64
4.3	Evaluación Técnica .....	67
5	Conclusiones.....	67
6	Recomendaciones .....	68
7	Bibliografía .....	69

### Contenido de Tablas

Tabla 1.1	Beneficios de la Ley 1715 de 2014.....	27
Tabla 1.2	Etapas de cultivo de cannabis .....	30
Tabla 1.3	Consumo de agua de diferentes cultivos.....	36
Tabla 2.1	Consumos energéticos de Aurora Medicinal .....	52
Tabla 2.2	Identificación de consumos energéticos .....	53
Tabla 3.1	Descripción de equipos, auxiliares y estudios .....	61
Tabla 4.1	Matriz de Evaluación de Impactos.....	63
Tabla 4.2	Análisis Financiero .....	66

### Contenido de Fotografías

Fotografía 1.1	Cultivo de cannabis en exteriores.....	28
Fotografía 1.2	Cultivo en Invernadero e interiores .....	28
Fotografía 1.3	Aceite de cannabis.....	31
Fotografía 2.1	Invernadero Tipo de Aurora Medicinal.....	43
Fotografía 2.2	Cultivo de plantas madre.....	44
Fotografía 2.3	Plantines de cannabis obtenidos por clonación .....	45
Fotografía 2.4	Planta durante crecimiento vegetativo .....	46

Fotografía 2.5 Flor en etapa de floración.....	47
Fotografía 2.6 Etapa de cosecha del cultivo de cannabis.....	48
Fotografía 2.7 Cuarto de secado .....	49
Fotografía 2.8 Flor seca de cannabis.....	49
Fotografía 2.9 Manicurado de la planta .....	50
Fotografía 2.10 Rotoevaporador, molino y materia prima .....	50
Fotografía 2.11 Material destilado al 85% de pureza y Short path.....	51

### Contenido de Figuras

Figura 1.1 Esquema del método de investigación cuantitativo.....	12
Figura 1.2 Esquema de Diseño de Investigación .....	13
Figura 1.3 Panorama actual del cannabis en el mundo .....	14
Figura 1.1 Situación del cannabis en el mundo .....	20
Figura 1.2 Mercado del cannabis en el mundo .....	21
Figura 1.3 Panorama de la Industria de Cannabis en Colombia.....	25
Figura 1.4 Actividades principales del proceso de cultivo de cannabis en invernadero.....	29
Figura 1.5 Extracción de fluidos supercríticos .....	32
Figura 1.6 Extracción por Hidrocarburos .....	34
Figura 1.7 Destilación por arrastre de vapor.....	34
Figura 2.1 Distribución de requerimientos energéticos .....	38
Figura 2.2 Diferencia entre los requerimientos energéticos de los tipos de cultivo de cannabis .....	39
Figura 2.3 Desglose de los requerimientos de energía en el cultivo de cannabis.....	40
Figura 2.4 Comparación de requerimientos energéticos por tipo de cultivo .....	41
Figura 2.5 Ubicación del Caso de Estudio Aurora Medicinal .....	42
Figura 2.6 Descripción de las actividades de la compañía .....	43
Figura 3.1 Coordenadas de entrada para la Simulación.....	54
Figura 3.2 Datos de entrada para el análisis de radiación solar .....	55
Figura 3.3 Irradiación global horizontal .....	55
Figura 3.4 Resumen de resultados de la simulación .....	56
Figura 3.5 Características del sistema solar .....	57
Figura 3.6 Resultados principales de la simulación.....	58
Figura 3.7 Ubicación del sistema Solar .....	59
Figura 3.8 Diagrama conceptual del unifilar para el sistema solar.....	60
Figura 4.1 Comparación del costo de generación de energía .....	64
Figura 4.2 Retorno de la Inversión .....	65

### Anexos

Anexo 1. Solargis
Anexo 2. Plantilla de ajuste horario
Anexo 3. Simulación PVSyst
Anexo 4. Ficha técnica paneles
Anexo 5. Ficha técnica inversor
Anexo 6. Layout
Anexo 7. Diagrama unifilar
Anexo 8. Análisis Financiero

## II. Glosario

Capex: Capital Expenditure – Gastos de capital  
CBD: Cannabidiol  
CBN: Cannabinol  
CBL: Cannabiciolol  
COP: Colombian Pesos  
COP 21: La Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático 2015  
COP 26: La Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático 2021  
CO2: Dióxido de Carbono  
CREG: Comisión de Regulación de Energía y Gas  
ESFV: Energía Solar Fotovoltaica  
FNCCER: Fuentes No Convencionales de Energía Renovable  
GEI: Gases de Efecto Invernadero  
GMP: Good Manufacturing Practices -Buenas Prácticas Agrícolas  
HVAC: Heating Ventilation Air Conditioning – Calor Ventilación Aire Acondicionado  
ICA: Instituto Colombiano Agropecuario  
INVIMA: Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos  
IPC: Índice de Precios al Consumidor  
IPP: Índice de Precios al Productor  
IVA: Impuesto al Valor Agregado  
Kwh: Kilovatios – hora  
MW: Megavatios  
NDC: Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional  
ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible  
OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos  
OMS: Organización Mundial de la Salud  
ONU: Organización de Naciones Unidas  
Opex: Operational Expenditure – Gastos Operativos  
SCF: Super Critical Fluid – Fluidos Súper Críticos  
SDL: Sistema de Distribución Local  
STN: Sistema de Transmisión Nacional  
THC: Tetrahidrocannabinol  
USD: dólar americano  
cUSD: centavo de dólar americano

### **III. Resumen**

En el presente trabajo de grado se muestra la situación actual del mercado del cannabis en el uso medicinal y uso adulto basándose en el cambio normativo de una gran cantidad de países en los cinco continentes que han elaborado e implementado el marco normativo para la comercialización legal de la planta. Lo cual ha significado un aumento en la oferta y demanda de esta en los mercados internacionales.

Colombia por su parte se ha convertido en potencia mundial de la producción de cannabis gracias a su ubicación estratégica, condiciones ambientales, costos de mano de obra favorables y cambios normativos en pro de la fabricación, uso y comercialización de cannabis medicinal y derivados. Es así que actualmente existen más de 57.000 hectáreas sembradas de cannabis en el territorio nacional.

Con el crecimiento exponencial del sector también ha aumentado la demanda de bienes y servicios en dónde el servicio de energía eléctrica ha sido el más afectado debido a los requerimientos energéticos del ciclo de vida del cultivo, razón por la cual se tomó un caso de estudio en el que se pudiera analizar cada uno de los procesos y estimar los requerimientos energéticos basándose en información primaria.

Finalmente, con base en el caso de estudio se procedió a diseñar un sistema de generación de energía solar fotovoltaica capaz de suplir los requerimientos energéticos del cultivo y se realizó un análisis multicriterio desde los componentes técnico, ambiental y financiero con el fin de identificar la viabilidad de la implementación de tal solución solar para el caso de estudio y en general evidenciar la sinergia entre los sectores agroindustrial de cannabis y energía eléctrica.

### **IV. Summary**

The actual degree project shows the current situation of the cannabis market for medicinal use and adult use based on the regulatory change in many countries on the five continents that have developed and implemented the regulatory framework for the legal marketing of cannabis plant. Which has meant an increase in the supply and demand of it in international markets.

Colombia, for its part, has become a world power in cannabis production thanks to its strategic location, environmental conditions, favorable labor costs and regulatory changes in favor of the manufacture, use and commercialization of medicinal cannabis and derivatives. Thus, there are currently more than 57,000 hectares planted with cannabis in the national territory.

With the exponential growth of this sector, the demand for goods and services has also increased, where the electric power service has been the most affected due to the energy requirements of the crop life cycle, which is why a case study was taken in which could analyze each of the processes and estimate energy requirements based on primary information.

Finally, based on the case study, a photovoltaic solar energy generation system capable of supplying the energy requirements of the crop was designed and a multicriteria analysis was carried out from the technical, environmental and financial components to identify the viability of the implementation of such a solar solution for the case study and in general demonstrate the synergy between the agro-industrial sectors of cannabis and electrical energy.

### **V. Introducción**

El cultivo de plantas de cannabis en Colombia, a partir del 2015 ha sido objeto de transición hacia la legalidad por medio de la implementación y fortalecimiento de un marco regulatorio, que en un comienzo permitía la comercialización nacional e internacional legal de la semilla y derivados del cannabis, tanto de carácter psicoactivo (contenido de THC > 1%) como de

carácter medicinal (contenido de THC < 1%) (República 2016) y que en el proceso de transición del marco regulatorio en el 2022 se aprobó el comercio legal de flor seca de cannabis.

Este escenario ha sido favorable para el cultivo y comercialización legal de cannabis en Colombia, el diario La República establece que a febrero de 2022 se han solicitado 2634 licencias para las siete (7) diferentes modalidades de cultivo otorgadas por el gobierno nacional; esto significa que, según expertos se abre la posibilidad de inclusión del cannabis en el 100% de los mercados, sin presentarse restricciones legales de participación en todos los eslabones de la cadena productiva de la planta y sus derivados. Lo que supone un aumento exponencial en las exportaciones de esta que a 31 de diciembre del 2021 sumaron US\$10,5 millones (República 2022b).

Con respecto a las 2634 licencias otorgadas por el gobierno colombiano, actualmente existen más de 57.000 hectáreas de cultivos de plantas de cannabis en todo el territorio nacional y las proyecciones de expertos estiman un aumento considerable al año 2030, teniendo en cuenta que hay más de 4.000 pequeños y medianos productores de cannabis que se encuentran en lista de espera de la aprobación para producir sus bienes por parte del Ministerio de Justicia (Agronegocios 2022).

El escenario de producción es factible puesto que en Colombia es posible cultivar Cannabis de manera agroindustrial bajo tres diferentes tipos de sistemas agrícolas; a cielo abierto, a cielo abierto con riego semi automático y bajo techo en invernadero con luz y riego asistido (Garzón, Wies, y Acevedo 2019), sistemas que permiten aprovechar las ventajas estratégicas de la ubicación del país puesto que se puede aprovechar la variedad de pisos térmicos, grandes extensiones de tierras cultivables, mano de obra asequible y finalmente el potencial de radiación solar, lo cual maximiza el número de cultivos efectivos anualmente; situación que se ve reflejada en el costo de producción de un gramo de cannabis en Colombia, que con respecto a otros mercados de acuerdo con (Agronegocios 2019), producir un gramo de cannabis colombiano vale entre US\$0,5 y US\$0,8. En Bolivia para la misma cantidad el costo de producción se encuentra en un rango entre US\$0,7 a US\$0,9; en Perú va desde US\$1,8; mientras que en otros países como Canadá, producir un gramo llega a US\$2,1.

Teniendo en cuenta lo anterior, en el país se ha presentado un fenómeno producto del acelerado crecimiento del sector agroindustrial de cannabis, por tanto se hace indispensable que dentro del ciclo de vida de los cultivos se analice la demanda de bienes, tales como los insumos agrícolas, recursos naturales, y servicios de manera sostenible dentro de los cuales se encuentra el acueducto, alcantarillado, gas, recolección y adecuada disposición de residuos, economía circular de los restos vegetales y energía eléctrica, siendo este último un factor determinante en el éxito del ciclo de vida del cannabis puesto que los cultivos requieren durante gran parte de su desarrollo periodos de iluminación en un promedio de 18 horas de luz diariamente (Andrés y Iglesias 2021).

Así mismo, el valor agregado de las compañías no se encuentra en la venta de la flor seca del cannabis sino en la fabricación de derivados de los cannabinoides que contiene la planta, por ahora permitidos en la regulación colombiana para ser utilizados medicinalmente, lo cual implica realizar el proceso de transformación en aceites, cremas, ungüentos, gotas entre otros productos derivados de los principales cannabinoides como CBD, THC, CBN, CBL entre otros.

Por lo tanto, para obtener el extracto más puro del cannabis es necesario que la planta pase por un proceso de transformación en donde se utilizan varios equipos que tienen requerimientos energéticos que impactan de manera significativa el costo de producción de los derivados del

cannabis y que en muchos casos pueden generar alteraciones en la prestación del servicio de energía por el operador de red.

Dicho lo anterior, el propósito del presente trabajo de grado es proponer alternativas que permitan la sinergia entre el sector agroindustrial de cannabis y la generación de energía renovable por medio de la implementación de sistemas de energía solar fotovoltaica dentro de cultivos de cannabis con el fin de optimizar el uso de la energía requerida para la producción de dichos cultivos y que a su vez permita disminuir los costos directos asociados de los mismos por medio de los diferentes mecanismos que permite la regulación colombiana.

Por lo tanto, se busca encontrar esta sinergia por medio de la profundización en la búsqueda de información disponible e implementada en diferentes partes del mundo que puedan ser usadas como referencia en el territorio colombiano así como la identificación detallada de los consumos energéticos durante el ciclo de vida en cultivos colombianos utilizando como referencia un cultivo exitoso que permita evaluar el estado actual del cultivo y finalmente proponer alternativas de eficiencia energética y desarrollo sostenible que puedan ser adoptadas por medio de un análisis de viabilidad multicriterio.

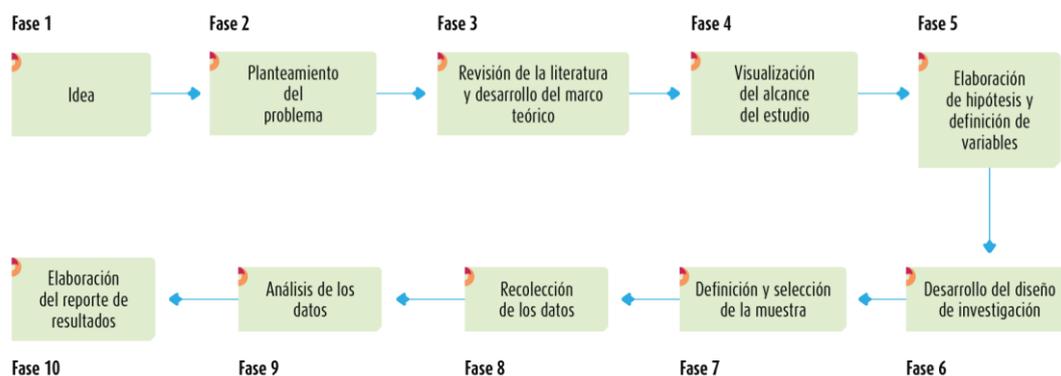
## VI. Metodología de la investigación

En la elaboración del presente trabajo de grado, se siguió la metodología de investigación cuantitativa desarrollada por (Hernández Sampieri et al., n.d.) la cual se caracteriza por el desarrollo de la idea en cinco elementos principales, los cuales se muestran a continuación:

- 1) Objetivos de investigación
- 2) Preguntas de investigación
- 3) Justificación de la investigación
- 4) Viabilidad de la investigación
- 5) Evaluación de las deficiencias en el conocimiento del problema.

El propósito de establecer el desarrollo del sistema para la evaluación del potencial de generación de energía eléctrica por medio de energía solar fotovoltaica surge por la necesidad de viabilizar el uso de fuentes no convencionales de energía renovable FNCER por medio de la energía solar en los cultivos de cannabis agroindustrial que actualmente se está intensificando en el país y que por medio de la creación e implementación de marcos regulatorios en los dos sectores, se pueden evidenciar sinergias y efectos colaterales positivos gracias a los avances normativos de los sectores en cuestión en el país. Por lo tanto, para el presente proyecto se decidió avanzar por medio del enfoque cualitativo.

Este enfoque es secuencial y probatorio. Cada etapa precede a la siguiente y no se pueden eludir pasos. El orden es riguroso, aunque desde luego, podemos redefinir alguna fase. Parte de una idea que va acotándose y, una vez delimitada, se derivan objetivos y preguntas de investigación, secuencialmente se revisa la literatura y se construye un marco o una perspectiva teórica. De las preguntas se establecen hipótesis y determinan variables; para lo cual se traza un plan de análisis para probarlas; se miden las variables en un determinado contexto; se analizan las mediciones obtenidas utilizando métodos estadísticos, y finalmente, se extrae una serie de conclusiones de lo que puede funcionar para el caso aplicado (ver Figura 1.1) (Hernández Sampieri et al., n.d.)



*Figura 1.1 Esquema del método de investigación cuantitativo*

Fuente: tomado de (Hernández Sampieri et al., n.d.)

Finalmente, luego de aplicar el esquema metodológico de la Figura 1.1 se busca establecer la alternativa que mejor se adapte a las necesidades de este tipo de cultivos, así como a los requerimientos y ventajas del mercado eléctrico nacional tomando como referencia para el análisis del caso un diseño no experimental de diseño transeccional descriptivo (Figura 1.2).

Este consiste en ubicar en una o diversas variables a un grupo de personas u otros seres vivos, objetos, situaciones, contextos, fenómenos, comunidades, etc., y proporcionar su descripción.

Son, por tanto, estudios puramente descriptivos y cuando establecen hipótesis, éstas son también descriptivas (de pronóstico de una cifra o valores).

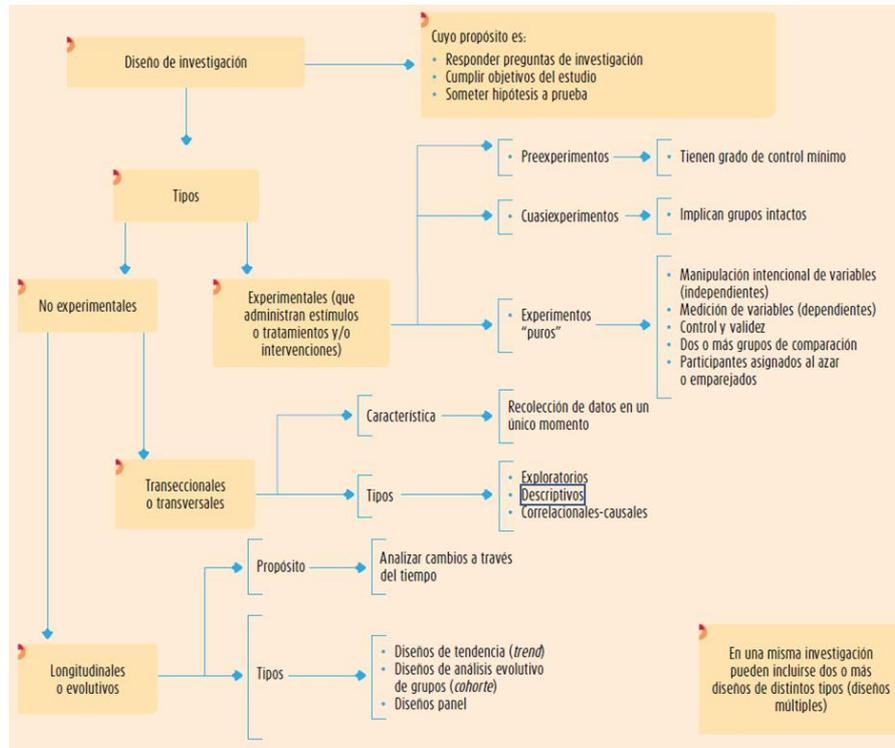


Figura 1.2 Esquema de Diseño de Investigación

(Hernández Sampieri et al., n.d.)

Con base en lo anterior se obtiene la información necesaria para el análisis, la definición y selección de la muestra, recolección y análisis de datos en orden de plantear la alternativa de generación de energía eléctrica por medio de la Fuente No Convencional de Energía Renovable FNCER por medio del recurso solar puesto que pueden presentar sinergias; en este sentido, se establece de manera preliminar que esta es la fuente más adecuada a utilizar durante la etapa de operación y mantenimiento de este tipo de proyectos, lo cual será confirmado por un análisis jerárquico que tenga en cuenta las diferentes variables que pueden afectar el éxito del proyecto.

## VII. Planteamiento del problema

Como se puede ver en la Figura 1.3 en la mayoría de los países de los continentes americano y europeo el consumo medicinal del cannabis se encuentra en el camino hacia la legalidad, en gran parte del continente asiático, se encuentra descriminalizado y finalmente en el continente africano, aún se tiene el estatus de ilegalidad de la planta. Este escenario es favorable para el mercado del cannabis medicinal en el mundo ya que a medida que avanzan los estudios y los conocimientos medicinales de la planta, son más los países que se suman en pro de la legalidad de la planta.

Teniendo como referencia la transición hacia la legalidad del cannabis, la cual aún se encuentra en constante cambio producto del crecimiento acelerado del sector y la normatividad tanto nacional como internacional, se identifica el cambio generalizado en la percepción que se ha venido generando en otros países que al igual que Colombia han emprendido el camino de la legalización total o parcial del cannabis.

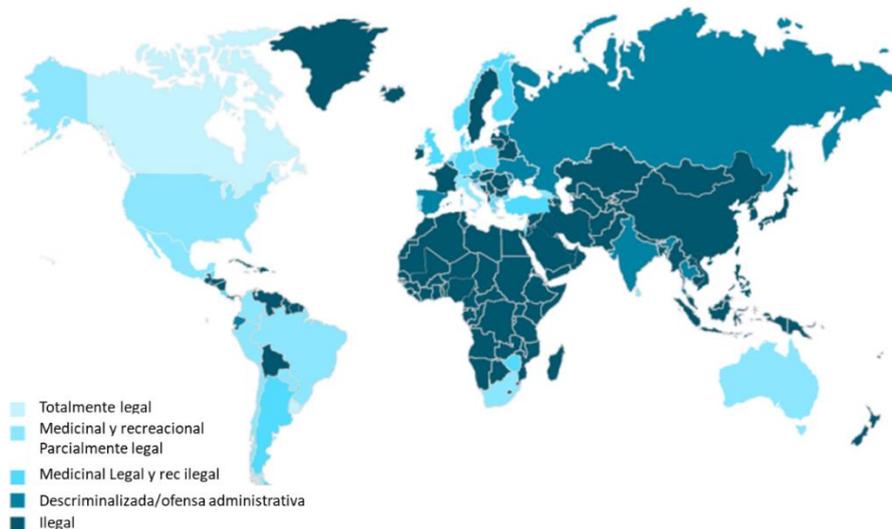


Figura 1.3 Panorama actual del cannabis en el mundo

Fuente: (Ramirez, Naranjo, y Torres 2019)

En este sentido, se estima que el crecimiento del sector en el país para el año 2030 pueda estar por encima de los USD 1.700 millones, de acuerdo con proyecciones de ProColombia, esta es una cifra que superaría a las exportaciones de flores. Así mismo, un escenario de precios más optimista apunta a ingresos de más de 2.500 millones de dólares en exportaciones, lo que incluso superaría las exportaciones de café que es el primer producto del país en exportaciones no minero-energéticas (Diario 2021).

A la fecha, en el país es posible producir cannabis de manera agroindustrial a través de la expedición de cuatro diferentes tipos de licencias avaladas por el Gobierno Nacional (cultivo de cannabis psicoactivo, cannabis no psicoactivo, uso de semillas para siembra y fabricación de derivados) lo que abrió la puerta no sólo a la investigación científica de la planta sino a un negocio que como se mencionó anteriormente cada vez toma más fuerza en Colombia y el mundo, que algunos jugadores del mercado prevén que para el 2025 moverá cerca de 54 mil millones de dólares a nivel mundial (Portafolio 2021).

Para cultivar cannabis de forma agroindustrial, el país parte con la ventaja estratégica de sus condiciones meteorológicas, que incluyen radiación solar con 12 horas de luz natural por estar sobre la línea ecuatorial, menores fluctuaciones de temperatura y humedad relativa, así como costos de operación y mantenimiento bastante inferiores a los establecidos en otras latitudes del planeta debido a la economía del país, particularmente debido a los costos de mano de obra y prestación de bienes y servicios. Por esta razón, cultivar un gramo de cannabis en Colombia puede costar alrededor de cUSD \$ 6, mientras que en Canadá o Estados Unidos puede costar hasta USD \$ 1,89. Este panorama ha hecho crecer otros sectores económicos indirectamente, como es el caso del sector energético.

El cual ha venido afrontando el aumento en la demanda de energía, que no se encuentra pronosticada dentro de los planes de expansión en generación y transmisión del país; lo cual indirectamente genera un incremento en la demanda del sistema de distribución local SDL y por lo tanto se requiere de un análisis cruzado con la oferta energética del SDL con el objetivo de evitar potenciales indisponibilidades de las líneas que pueden poner en riesgo la confiabilidad del sistema debido aumento de la demanda de energía eléctrica producto del crecimiento de proyectos de cannabis anualmente.

Por lo tanto, es probable que con las condiciones actuales del Sistema de Distribución Local este riesgo se presente ya que si bien, en el país hay 12 horas de luz efectivas al día durante todo el año, aún son necesarias al menos 6 horas de iluminación artificial adicional en los cultivos realizados en la modalidad de invernaderos que son la mayoría en el país, puesto que este sistema permite controlar factores ambientales externos que pueden llegar a afectar el cultivo.

Así mismo, se debe contemplar el gasto energético en los diferentes sistemas automatizados que funcionan durante el día y que garantizan el adecuado desarrollo y crecimiento de las plantas en las horas de luz solar como son los deshumificadores, estación meteorológica, circuito cerrado de televisión y demás consumos auxiliares propios de la operación del cannabis agroindustrial.

Finalmente, para producir los derivados del cannabis es necesario utilizar equipos de última tecnología para convertir la flor seca de cannabis en materia prima requerida en la producción de estos productos medicinales que se pueden comercializar en el país de acuerdo con la normatividad vigente. Dichos equipos pueden llegar a consumir incluso más energía de la que consume la planta de cannabis durante la etapa de cultivo, lo que puede generar fluctuaciones en la prestación del servicio de la energía en el Sistema de Distribución Local (SDL).

De acuerdo con (Ramirez et al. 2019) aproximadamente el 11 % de los costos directos asociados al cultivo de cannabis en Colombia hacen referencia al consumo energético necesario durante las etapas de producción y transformación del mismo, lo cual constituye un rubro muy importante dentro del cultivo de esta industria, que no solamente afecta a los cultivos sino también la estabilidad de los Sistemas de Distribución Locales SDL, si se tiene en cuenta la cantidad de proyectos que están a la espera de obtener viabilidad para iniciar operaciones.

Por lo tanto, con el crecimiento del sector surgen planteamientos adicionales encaminados hacia el desarrollo sostenible del sector agroindustrial de cannabis enfocados en contrarrestar los impactos socioambientales asociados al ciclo de vida de este. Por lo cual, dentro de este análisis, la inclusión de nuevas tecnologías como el uso de energías renovables juega un papel fundamental en el sector debido a que la integración por ejemplo de la energía solar fotovoltaica les permitiría a los productores de cannabis legal disfrutar de una significativa reducción en los costos de energía, además de contribuir a reducir significativamente su huella de carbono y finalmente tener unos indicadores financieros más robustos.

En materia energética Colombia es uno de los países pioneros generando valor en el desarrollo sostenible y la transición energética hacia fuentes no convencionales de energía renovable (FNCR) producto del acogimiento y cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, las metas de mitigación de emisiones de GEI de la COP21 y COP26 y las prácticas de sostenibilidad OCDE entre otros estándares de sostenibilidad.

Dicho lo anterior, el presente trabajo de grado de la modalidad de profundización analiza integralmente la viabilidad técnica, económica y ambiental del uso de la energía solar fotovoltaica (FNCR) en cultivos a mediana escala realizados en invernaderos de cannabis

implementando el autoconsumo para los requerimientos energéticos internos de los cultivos y de igual forma proponer medidas que permitan mejorar la eficiencia energética de la producción de cannabis por medio de la identificación de usos de la energía renovable dentro de los cultivos y de esta manera, disminuir los costos directos e indirectos asociados al consumo de energía en el ciclo de vida de los cultivos.

Esto se logra potenciando la sinergia entre el sector del cannabis agroindustrial y el uso de energía solar fotovoltaica (ESFV) beneficiando a los productores de la planta y sus derivados; este objetivo además es relevante para el país ya que permite el cumplimiento de los compromisos adquiridos en la COP 21 con respecto a: 51 % en cuanto a la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) para el año 2030 y 100% carbono neutro a 2050.

## VIII. Objetivos

### Objetivo General

- Evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de la implementación de un sistema de energía solar en cultivos de Cannabis agroindustriales.

### Objetivos Específicos

- Revisar el estado del arte de la implementación de sistemas de energía renovable en los procesos de producción de Cannabis agroindustrial
- Estimar los requerimientos energéticos asociados al ciclo de vida del Cannabis agroindustrial para la identificación de potenciales usos de energía renovable.
- Identificar las ventajas que ofrece la implementación de un sistema de energía solar en un cultivo de Cannabis agroindustrial.
- Evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de la implementación de un sistema integral de la energía en cultivos de Cannabis agroindustriales.

# 1 Estado del arte de la implementación de sistemas de energía renovable en los procesos de producción de Cannabis Agroindustrial

## 1.1 Historia del cannabis

El cannabis es originario de Asia central, se comenzó a cultivar en el Neolítico (7000 a.C.-3000 a.C.) difundándose hacia el este (China) y posteriormente hacia el oeste (Europa). Se domesticó el cannabis para diferentes fines, desde alimenticios hasta religiosos. Posteriormente, la planta se difundió por todo el territorio europeo llegando hasta la fachada atlántica (Kebors, Francia) y el sur de la Península Ibérica. Durante la Edad del Hierro, el cannabis se utilizó para quemarlo y aspirar su humo y de esta forma alcanzar estados místicos. (España 2019).

Durante los siglos VII hasta el siglo XIV fue utilizado en el islam hasta que comenzó a tildarse como propio de “sufíes y de asesinos”. Algo similar ocurrió en territorio europeo a partir del siglo V, en donde el cristianismo comenzó a prohibir cualquier sustancia enteógena, ya que era vista como propia de los seguidores de Satán. Sin embargo, el cannabis era utilizado en ungüentos de brujas y fue prohibido expresamente en una bula papal de Inocencio VIII en 1484 (España 2019).

Sin embargo, era una planta muy importante como para ser despreciada. Su mayor utilización durante la época fue en la elaboración de fibras tanto para vestimenta como para sogas y velas de los barcos. El papel para confeccionar los libros era fabricado con cáñamo. También se utilizaba como alimento gracias a sus cañamones y algunos boticarios y médicos lo utilizaban como medicamento (Hildegarda de Bingen, William Turner, Pietro Andrea Mattioli o Dioscobas Taberamontanus entre otros) (España 2019).

El cáñamo entró en América a partir del siglo XVI para ser utilizado principalmente en la elaboración de fibras, sin embargo, la mano de obra esclava estaba más interesada en sus propiedades psicoactivas. La llegada masiva de esclavos a Brasil se inició en la segunda mitad del siglo XVI. Los esclavos angoleños llevaron cannabis a las plantaciones del noreste de Brasil. No se sabe con certeza cuándo el cannabis se introdujo con fines recreativos en América pero se establecería su cultivo en algún momento posterior a 1549 (España 2019).

El cannabis era utilizado por la población esclava con fines religiosos y con fines festivos en sus cortos periodos de inactividad. En el siglo XVIII, se convirtió en una preocupación para la Corona portuguesa. Los indígenas y mestizos rurales adoptaron el consumo de cannabis para sus fines medicinales y sociales sin que llamara la atención de la clase alta. Este consumo pasó de Brasil al Caribe a finales del siglo XIX (España 2019).

A partir del siglo XIX, volvió a ponerse de moda el consumo de cannabis en Europa gracias a las tropas napoleónicas que estuvieron en Egipto. Los primeros consumidores de hachís fueron escritores, poetas y artistas que pensaban que el hachís podría mejorar su creatividad. Hacia 1835, el pintor Boissard y Moreau de Tours fundaron el Club de los Hashichines con la finalidad de llevar a cabo investigaciones psicológicas y con la esperanza de poder utilizar el cannabis en el tratamiento de algunas enfermedades mentales. Pertenecieron a este club Baudelaire, Dumas, Gaultier, Merimeé, de Musset, Delacroix, Meissonier, Nerval, Daumier o Flaubert (España 2019).

La prohibición mundial se consiguió durante 1961 en la Convención Única de Drogas de las Naciones Unidas. Se legisló para eliminar totalmente el uso mundial del cannabis en 25 años. La Conferencia tenía una nota de la OMS (Organización Mundial de la Salud) afirmando que no había ninguna justificación para el uso médico del cannabis. Lo más curioso es que cuatro

años más tarde, en 1964, los químicos Rafael Mechoulam y Gaoni de la Universidad de Jerusalén aislaron el principio activo del cannabis, el tetrahidrocannabinol o THC (España 2019).

La causa de que se tardase tanto en sintetizar el THC es por la tremenda complejidad de su estructura molecular. Supuso una nueva clase de compuestos, estructuralmente distintos de otras sustancias y con eficacia terapéutica demostrable. Desde este año, se estima que existen más de 1.000 compuestos en el cannabis, se han llegado a aislar más de 400 compuestos diferentes y al menos 60 de ellos son terapéuticos como es el caso de Canabidol CBD (España 2019).

Desde ahí se han venido descubriendo tratamientos a enfermedades comunes como el efecto antiepiléptico del canabidol, que se conoce por lo menos desde 1977. Hacía tiempo que se sabía que el cannabis se podía utilizar en algunos casos para controlar las convulsiones. Sin embargo, no se supo que el CBD era el compuesto responsable hasta cuando se publicó un estudio sobre los efectos anticonvulsivos del THC y del CBD en comparación, y en combinación, con los anticonvulsivos comúnmente usados de la época. El estudio descubrió que el CBD, pero no el THC, tenía un efecto “anticonvulsivo eficaz y relativamente potente” cuando se administraba a ratas, y que mejoraba la acción de numerosos otros antiepilépticos comunes cuando se administraban juntos (Endocanabinoide 2021).

En 1990, después de décadas de postular que la molécula psicoactiva THC debe actuar sobre un receptor proteínico específico y desconocido en el cuerpo, la Dra. Lisa Matsuda del Instituto Nacional de Salud Mental (NIMH) anunció que ella y sus colegas habían identificado y clonado, con éxito, ese mismo receptor. Al descubrimiento del receptor cannabinoide tipo I, o receptor CB1, como por lo general se le denomina, le siguió dos años más tarde el descubrimiento de la anandamida (el primer cannabinoide endógeno, o “endocannabinoide”), y en 1993, el descubrimiento de los receptores CB2. Por lo tanto, la ciencia médica era, por fin, consciente de la existencia de un nuevo sistema de mensajería biológica que demostraba ser de fundamental importancia para el metabolismo y la regulación de la salud (Endocanabinoide 2021).

En 2011, el Dr. Ethan Russo publicó una extensa revisión de la investigación existente sobre las interacciones entre los diferentes cannabinoideos y terpenos que se encuentran en la planta de cannabis. Varios estudios ya habían explorado muchas de estas interacciones, pero Russo fue el primero en acuñar el término “efecto séquito”. Como resultado, con este nuevo enfoque, la atención se ha centrado en la importancia de estudiar los efectos sinérgicos, en lugar de los efectos individuales, de los compuestos que se encuentran en la planta de cannabis, y ha puesto de manifiesto la necesidad de legislar para permitir el estudio y la utilización médica de todas las partes de la planta de cannabis, incluyendo el compuesto psicoactivo THC (Endocanabinoide 2021).

## **1.2 Transición legal del cannabis**

Fue a partir de la represión que recibía el cannabis, que empeoró con la Convención Única de las naciones unidas en 1961, en la que se empiezan a dar mayores esfuerzos políticos e investigaciones para exigir cambios en las leyes que prohibían el uso del cannabis. La Convención dio pie a una oleada de gran magnitud en cuanto a arrestos, fiscalizaciones y condenas severas que no tenía precedente. En Estados Unidos, los delitos relacionados con drogas aumentaron en un 94 % entre 1966 y 1967. Las cárceles empeoraron sus condiciones de hacinamiento, los jóvenes fueron arrestados por posesión y condenados con penas severas y los abusos policiales se volvieron recurrentes (Zuleta et al. 2021).

Frente a este panorama, se comisionaron informes en el Reino Unido, Países Bajos, Estados Unidos, Canadá, Australia y otros países que a grandes rasgos llegaban a la misma conclusión: las medidas impuestas en contra del cannabis eran excesivas, especialmente con respecto al uso personal, y, si bien su consumo merecía precaución, los peligros que se publicitaban en los diferentes medios eran exagerados (Zuleta et al. 2021) (Zuleta et al. 2021).

En 1979 cuando el entonces presidente Carter aceptó las recomendaciones del Informe Shafer y se empezaron a promover leyes que eliminaran las severas sanciones contra el consumo y el porte de Cannabis. Sin embargo, era claro que la despenalización no representaba legalización y los cambios de Carter fueron revertidos con la llegada del presidente Ronald Reagan. Las recomendaciones de la Comisión Shafer en Estados Unidos, de 1972, al igual que las del reporte Wootton en Reino Unido, de 1968, establecieron que el cannabis era menos nocivo que el alcohol y sentaron precedentes para las leyes de regulación (Zuleta et al. 2021).

Holanda fue de los primeros países en dar luces sobre la despenalización del cannabis, en 1976. Las primeras iniciativas de leyes se dieron en San Francisco (EE. UU.), en 1991. La Propuesta P, fue aprobada con el 79 % de los votos en noviembre del mismo año, fue presentada en esta ciudad y se reconoce como el primer proyecto de cannabis medicinal. A través de esta ley, se les autorizó a los médicos prescribir el cannabis con fines terapéuticos (Zuleta et al. 2021).

Esta iniciativa dio paso a que, cinco años más tarde, California se convirtiera en el primer estado en legalizar el cannabis medicinal por medio de la Proposición 215. Esta proposición les permitió a los pacientes de sida y cáncer, entre otros, portar, consumir y cultivar marihuana para el tratamiento y manejo de sus enfermedades. Asimismo, permitió que los médicos pudieran formular cannabis sin ser penalizados (Zuleta et al. 2021).

Tanto la Propuesta P, como la Proposición 215 fueron impulsadas por médicos, científicos y, en ocasiones sin reconocimiento, por la comunidad LGBTIQ y personas afectadas por el sida. Entre ellas se destacan Dennis Perón, ampliamente reconocido como el padre del cannabis medicinal y activista clave en la elección de Harvey Milk, quien fue el primer funcionario abiertamente homosexual elegido en el estado de California (Koslow, 2019). Tras la Proposición 215, se empezó a difundir a nivel nacional la estrategia política ideada en California para legalizar el cannabis medicinal por medio de referendos (Zuleta et al. 2021).

En 1998, Alaska, Oregón y Washington se convirtieron, en ese orden, en los siguientes estados en legalizar el cannabis medicinal. Alaska aprobó la Ballot Measure 8, que entró en vigor en 1999 y permitió que los pacientes con fórmula médica escrita usaran, portaran y sembraran cannabis. Las medidas de Oregón y Washington (medidas 67 y 692, respectivamente), al igual que la de Alaska, se enfocaron en los beneficios y permisos médicos (Zuleta et al. 2021).

Con el ímpetu que venía tomando el cannabis medicinal, el movimiento prorregulación aplicó una estrategia parecida -basada en referendos a nivel estatal- con el cannabis de uso adulto o social sin fines medicinales. Los estados de Colorado y Washington fueron los pioneros, en 2012. Iniciativas parecidas se adelantaron exitosamente en Alaska y Oregón, en 2014, y en California, Maine, Massachusetts y Nevada, en 2016. En Estados Unidos, quince estados, más el Distrito de Columbia, ahora permiten el uso recreativo del cannabis y por lo menos treinta estados tienen leyes que permiten el cannabis de uso medicinal (Zuleta et al. 2021).

Del mismo modo, varios países del mundo han aprobado leyes para legalizar el cannabis medicinal y con fines recreativos por lo que el debate sobre la legalización del cannabis está encima de la mesa en muchos países. Aunque su uso recreativo sigue suscitando muchas dudas y tan solo un puñado de países lo han regulado (Uruguay, precisamente, fue pionero al hacerlo en América Latina en 2013), su uso terapéutico parece comenzar a generar cierto consenso.

Algunas pruebas clínicas sugieren que puede ayudar a reducir las náuseas en pacientes con quimioterapia y algunos síntomas de la esclerosis múltiple y otras alteraciones del movimiento, aunque hay algunos países, como España, que aún creen que no hay suficiente evidencia científica para recomendar su uso generalizado (Mundial 2022).

En la Figura 1.1 se muestra el estado actual del uso de cannabis alrededor del mundo, en esta se puede ver en las diferentes escalas de color verde en qué países el uso es legal de manera recreativa y medicinalmente, en qué países es legal únicamente de manera medicinal, en qué países es considerado descriminalizado y finalmente, los países en los que aún es considerado ilegal en color gris. De igual forma, en la Figura 1.1 se puede confirmar que, si bien aún son más los países en los que la planta es considerada ilegal, cada vez son más los países que se suman al uso del cannabis principalmente por sus propiedades medicinales.

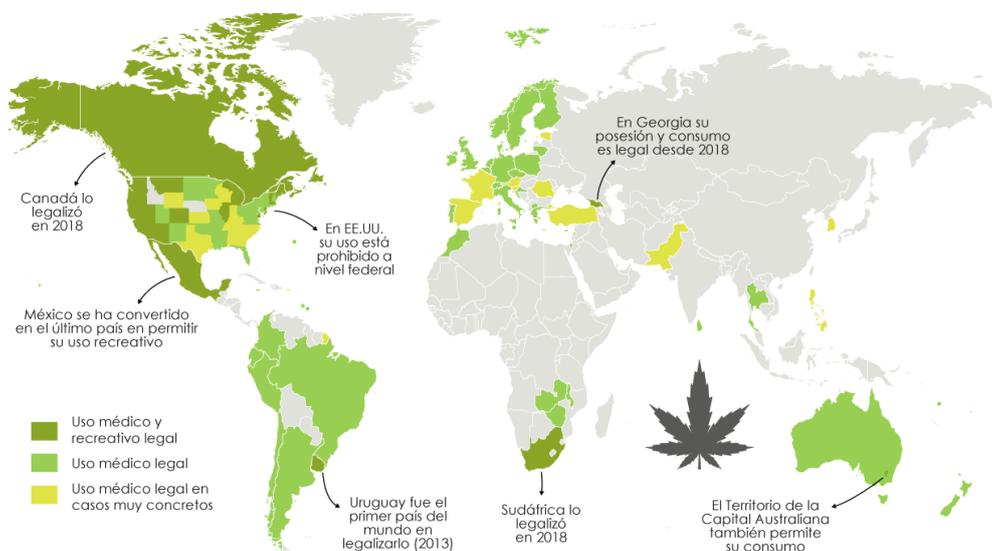


Figura 1.1 Situación del cannabis en el mundo

Fuente: (Mundial 2022)

### 1.3 Mercado Internacional

New Frontier Data estima que el mercado global de cannabis, considerando tanto el regulado como el ilícito, tiene un valor de unos USD \$344.000 millones que se da principalmente en los países que se muestran en la Figura 1.2. los cinco principales mercados regionales son Asia, con USD\$132.900 millones; Norteamérica con USD\$85.600 millones; Europa con USD\$ 68.500 millones; África que asciende hasta USD\$37.300 millones y América Latina, con USD\$9.800 millones (República 2022a).

Sin embargo, en las proyecciones para el mercado legal de cannabis se estima que solo en este rubro se producen cerca de US\$150.000 millones al año en todo el mundo. El mercado tuvo una tendencia de crecimiento de entre US\$45.000 millones y US\$67.000 millones el año pasado, mientras que se proyecta que supere US\$100.000 millones en beneficios económicos para 2024 (República 2022a).



Figura 1.2 Mercado del cannabis en el mundo

Fuente: (República 2022a)

Ahora bien, la flexibilización de algunos países en materia de regulación para el uso médico y recreativo del cannabis ha hecho que la planta cobre gran popularidad y que se haya empezado a cotizar dentro de los mercados internacionales como un commodity o bien de consumo básico. De acuerdo con Giadha Aguirre de Carcer, directora ejecutiva de New Frontier Data, la industria legal del cannabis se ha vuelto verdaderamente global. Incluso, frente a una prohibición generalizada, el consumo de cannabis crece y las actitudes y las percepciones desafiantes sobre el consumidor típico continúan cambiando (República 2022a).

El principal ejemplo es Canadá, que primer país de América y uno de los seis en el mundo que ha legalizado todos los usos de la planta. Allí, la industria, hasta el primer trimestre de 2020, tenía un valor de US\$5.500 millones, que representan 0,3% del PIB del país. Otro de los países que también apuesta a la legalidad es Estados Unidos en donde el cannabis se volvió legal para el uso adulto en 15 estados y en el Distrito de Columbia, mientras que 36 estados permiten alguna forma de comercialización para uso estrictamente medicinal (República 2022a).

Italia es uno de los países europeos que permiten la venta legal de cannabis y la distribución para tratamientos médicos. Allí, la venta de la llamada ‘marihuana ligera’ está regulada por una ley que estipula que los productos a base de hoja de cannabis deben permanecer entre 0,2% y 0,6% de THC, es decir, el compuesto psicoactivo de la planta. Gracias a esta regulación, los cultivos legales, hasta finales de 2019, ascendían a 4.000 hectáreas y el mercado de la planta representó un volumen anual de US\$47,8 millones (República 2022a).

En, en Alemania, la situación es completamente diferente. Este país aparte de tener la economía más grande de Europa, también se encarga de financiar directamente la producción de cannabis medicinal en el territorio, autorizó una ley que obliga al sistema de salud a que al menos cinco onzas del suministro de medicamentos de todos los pacientes cada mes estén basadas en cannabis. Hasta 2019, este mercado representaba US\$87,2 millones a la economía nacional (República 2022a).

En el lado sur del continente, solo Uruguay ha legalizado completamente el uso, la producción y distribución de marihuana medicinal y recreativa. Allí, la legalización de la planta, según las estimaciones del gobierno local, desde 2013, le ha quitado cerca de US\$22 millones al negocio

del narcotráfico, lo que le ha valido al país un ingreso de US\$45,5 millones por un mercado de 40 toneladas anuales (República 2022a).

## **1.4 Cannabis en Colombia**

### **1.4.1 Historia del cannabis en Colombia**

En Colombia se data la llegada del Cannabis de manera ilegal hacia 1920 a través del océano Atlántico. Barranquilla fue la primera ciudad en donde la planta empezó a ser consumida, en su mayoría por clases marginadas y primordialmente entre la población que habitaba y trabajaba alrededor de los puertos como marineros, estibadores entre otros que transcurrían en la ciudad (Martinez 2019).

Hacia mediados de la década de 1920 el gobierno empezó a preocuparse por el consumo de esta sustancia y su rápida propagación a otras zonas costeras del país como Cartagena y Santa Marta. Sin embargo, para entonces Colombia tenía legislación contra el tráfico de drogas por medio de la Ley 11 de 1920, en concordancia con los acuerdos de Shanghái y La Haya, que luego fue reforzada bajo el gobierno de Alfonso López Pumarejo (1934-1938) cuando sancionó el tráfico, el consumo y comercio de narcóticos a través del Código Penal (Martinez 2019).

En la década de 1960, los movimientos contraculturales, el hipismo, así como la crisis del sector cafetero y de cultivo de algodón, impulsaron la economía ilegal al punto que en plena bonanza el 80 % de los campesinos de la costa Atlántica cultivaban marihuana. Para la década de 1970 Colombia era mundialmente conocida por ser el mayor exportador de cannabis y para 1978 esta representaba cerca del 40 por ciento de las exportaciones nacionales (Martinez 2019).

Es así como durante varias décadas el gobierno colombiano ha luchado de la mano de la comunidad internacional para erradicar la producción y consumo de drogas por la vía de la prohibición y la fuerza. Sin embargo, los resultados de estas políticas han sido poco efectivos. De allí que la entrada en vigor de la Ley 1787 del 2016 le abrió las puertas a la transición de la industria en Colombia.

Actualmente, se está tramitando en el Congreso de la República la aprobación de un proyecto de ley que legalice totalmente el cannabis, situación favorable para el país ya que puede mejorar sus exportaciones aprovechando las ventajas geográficas, logísticas, climatológicas y económicas, así como la transición en varios países en donde el cannabis es legal total o parcialmente y que han puesto los ojos en Colombia pues es percibido como una futura potencia en producción de cannabis para uso medicinal y recreacional (Martinez 2019).

### **1.4.2 Marco normativo de la producción de cannabis**

La reglamentación del uso de cannabis en Colombia dio sus primeros pasos hace más de tres décadas por medio de la ley 30 de 1986, en la que se adoptó el Estatuto Nacional de Estupefacientes, la cual en su tercer artículo determina que “La producción, fabricación, exportación, importación, distribución, comercio, uso y posesión de estupefacientes, lo mismo que el cultivo de las plantas de cuales estos se produzcan, se limitaba a los fines médicos y científicos” (Castañeda y Ordóñez 2019).

Por medio de la resolución 1478 de 2006 “se expidieron normas para el control, seguimiento y vigilancia de la importación, exportación, procesamiento, síntesis, fabricación, distribución, dispensación, compra, venta, destrucción y uso de este tipo de sustancias y de medicamentos o cualquier otro producto que las contenga”.

Debido a la problemática del narcotráfico en Colombia, en 2015 el gobierno expidió el decreto 2467, que permitió reglamentar este proceso, con el que se logró otorgar las primeras licencias de producción y fabricación de derivados de cannabis a cuatro empresas colombianas (Cannalivio, Pideka, Ecomedics y Econabis), una firma canadiense (Cannavida) y una empresa colombo-canadiense (Pharmacielo) (Castañeda y Ordóñez 2019).

Debido al auge que ha tenido el cannabis medicinal durante los últimos años, en 2016 se expidió la Ley 1787 de 2016, que derogó el marco legal anterior, y estableció el marco regulatorio del uso de cannabis y sus derivados con fines médicos y científicos en el territorio colombiano, permitiendo su uso seguro e informado. Además, se establecieron los lineamientos de las licencias y cupos para uso de semillas para siembra, cultivo de plantas, fabricación de productos derivados del cannabis, proceso de distribución nacional y comercio exterior, entre otros (Castañeda y Ordóñez 2019).

El decreto 613 de 2017, que reglamentaba la ley, estableció las diferencias entre cannabis no psicoactivo que consiste en productos con un contenido menor al 1% de tetrahidrocannabinol (THC) y cannabis psicoactivo que consiste en productos con un contenido mayor al 1% de tetrahidrocannabinol (THC), reguló la comercialización en investigación de semillas e incluyó beneficios para los pequeños productores y agricultores de cannabis medicinal (Castañeda y Ordóñez 2019).

En cuanto al proceso de reglamentación de la producción y transformación de cannabis medicinal, el gobierno expidió cinco resoluciones. Donde la más importante fue la resolución 579 de 2017 que establece los criterios para determinar quiénes serán considerados cultivadores pequeños y medianos, con sus respectivos beneficios, y define los requisitos técnicos y las tarifas para el cultivo, transformación de la planta en productos medicinales, Fito terapéuticos y homeopáticos. Adicionalmente, se establece que el 10% del total de la producción usada por el transformador deberá provenir de un pequeño y mediano cultivador (Castañeda y Ordóñez 2019).

Respecto al proceso de transformación de la planta, el Ministerio de Salud fijó las tarifas de las licencias que las empresas que desarrollan este proceso deben pagar por medio de la Resolución 2891 de 2017 y establece la normativa técnica que deben seguir, así como las cantidades máximas que se autorizan para transformar y el protocolo de seguridad que se debe implementar en los sitios de investigación y procesamiento de cannabis por medio de las resoluciones 2891 y 2892 de 2017, respectivamente. Por otro lado, las resoluciones 577 y 578 de 2017, expedidas por el Ministerio de Justicia, establecen los lineamientos técnicos y de seguimiento relacionados con las licencias para el cultivo de cannabis psicoactivo y no psicoactivo y el uso de semillas (Castañeda y Ordóñez 2019).

El Gobierno Nacional expidió el Decreto 811 de 2021, que marcó una nueva hoja de ruta para el uso de cannabis en Colombia. El Decreto no solamente se limitó a los usos medicinales o farmacéuticos del cannabis, sino que además entró en detalle en relación con los usos industriales de la planta, tales como la fabricación de fibras, bebidas, alimentos, biocombustibles y suplementos dietarios, que podrían ser producidos en el país. Así, se reafirmó la presencia de la industria del cannabis en Colombia como una de las más prometedoras en el marco de la reactivación económica (Brigard Urrutia 2022).

Sin embargo, varios de los aspectos contemplados en el Decreto 811 quedaron sujetos a reglamentación, la cual fue recientemente expedida a través de la Resolución 227 del 2022 del Ministerio de Salud. Esta última se propuso establecer los requisitos correspondientes a las licencias, cupos y al uso de los componentes de la planta de cannabis y sus derivados en

productos industriales y para el consumo humano. Adicionalmente, estableció las condiciones para el uso del grano, los distintos componentes del cannabis, la planta como tal, sus derivados y productos terminados industriales (Brigard Urrutia 2022).

Si bien podría decirse que la Resolución 227 contempla aspectos netamente procedimentales, lo cierto es que aclara el camino que las empresas que se quieran dedicar a esta industria deben seguir para la obtención de una de las siete licencias indicadas en el Decreto 811. Dentro de ellas se incluye: la licencia de fabricación de derivados del cannabis, para el manejo de semillas, para el cultivo, entre otras. Es decir, que el alcance de la Resolución va más allá de la determinación de los requisitos y trámites por cumplir y marca el verdadero inicio de una nueva etapa para esta industria en Colombia, por medio de una regulación de vanguardia a comparación de otros países de la región (Brigard Urrutia 2022).

Finalmente, el Gobierno Nacional expidió la resolución 539 que reglamenta el Decreto 811 de 2021 sobre las operaciones de comercio exterior de semillas para siembra, grano, componente vegetal, planta de cannabis, cannabis y derivados de cannabis. Así, los interesados en exportar, desde el territorio aduanero nacional o desde zona franca, e importar a Colombia productos relacionados con el cannabis, deberán presentar la solicitud en la Ventanilla Única de Comercio Exterior (VUCE), adjuntando los vistos buenos de las autoridades competentes (El Tiempo 2022).

### **1.4.3 Mercado Nacional**

Actualmente, en Colombia existen más de 57.000 hectáreas de cultivos de plantas de Cannabis en todo el país. A 2030 se proyecta un aumento considerable, teniendo en cuenta que hay más de 4.000 pequeños y medianos productores en espera de la aprobación para producir Cannabis. Sin embargo, debido al controversial uso que se le da a la planta, los adelantos en su aprobación para su uso, su distribución y su aprovechamiento avanzan de manera muy lenta (Agronegocios 2022).

Mientras que en Colombia actualmente se busca dar solución a la reglamentación, la industria del cannabis medicinal y recreativo a nivel mundial mueve entre US\$4.200 y US\$5.200 millones anuales. Según el Centro Económico y Social de Fedesarrollo, Colombia contribuye con US\$99 millones, una cifra pequeña en proporción con el potencial que tiene el territorio nacional. Esto se debe a que “Las empresas con la nueva legislación pueden atender mercados externos de toda esta cadena agroindustrial. Para el mercado interno, falta la reglamentación del uso del CBD en alimentos y bebidas”, en la Figura 1.3 se puede ver el panorama de los principales consumidores de cannabis en el mundo y la participación del mercado colombiano en el mismo (Agronegocios 2022).



Figura 1.3 Panorama de la Industria de Cannabis en Colombia

Fuente: (Agronegocios 2022)

La industria del cannabis tiene tal potencial que la gran mayoría de cultivadores formalizados ya tienen prototipos de productos alimenticios, cosméticos, medicinales y terapéuticos creados y testeados para lanzarlos al mercado, una vez se dé la aprobación de la dosificación del uso de CBD en humanos y animales. Es importante resaltar que el uso de esta molécula se encuentra aprobado en Colombia, pero como aún no se establece la dosificación, las empresas están con a la espera para comercializar productos con CBD puesto que a la fecha solo puede extraer materia prima de las plantas y ese material se está exportado a países de Europa, Estados Unidos y Latinoamérica (Agronegocios 2022).

Sin embargo, los avances en la materia dentro del territorio nacional han permitido que los cultivos de cannabis en Colombia estén tecnificados de tal forma que el país sea pionero en investigación, producción y transformación de esta planta. Al punto de desarrollar una gran variedad de productos entre los cuales se pueden encontrar bebidas, alimentos y cosméticos, utilizando su tecnología de CBD soluble en líquidos y sólidos (Agronegocios 2022).

Esto significa que el camino que queda por recorrer hacia la comercialización total del cannabis parece corto, sin embargo, se requiere de voluntad política y educación en el país. Una vez se establezca la dosificación, la industria del cannabis en el territorio el sector podrá despegar, de tal forma que sea considerado por otros países como una potencia de la inversión, producción y comercialización de cannabis.

#### 1.4.4 Sinergias entre el sector de cannabis agroindustrial y sector energético

Teniendo en cuenta los elevados requerimientos de energía eléctrica de los cultivos de cannabis Medicinal que se traducen en costos más de producción de flor seca de cannabis y sus derivados, es pertinente buscar una solución sostenible para el sector que permita no solo disminuir estos costos de producción sino que, además permita el crecimiento orgánico del mismo teniendo en cuenta el panorama normativo favorable del sector en dónde ya se permite la venta de flor seca de cannabis (El Tiempo 2022) y actualmente se está debatiendo en el Congreso de la República el proyecto de ley que regula el cannabis de uso adulto.

En la misma línea se encuentra la transición energética del país que de acuerdo con el compromiso hacia la descarbonización en diciembre de 2020, publicó una actualización de sus contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC) presentadas a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en donde el país se comprometió a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 51 % para 2030 (en comparación con el escenario de referencia) y a trabajar para lograr la neutralidad de carbono para 2050.

Posteriormente, Colombia ha dado varios pasos importantes para transformar sus intenciones en acciones (Banco Mundial 2022).

En línea con lo anterior, se implementó la Ley 1715 de 2014 que tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las Fuentes No Convencionales de Energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las Zonas No Interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético (Alberto y Marín 2014). Esta Ley está orientada a:

- i. Orientar las políticas públicas y definir los instrumentos tributarios, arancelarios, contables y de participación en el mercado energético colombiano que garanticen el cumplimiento de los compromisos adquiridos por el Gobierno Nacional (Alberto y Marín 2014).
- ii. Incentivar la penetración de las Fuentes No Convencionales de Energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético colombiano, la eficiencia energética y la respuesta de la demanda en todos los sectores y actividades, con criterios de sostenibilidad medioambiental, social y económica (Alberto y Marín 2014).
- iii. Estimular la inversión, la investigación y el desarrollo para la producción y utilización de energía a partir de Fuentes No Convencionales de Energía, principalmente aquellas de carácter renovable, mediante el establecimiento de incentivos tributarios, arancelarios o contables (Alberto y Marín 2014).

Los beneficios que se pueden obtener de la presente Ley se describen a mayor detalle en la Tabla 1.1.

<b>Beneficios</b>	<b>Descripción General</b>
5.1. Dedución especial en la determinación del impuesto sobre la renta. <ol style="list-style-type: none"> <li>i. Artículo 11 de la Ley 1715 de 2014.</li> <li>ii. Artículo 2.2.3.8.2.1. y siguientes del Decreto 2143 de 2015 (incorporado al Decreto 1073 de 2015).</li> </ol>	Los contribuyentes declarantes del impuesto sobre la renta que realicen directamente nuevas erogaciones en investigación, desarrollo e inversión para la producción y utilización de energía a partir FNCE o gestión eficiente de la energía, tendrán derecho a deducir hasta el 50% del valor de las inversiones. El valor por deducir anualmente no puede ser superior al 50% de la renta líquida del contribuyente.
5.2. Depreciación acelerada. <ol style="list-style-type: none"> <li>i. Artículo 14 de la Ley 1715 de 2014.</li> <li>ii. Artículo 2.2.3.8.5.1. del Decreto 2143 de 2015 (incorporado al Decreto 1073 de 2015).</li> </ol>	Gasto que la ley permite que sea deducible al momento de declarar el impuesto sobre la renta, por una proporción del valor del activo que no puede superar el 20% anual.
5.3. Exclusión de bienes y servicios de IVA. <ol style="list-style-type: none"> <li>i. Artículo 12 de la Ley 1715 de 2014.</li> <li>ii. Artículo 2.2.3.8.3.1. del Decreto 2143 de 2015 (incorporado al Decreto 1073 de 2015).</li> </ol>	Por la compra de bienes y servicios, equipos, maquinaria, elementos y/o servicios nacionales o importados.

Beneficios	Descripción General
iii. Ley 1715 art. 12, Decreto 2143 Artículo 2.2.3.8.3.1.	
5.4. Exención de gravámenes arancelarios. i. Ley 1715 art. 13, Decreto 2143 de 2015 Arts. 2.2.3.8.4.1.	Exención del pago de los Derechos Arancelarios de Importación de maquinaria, equipos, materiales e insumos destinados exclusivamente para labores de pre-inversión y de inversión de proyectos con FNCE.

*Tabla 1.1 Beneficios de la Ley 1715 de 2014*

Fuente: (Alberto y Marín 2014)

Adicionalmente, con el objetivo de diversificar la matriz de generación, el gobierno nacional por medio de la Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG emitió la resolución 030 del 2018 que regula las actividades de autogeneración a pequeña escala (capacidad inferior a 100 kW) y generación distribuida al Sistema Interconectado Nacional, que consiste en instalar un sistema de generación de energía para el autoconsumo de sus actividades y poder entregar los excedentes de generación al Sistema Interconectado Nacional o quien haga sus veces.

En este sentido, existe una sinergia que puede ser aprovechada en la normatividad Colombiana de los sectores de cannabis agroindustrial y energía eléctrica, en cuanto a la construcción sostenible de un sistema solar fotovoltaico capaz de entregar la requerida energía durante las horas de radiación solar, garantizando que la energía que no sea consumida en este horario pueda ser entregada al Operador de Red por medio del modelo de autogeneración, con el fin de mejorar los indicadores de tanto del cultivo como de la estabilidad de la red.

La agroindustria del cannabis puede adoptar el modelo de Autogenerador y vender sus excedentes al sistema en el que siempre contará con un comprador por defecto y su energía se pagará de dos maneras (Alberto y Marín 2014):

- i. Intercambio: Cuando la cantidad de energía que se autogenera en un periodo es inferior o igual a la cantidad de energía que se recibió de la red, independientemente de la hora del día en que se entrega o se recibe. En este caso se intercambia la energía excedente entregada con la recibida y solamente se paga al prestador del servicio un pequeño valor (aproximadamente el 10% del costo de dicha energía) (Alberto y Marín 2014).
- ii. Venta: Cuando la cantidad de energía que se autogenera en un periodo es superior a la cantidad de energía que se recibió de la red. En este caso, dado que hay un “sobrante” de energía respecto de la que se requiere para el consumo personal, este excedente de energía se vende al sistema por el costo al que se encuentra el kWh en la factura quitándole el componente de comercialización. Esta liquidación aparecerá como un saldo a favor en su factura (Alberto y Marín 2014).

## 1.5 Descripción de los tipos de cultivo de cannabis

### 1.5.1 Tipos de cultivo de cannabis

El cultivo en exteriores (ver Fotografía 1.1) ha sido el método tradicional y original de cultivar el cannabis históricamente. las principales ventajas de este tipo de cultivos son que se suelen producir plantas y flores cosechadas de mayor tamaño, adicionalmente no se necesita de un equipamiento especial para su desarrollo, en comparación con los otros tipos de cultivo que representa costos adicionales para la producción (Cardona 2019).

Aunque los costos son más bajos, este método está sujeto a factores que no se pueden controlar como es el caso de las condiciones meteorológicas y los recursos naturales, además de la gestión inadecuada de los recursos de suelo y agua y el control de plagas que pueden provocar problemas críticos sobre los cultivos de cannabis (Zheng, Fiddes, y Yang 2021).



*Fotografía 1.1 Cultivo de cannabis en exteriores*

Fuente: (Semillas de Cannabis 2020)

Los cultivos en interiores o Indoor (ver Fotografía 1.2), son ambientes totalmente controlados de manera artificial, lo que da como ventaja que se puedan conseguir varias cosechas en un año. A su vez, al manejar las condiciones que recibe la planta, se puede adaptar el cultivo a las necesidades medicinales que se requiera. Su mayor desventaja es que requiere de un equipamiento especial (carpa, focos, ballast, sistema de ventilación, temporizadores, macetas y sustratos) para mantener estable el ambiente dentro del cultivo y que eleva directamente proporcional el costo del cultivo (Cardona 2019).



*Fotografía 1.2 Cultivo en Invernadero e interiores*

Fuente: (Semillas de Cannabis 2020)

En este escenario, reducir el impacto ambiental global de la agricultura del cannabis en invernadero es vital para mantener la sostenibilidad ambiental. Sin embargo, hay una falta de

principios sistémicos hacia el cultivo sostenible de cannabis porque sus impactos ambientales siguen sin estar totalmente claros ya que es un sector nuevo. En este sentido, a raíz de la legalización sin precedentes del cannabis en diferentes países del mundo, existe una necesidad apremiante de una revisión completa de su evaluación ambiental que mida de manera adecuada los impactos generados por un cultivo de cannabis tanto en interiores como en invernadero (Zheng et al. 2021).

### 1.5.2 Proceso de cultivo de cannabis en invernadero

Los cultivos de cannabis medicinal normalmente constan de actividades principales como la preparación del terreno, siembra, germinación, corte y manicurado, producción de derivados y comercialización de cannabis como se puede ver en Figura 1.4.

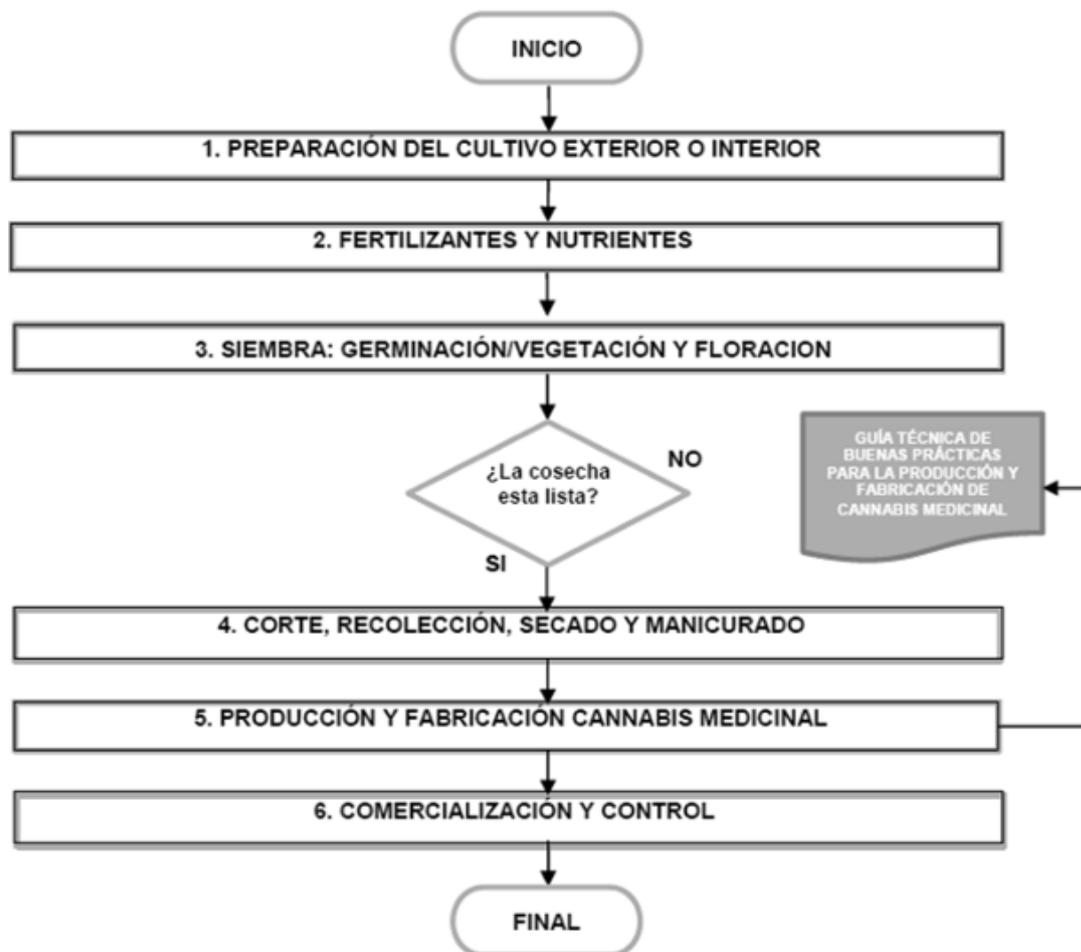


Figura 1.4 Actividades principales del proceso de cultivo de cannabis en invernadero

Fuente: UNAL 2019

En la Figura 1.4 se muestra el detalle de cada una de las etapas que compone el ciclo de vida de la planta. La etapa inicial del cultivo de cannabis es el proceso de replicar una cepa genética, generalmente realizada a través de la clonación de seres vivos, es comúnmente conocida como etapa de germinación o etapa de propagación, las plantas clonadas generalmente se mantienen iluminadas durante periodos de tiempo entre 18 y 24 horas al día durante 1o 2 semanas dependiendo los requerimientos de las plantas.

Los niveles óptimos de temperatura y humedad relativa para el cannabis durante la etapa de germinación son de 20 a 25°C y en promedio 70% de humedad relativa. Esta etapa del cultivo generalmente representa menos del 5% del total consumo de energía (UNAL 2019). Así mismo, Los requerimientos energéticos se encuentran asociados a las diferentes etapas del cultivo de cannabis.

En la siguiente etapa, conocida como etapa vegetativa, los clones se trasplantan a un área que tiene mayor intensidad de luz, por tal razón esta etapa es la responsable de consumir aproximadamente el 30-40% del uso total de la energía requerida durante el ciclo de vida del cultivo. Según la cepa y la preferencia del cultivador, las plantas permanecen en esta etapa durante aproximadamente 2 a 3 semanas en cultivos al interior, o de 4 a 6 semanas en cultivos de invernadero durante 18 a 24 horas al día. Los niveles óptimos de temperatura y humedad relativa para el cultivo de cannabis en esta etapa son 20 a 24 °C y 50% promedio de humedad relativa (UNAL 2019).

Por último, en la etapa de floración, se cambia el horario de luz para inducir una respuesta hormonal en la planta hacia la proliferación de la flor. En esta etapa del cultivo de cannabis se requieren de 12 horas de luz por día, durante un periodo de tiempo de entre 6 a 8 semanas; los niveles óptimos de temperatura y humedad relativa para el cultivo de cannabis durante esta etapa son de 20 a 28°C y en promedio 50% de humedad relativa (UNAL 2019). En la Figura 1.4 se muestra el ciclo de vida completo de un cultivo de Cannabis.

Para llevar a cabo un cultivo de cannabis en el territorio nacional bajo invernadero normalmente se aplican las siguientes etapas y se necesitan ambientes controlados que garanticen el adecuado crecimiento de la planta por medio de los requerimientos energéticos que se muestran en la Tabla 1.2.

<b>Requerimientos energéticos Cultivo de Cannabis</b>			
<b>Germinación</b>	<b>Crecimiento</b>	<b>Floración</b>	<b>Transformación</b>
3 - 5 semanas	2 - 8 semanas	6 - 8 semanas	3-6 semanas
Baja intensidad de Luz	Alta intensidad de Luz	Alta intensidad de Luz	Alta intensidad de Luz
Humedad relativa promedio 70%	Humedad relativa promedio 50%	Humedad relativa promedio 50%	Humedad relativa promedio 30 %
18 a 24 horas de luz al día	18 a 24 horas de luz al día	12 horas de luz al día	12 horas de luz al día
Temperatura promedio 20 – 25 oC	Temperatura promedio 20 – 24 oC	Temperatura promedio 20 – 28 oC	Temperatura promedio 20 – 24 oC

*Tabla 1.2 Etapas de cultivo de cannabis*

Fuente: (UNAL 2019)

### **1.5.3 Elaboración de derivados**

Luego de obtener el porcentaje final de flor seca de cannabis se procede a realizar el tratamiento físico químico que permite extraer el aceite de cannabis por medio de la separación de fluidos (ver Fotografía 1.3) a través de diferentes métodos de los cuales, los métodos más utilizados se describen en los numerales 1.5.3.1 al 1.5.3.4; este aceite es el insumo base para la preparación de los diferentes derivados que se pueden obtener de esta planta. Para llevar a cabo esta transformación, en esta etapa del ciclo de vida es en donde más se consumen energía debido a los equipos intensivos en consumo de energía.



*Fotografía 1.3 Aceite de cannabis*

Fuente: (UNAL 2019)

#### **1.5.3.1 Extracción por fluidos supercríticos**

La extracción de derivados por medio de fluidos supercríticos es aquella en la que, por medio de la utilización de solventes, aplicación de una temperatura y presión deseada, se extraen productos o compuestos de materiales para su uso comercial, industrial, medicinal y científico. Este proceso de extracción es de tipo sólido líquido, el cual se realiza dentro de una cámara donde el solvente está en condiciones supercríticas (Cotrina 2020).

Una vez transcurrido el tiempo de extracción, la mezcla Solutosolvente que sale de la cámara, es separada en un recipiente donde el soluto extraído es colectado en el fondo, y el solvente es retirado como gas; debido al cambio de fase generado con la despresurización. La ventaja de estos solventes es que son sometidos a su fase crítica, estos no son considerados como gases o líquidos si no como un fluido supercrítico y por lo tanto tiene propiedades termodinámicas de ambos estados (Cotrina 2020).

Este proceso de extracción consta de cuatro etapas que se describen a continuación y de manera gráfica se pueden ver en la Figura 1.5

- i. Presurización: En esta etapa, la presión se eleva por encima de la presión crítica de la sustancia a emplear como solvente.
- ii. Ajuste de temperatura: La temperatura se eleva o disminuye con el fin de llevar el solvente a la temperatura adecuada de extracción.
- iii. Extracción: El fluido supercrítico entra en contacto con la muestra que contiene el soluto de interés en el extractor.
- iv. Separación: El soluto se libera mediante la descompresión del solvente a una presión inferior.

La extracción de fluidos supercríticos puede realizarse mediante diferentes tipos de procesos: por lotes, flujo continuo o semicontinuo. El proceso por lotes es donde la cantidad de solvente/soluto se fija dentro de un recipiente de extracción y, después del procesamiento, el recipiente se despresuriza sin ninguna exposición adicional al disolvente SCF (por sus siglas en inglés Super Critical Fluids) nuevo. En el proceso de flujo continuo, la cantidad de solvente de SCF no se fija y el SCF nuevo se alimenta continuamente al recipiente de extracción que contiene el soluto. La disposición del proceso semicontinuo implica una combinación de los

tipos de extracción de SCF por lotes y continuos, donde el proceso se cambia entre los dos tipos con la misma muestra (Cotrina 2020).

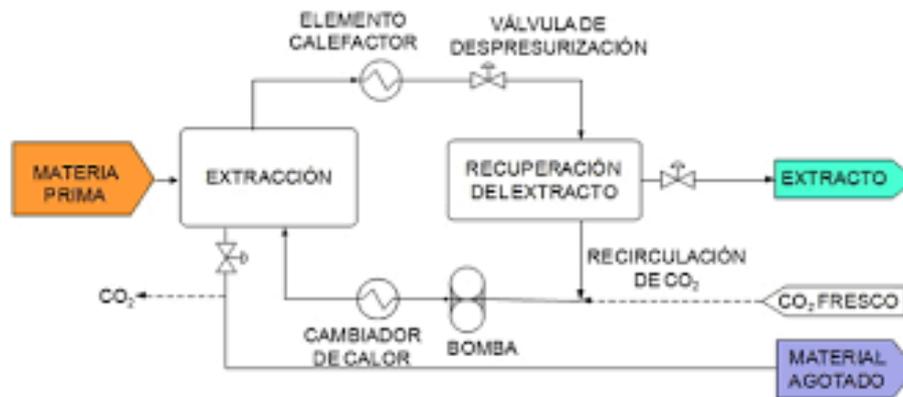


Figura 1.5 Extracción de fluidos supercríticos

Fuente: Cotrina 2020

### 1.5.3.2 Extracción por alcohol/etanol

Proceso de extracción utilizado para obtener aceites esenciales de la planta cannabis usando como solventes el etanol o el isopropílico. El solvente utilizado disuelve la resina de cannabis localizadas en los cogollos de la planta femenina. Este proceso consta de un baño del material vegetal con el solvente, en este caso etanol al 95% y agua al 5%, donde primero se coloca el material vegetal en una fina malla con el fin de que no traspasen impurezas o material vegetal sólido al producto a obtener (Cotrina 2020).

Luego se vierte el solvente en el material vegetal y se escurre para que suelte los compuestos deseados de este. Al final se obtiene una mezcla de etanol/material vegetal la cual debe ser filtrada mediante procesos de carbón activo, evaporación de alcoholes o destilación. Este proceso de extracción se asemeja con la forma en la que se realiza el café ya que el café molido es filtrado mediante un papel filtro o de celulosa y luego se le aplica agua para obtener una mezcla con compuestos deseados del café (Cotrina 2020).

En la industria se utilizan diferentes métodos de extracción con etanol, entre los más usados son el lavado cálido con etanol y el lavado en frío con etanol. El lavado en cálido con etanol, conocido como reflujo, consta de una canasta de hierba suspendida debajo de un condensador invertido para generar múltiples goteos de manera que el solvente condensado llueva uniformemente a través de la canasta para una extracción pareja. El solvente se coloca en el fondo del destilador y se vaporiza mediante calor y/o vacío. Los vapores se licúan en el condensador y gotean a través de la canasta de la hierba que lava los constituyentes deseados en el fondo del destilador (Cotrina 2020).

El lavado en frío con etanol consiste en tener a baja temperatura el solvente, generalmente a 20°C para ser bombeado a un contenedor con cannabis o material vegetal. Luego se remoja o baña el material vegetal con el solvente y se filtra la solución o el material vegetal se retira con una malla parecida a una bolsa de té. El licor resultante de etanol y extracto se concentra luego eliminando el etanol (Cotrina 2020).

### 1.5.3.3 Extracción por hidrocarburos

Método de extracción utilizado para obtener cannabinoides como el THC, CBD y terpenos, de las plantas de cannabis. Este proceso emplea como principales solventes el butano, propano y

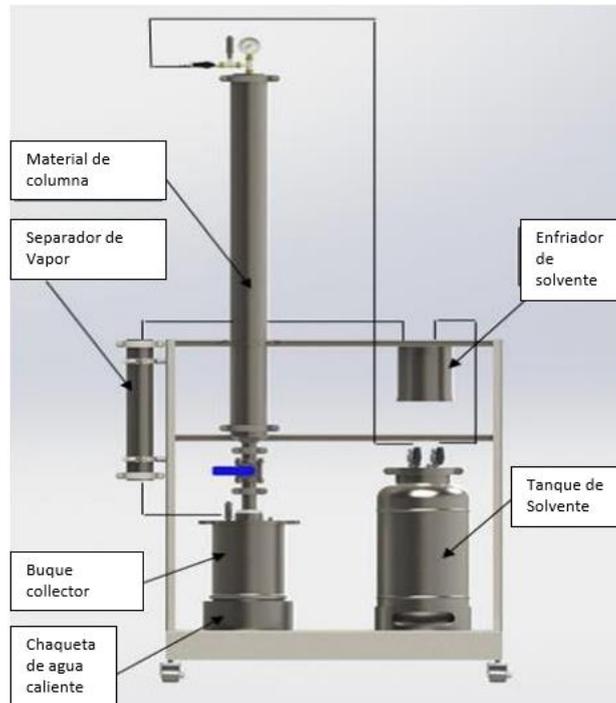
una mezcla de ellos para extraer el concentrado. Es conocido como un método de extracción limpio ya que deja poco residuo de hidrocarburos cuando se ejecuta el proceso adecuadamente. Al final de este, el extracto resultante está limpio y contiene niveles muy altos de cannabinoides y terpenos (Cotrina 2020).

El extracto altamente concentrado se utiliza para crear aceite de cannabis, shatter, vidrio, ceras y otros productos. Para llevar a cabo este proceso se utilizan sistemas de circuito cerrado (CLS), donde en todo el desarrollo del proceso de extracción se realiza dentro de un recipiente cerrado. Este sistema se asemeja al de un refrigerador o aire acondicionado ya que se maneja un lado con una temperatura alta y el otro con una temperatura baja (Cotrina 2020).

Para el caso de los sistemas de circuito cerrado, se suministra calor para mantener el proceso de recuperación (evaporación) del butano en lugar de permitir que los efectos del enfriamiento por evaporación reduzcan el proceso de recuperación. Este proceso inicia con la carga de material en la columna o recipiente de extracción, luego, el butano líquido pasa a través de la materia vegetal (ver Figura 1.6). Una vez la mezcla de butano/aceite cae en la base de recolección, se separan mediante la evaporación del butano (Cotrina 2020).

Para la recuperación del butano es común utilizar bombas para crear un vacío en el lado de entrada para extraer los vapores del butano y comprimir el vapor y volverlo líquido para ser llevado al tanque de recuperación. También se utilizan diferencias de temperaturas para que el butano se evapore y este pueda ser llevado al tanque de recuperación. Cuando el butano ha sido recuperado como líquido, quedará únicamente nuestro extracto del material vegetal (Cotrina 2020).

Debido a la alta flamabilidad de estos solventes, es necesario manejar un sistema cerrado e instalaciones adecuadas para evitar cualquier riesgo de explosión o fuego. Las propiedades de los disolventes pueden ajustarse mezclando varias proporciones y utilizando diferentes temperaturas durante el proceso de extracción. En los equipos de sistemas extracción cerrados, las condiciones estándares de operación oscilan entre 90 PSI y 40°F. Así mismo, la máxima presión de operación permitida es de 350 PSI a 120°F (Cotrina 2020).

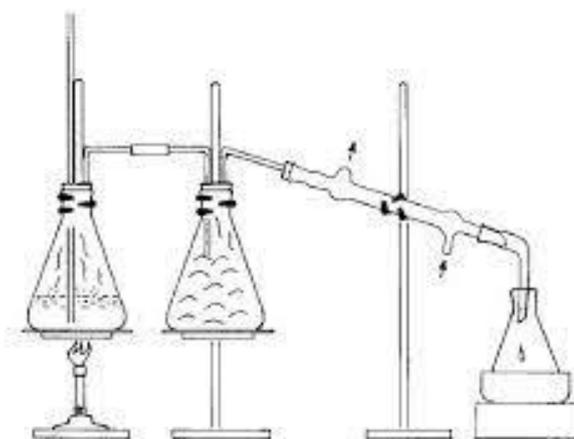


*Figura 1.6 Extracción por Hidrocarburos*

Fuente: Cotrina 2020

#### ***1.5.3.4 Extracción por Hidrodestilación y arrastre de vapor***

La destilación con agua, también llamada hidrodestilación: radica en el sumergimiento del material vegetal, en este caso las flores de cannabis en agua para someterla a un proceso de ebullición en el que se maximiza la acción del agua sobre las flores (Figura 1.7), provocando la hidrólisis y la oxidación como producto final, este método se utiliza principalmente para extraer aceites de flores como la del cannabis donde se requiere evitar el apelmazamiento, siendo esta junto con el sistema de extracción de fluidos súper críticos, muy buenas técnicas para extraer aceites esenciales, puesto que se tiene una eficiencia equivalente que por cada kilogramo de cannabis que se utilice en el proceso puede producir hasta 10 mililitros de aceite esencial (Cotrina 2020).



*Figura 1.7 Destilación por arrastre de vapor*

Fuente: Cotrina 2020

## **1.6 Impactos ambientales asociados al ciclo de vida de cultivos de cannabis**

Los métodos de cultivo de cannabis tienen una influencia inevitable sobre el medio ambiente en diferentes grados. El cultivo al aire libre es el método tradicional y original de cultivo de cannabis y aunque con costos bajos, está sujeto a las condiciones climáticas y la disponibilidad de los recursos naturales. El manejo inadecuado de los recursos de suelo y agua y el control de plagas pueden provocar problemas ambientales críticos (Zheng et al. 2021). Por el contrario, el cultivo en interiores (incluido el cultivo en invernadero) permite un control total sobre todos los aspectos de las plantas, como la luz y la temperatura, pero se ve limitado por los mayores costos, la demanda de energía y las implicaciones ambientales asociadas.

Reducir el impacto ambiental global de la agricultura de cannabis medicinal es vital para mantener la sostenibilidad ambiental. Sin embargo, hay una falta de principios sistémicos hacia el cultivo sostenible de cannabis porque sus impactos ambientales siguen sin estar claros. A raíz de la legalización sin precedentes del cannabis, existe una necesidad apremiante de una revisión completa de su evaluación ambiental (Zheng et al. 2021).

### **1.6.1 Demanda de agua**

El cannabis es un cultivo intensivo en consumo de agua y nutrientes. La Tabla 1.3 muestra que la demanda de agua para el cultivo de cannabis supera las necesidades de agua de muchos cultivos básicos. Por ejemplo, el cannabis en una temporada de crecimiento necesita el doble de agua que el maíz, la soja y el trigo. En promedio, se estima que una planta de cannabis consume 22,7 l (6 galones) de agua por día durante la temporada de crecimiento. A modo de comparación, el uso medio de agua para las uvas de vinificación se estimó en 12,64 L de agua por día.

Aunque el uso diario promedio de agua varía de sitio a sitio dependiendo de muchos factores ambientales imposibles de controlar tales como las características geográficas de la ubicación de los cultivos, las propiedades fisicoquímicas del suelo y el sustrato, el clima, la temperatura y los tipos de cultivo, se puede concluir que el cultivo agroindustrial de cannabis es una planta de alta demanda hídrica.

Planta	Periodo total de crecimiento Días	Demanda de agua por estación (millones de galones acre) Diariamente	Demanda diaria de agua (galón ft <sup>-2</sup> día)
Cannabis Outdoor	150	1.57	0.24
Cannabis Outdoor	30	NA	0.22
Cannabis Outdoor	30	NA	0.17
Cannabis Indoor	30	NA	0.18
Cannabis Indoor	30	NA	0.22
Algodón	185-195	0.75–1.39	0.09–0.15
Algodón	/	/	0.14–0.17
Maíz	130-150	0.53–0.86	0.07–0.13
Maíz	/	/	0.22 (pico)
Soja	130-150	0.48–0.75	0.07–0.13
Soja	/	/	0.22 (pico)
Trigo	120-150	0.48–0.69	0.07–0.19
Trigo	/	/	0.19 (pico)
Arroz	90-150	0.48–0.75	0.09–0.18
Arroz	/	/	0.11–0.15

*Tabla 1.3 Consumo de agua de diferentes cultivos*

Fuente: (Zheng et al. 2021)

### 1.6.2 Contaminación de fuentes hídricas

El cultivo de cannabis, especialmente el cultivo ilegal, puede deteriorar la calidad del agua. Estudios recientes han sugerido las demandas considerables de nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio para el crecimiento del cannabis. Sin embargo, hay datos limitados sobre el impacto del cultivo de cannabis en la calidad del agua en todo el mundo (Zheng et al. 2021).

Basándose en una encuesta realizada por (Wilson et al. 2019) para CA, EE. UU. Según la encuesta, se usaron más de 30 enmiendas de suelo diferentes y rociados de nutrientes foliares para mantener la nutrición y la fertilidad del suelo en cultivos de cannabis. Los pesticidas aplicados (incluidos herbicidas, insecticidas, fungicidas, nematodos y rodenticidas), debido a los controles rutinarios de plagas y enfermedades, llegan al agua sin restricciones y, por lo tanto, presentan riesgos significativos para el medio ambiente acuático.

El transporte y el destino de los fertilizantes y pesticidas aplicados varían. Por ejemplo, el nitrógeno y los pesticidas pueden pasar a la escorrentía o filtrarse a las aguas subterráneas debido a la lluvia o al riego excesivo. Si se sigue utilizando el agua contaminada, se añadirán contaminantes al suelo, las aguas superficiales y las aguas subterráneas. Estos productos químicos pueden amenazar a los seres humanos y los cultivos a lo largo de la cadena alimentaria (Zheng et al. 2021).

Los otros cultivos de regadío principales también pueden verse afectados significativamente, ya que la ubicación de los cultivos está sujeta a la seguridad ambiental de la escorrentía, la

contaminación de las aguas subterráneas y el envenenamiento de los cuerpos de agua cercanos. Sin embargo, sin la capacidad de muestrear la calidad del agua y evaluar la medida en que los insumos químicos ingresan a los cuerpos de agua adyacentes, la capacidad de vincular las prácticas de cultivo con la contaminación del agua es muy limitada (Zheng et al. 2021).

### 1.6.3 Calidad de aire

Aunque el cannabis se puede cultivar al aire libre en muchas regiones del mundo, también se puede producir un cultivo comercial considerable en interiores o en invernaderos. Las mediciones ambientales recopiladas dentro de las operaciones de cultivo previas a la legalización han encontrado concentraciones de hasta 50–100 partes por billón (ppb) de terpenos, incluidos  $\alpha$ -pineno,  $\beta$ -pineno,  $\beta$ -mirceno y d-limoneno para menos de 100 plantas en las instalaciones de cultivo de cannabis (Zheng et al. 2021).

El estudio realizado por la Agencia Regional de Aire Limpio de Spokane por sus siglas en inglés (SRCAA) midió los Compuestos Orgánicos Volátiles COV en interiores en siete salas de floración y dos salas de brotes secos en cuatro centros de cultivos diferentes, e informó que la concentración promedio de terpenos fue de 361 ppb (27–1676 ppb). Situación que permitió informar que las concentraciones en interiores de COV medidos podrían variar entre las instalaciones, desde 112  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  hasta 5502  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Zheng et al. 2021).

Las operaciones de cultivo de cannabis en interiores también presentan un riesgo de peligros potenciales para la salud, como la exposición al moho, a los pesticidas y a los productos químicos. Por ejemplo, los cultivos de cannabis generalmente requieren una temperatura entre 20 y 28 °C, con una humedad relativa entre 50 y 70 %, mientras que la tasa de ventilación a menudo se suprime para limitar el olor que emana, especialmente para el cultivo ilegal (Zheng et al. 2021).

Los informes de la OMS (Organización Mundial de la Salud) mostraron que la presencia de moho en ambientes interiores húmedos se correlaciona con síntomas del tracto respiratorio superior, infecciones respiratorias, sibilancias, tos, asma actual, síntomas de asma en personas sensibilizadas, hipersensibilidad neumonitis y disnea (Zheng et al. 2021).

## 1.7 Implementación de sistemas de energía solar fotovoltaica en cultivos de cannabis

Teniendo en cuenta que este es un sector intensivo en el consumo de energía y que existen soluciones al alcance de los cultivadores que permitan no solo disminuir el costo de la energía consumida sino que además aporta a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero producto de las actividades propias del cultivo agroindustrial de cannabis, se han desarrollado soluciones que permiten incluir fuentes de generación de energía renovable en el sector agroindustrial.

Es así como actualmente hay evidencia nacional e internacional de casos de éxito en la implementación de energía solar fotovoltaica en esta industria a gran escala, como es el caso del cultivo y postcosecha de la empresa Khiron en el municipio de Doima ubicado en el departamento del Tolima. En dónde por medio de la instalación de un sistema solar fotovoltaico de aproximadamente 1 MW de capacidad instalada, el proyecto es capaz de autogenerar hasta el 40% de la energía requerida por las facilidades del cultivo ahorrando costos en el valor de la energía consumida y reduciendo en 570 las toneladas al año de CO<sub>2</sub> (Colombia 2020).

De igual forma, hay casos internacionales de implementación de tecnología solar fotovoltaica para atender los requerimientos energéticos de los cultivos tanto en interiores como en

invernaderos. Uno de estos es Solar Cannabis quien desde el 2019 implementó dicha tecnología en sus cultivos realizados en interiores y cuenta con cerca de 70000 pies cuadrados de paneles solares sobre la cubierta del cultivo.

Otro caso de éxito es el de la empresa CannDESCENT que en 2019 completó el proyecto solar a escala comercial, que abastece con energía limpia las instalaciones de producción interior ubicadas en Desert Hot Springs, California. El sistema energía solar de 282,6 kilowatts usa 734 módulos solares en siete estructuras independientes de marquesina para abastecer con la energía necesaria, renovable y en el sitio, El sistema de solar compensa la cantidad de emisiones de carbono anual equivalente a 430 acres de bosque y disminuye la emisión de carbono en la atmósfera en 365 toneladas métricas (Businesswire 2019).

## 2 Estimación de los requerimientos energéticos asociados al ciclo de vida del Cannabis agroindustrial en el caso de estudio

### 2.1 Requerimientos energéticos del ciclo de vida del cannabis

Con el fin de realizar el análisis del sector de la manera más detallada posible, haciendo uso de la búsqueda de información secundaria se detallan los diferentes requerimientos energéticos a los que está sujeto el ciclo de vida de un cultivo típico de cannabis desde la siembra hasta la fabricación de sus derivados bajo la modalidad de cultivo en invernadero y en interiores.

El cannabis medicinal a escala agroindustrial es un sector intensivo en cuanto a consumo de energía producto de los requerimientos de iluminación, consumos auxiliares y maquinaria necesaria para los procesos de transformación, condición que con el pasar del tiempo se va acentuando todavía más producto de la reciente legalización del cannabis de uso medicinal y uso adulto en países como Canadá, Uruguay, Colombia y un número creciente de estados de EE. UU. En la Figura 2.1 se puede ver de manera general como es la distribución de los requerimientos energéticos del cultivo de cannabis medicinal.

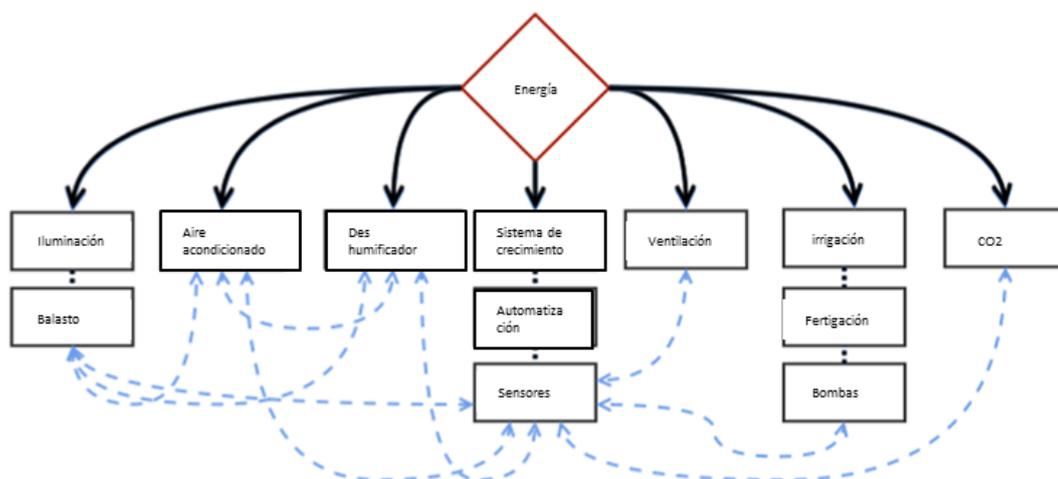


Figura 2.1 Distribución de requerimientos energéticos

Fuente: (Conservacy y Facilities 2018)

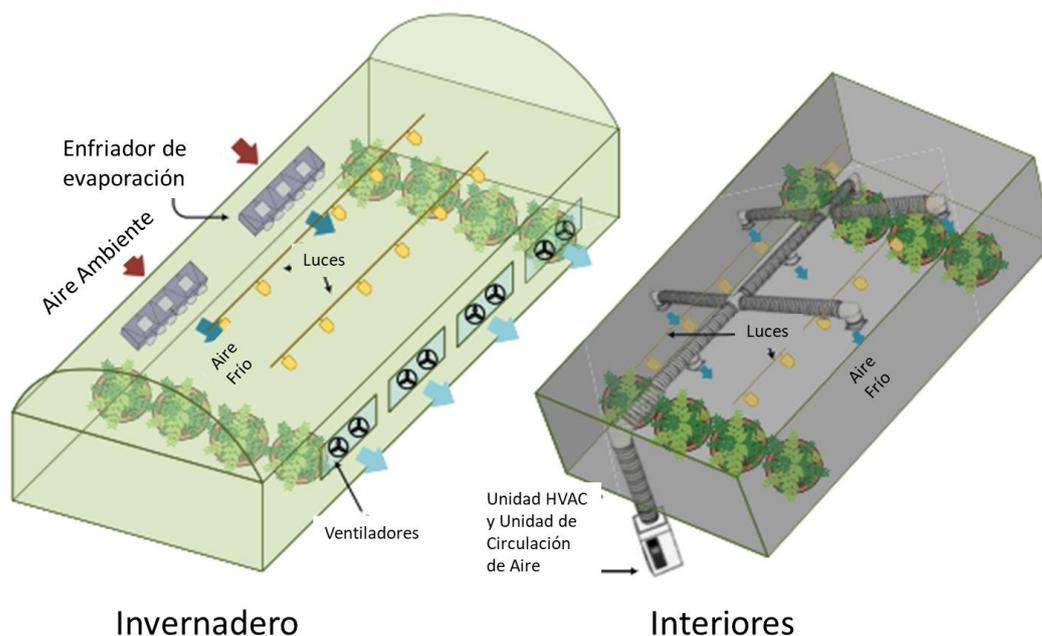
Debido al rápido crecimiento del sector, también lo está haciendo el consumo de energía en los cultivos, lo que genera demandas de energía no pronosticadas. Por ejemplo, en 2014, Denver

experimentó un aumento del 1,2 % en el uso de la demanda de electricidad y el 45% de ese incremento en la demanda provenía de los cultivos de cannabis, es decir, que el sector representaba el 0,54 % de la electricidad utilizada en el estado de Denver en ese año y a 2018, el sector del cannabis se atribuía el 4% del uso de electricidad del estado (MEHBOOB, FARAG, y SAWAS 2020).

Para hacerse a una idea de la cantidad de energía que consume el sector de cannabis en el estado de Denver, a 2019 el consumo total de energía en el estado ascendió a 6.700.000 MWh, proyectando el 4% del consumo total de la energía del estado, se estima que aproximadamente 268.000 MWh corresponden a la demanda del sector de cannabis medicinal en el estado. (Denver 2020)

La energía que se consume actualmente en la mayoría de cultivos de cannabis agroindustrial es tomada de la red para el funcionamiento de las instalaciones y crecimiento en los cultivos de cannabis, situación determinante en el éxito del sector, entre los equipos y accesorios que consumen mayor cantidad de energía se encuentra el tipo de cultivo (cultivo al aire libre, cultivo en interiores o cultivo en invernaderos), los accesorios de iluminación, las configuraciones y eficiencias HVAC por sus siglas en inglés Heat, Ventilation, Air Conditioning (temperatura y humedad), sistema de riego, forma de transformación de los derivados entre otros (MEHBOOB et al. 2020).

En la Figura 2.2 se muestra como la energía se usa de manera diferente en las operaciones de cultivos en invernaderos y en cultivos de interior. Mientras en cultivos de invernaderos la iluminación artificial se complementa con la luz solar natural, en cultivos de interior, las cargas de iluminación son mucho más altas debido a la alta potencia requerida por las luces que se utilizan para reemplazar la luz del sol. A su vez, estas luces de alta potencia en interiores generan un calor significativo, por lo que se hace necesaria la implementación de sistemas HVAC de alta capacidad para mantener unas condiciones óptimas de crecimiento de las plantas de cannabis (MEHBOOB et al. 2020).



*Figura 2.2 Diferencia entre los requerimientos energéticos de los tipos de cultivo de cannabis*

Fuente: (MEHBOOB et al. 2020)

Dichos requerimientos particulares de cada tipo de cultivo respaldan la necesidad de un modelo diferente para las instalaciones de cultivo de interior y en invernaderos. En los mercados legales de cannabis, los cultivos de interior y de invernadero son los dos tipos más frecuentes. Datos analizados muestran que, en 2017, aproximadamente el 60 % del uso de energía en los cultivos legales de cannabis en EE. UU. Fueron asociados con operaciones en interiores, mientras que el 37% del uso de energía se asoció con producción en invernaderos.

En este sentido, los costos totales de energía para las operaciones de cultivo de cannabis en interiores normalmente varían entre 20%-50% de los costos operativos totales, en promedio el indicador de consumo de energía es de 150 kWh de electricidad/año/ft<sup>2</sup>, esto quiere decir que para un cultivo de 5000 m<sup>2</sup> de cannabis en interiores el consumo de energía es del orden de 8072,93 MWh/año, costo que se traduce en USD \$ 988.552 del rubro de factura de energía al año.

por otro lado, los costos totales operativos de energía en cultivos realizados en invernadero varían entre un 10 y 15%, el indicador de consumo de energía es cultivos de cannabis en invernaderos es de 12 kWh/año/ft<sup>2</sup> que equivale a USD\$ 79081,79 del rubro de facturación de energía al año (MEHBOOB et al. 2020).

Para llevar a cabo un ciclo de vida de cannabis, se requiere principalmente de tres etapas de cultivo; germinación (o propagación), etapa vegetativa y etapa de floración y una etapa de transformación de la flor en derivados, cada una de estas tiene requerimientos específicos diferentes de energía basados en la iluminación, la temperatura, el nivel de humedad, maquinaria y equipos requeridos. Por lo general, para las operaciones de interior y de invernadero, las etapas de floración y transformación son las que requieren un mayor consumo de energía, mientras que la etapa de germinación la que menos requiere (UNAL 2019).

La Figura 2.3 muestra el desglose porcentual de la participación de los diferentes requerimientos energéticos para una operación típica en el ciclo de vida de un cultivo de cannabis en interiores, en esta se puede evidenciar que la mayor parte de la energía consumida se debe al sistema HVAC (ventilación, aire acondicionado y deshumidificación) del cultivo la cual requiere un (51%) del total del consumo, seguido de la iluminación con un 38%.



Figura 2.3 Desglose de los requerimientos de energía en el cultivo de cannabis

Fuente: (MEHBOOB et al. 2020)

Por otro lado, los cultivos en invernadero tienen un consumo energético que representa entre el 10% y el 15% del costo total de operación (MEHBOOB et al. 2020); esto se debe principalmente a que en los cultivos realizados bajo esta modalidad, no se requiere tener el mismo nivel de rigurosidad en el control del sistema HVAC puesto que los invernaderos son diseñados para controlar en gran medida factores ambientales que pueden afectar el desarrollo

de los cultivos; de igual forma, el requerimiento energético disminuye debido a la luz solar que alimenta los cultivos durante las horas efectivas de luz al día; esta situación varía en países con régimen estacionario y es constante en países sobre la línea del Ecuador.

Finalmente, realizando una comparación entre las dos diferentes formas de cultivo (Interiores, Invernadero y exteriores), por cada gramo de cannabis que se cultiva en interiores, se requieren 262 kWh/sq.ft, mientras que para los cultivos en invernadero se requieren 134 kWh/sq.ft y finalmente en cultivos en exteriores se requieren a penas 2 kWh/sq.ft de intensidad eléctrica como se puede ver en la Figura 2.4.

Tipo de Cultivo	Productividad de la electricidad (gr/kWh)	Intensidad eléctrica (kWh/sq.ft)	Intensidad de producción (gr/sq.ft)	Costo de la electricidad (USD\$ /gr)	Intensidad de Carbon (lb-CO <sub>2</sub> e/gr)
Interiores	0.8	262	174	0.24	1.24
Invernadero/Hibrido	1.1	134	48	0.21	0.72
Exteriores	14.4	2	29	0.01	0.05

*Figura 2.4 Comparación de requerimientos energéticos por tipo de cultivo*

Fuente: (Conservacy y Facilities 2018)

## 2.2 Generalidades del estudio de caso

Como caso de estudio se eligió la compañía nacional Aurora Medicinal, esta es una empresa colombiana que ofrece productos derivados del cannabis medicinal de tipo psicoactivo y no psicoactivo, de acuerdo con lo establecido en la regulación nacional. El core del negocio de Aurora se da mediante la siembra, producción y transformación de flor seca de cannabis en derivados y fórmulas magistrales destinadas principalmente al tratamiento de enfermedades tales como insomnio, dolores musculares, ansiedad, estrés, enfermedades neurológicas, cáncer, cuidados paliativos entre otras.

El valor agregado de los cultivos de la compañía es ser considerados cultivos orgánicos y sostenibles que cumplen con estándares de manufactura GMP (Good Manufacturing Practices) y buenas prácticas agrícolas BPAs, con el objetivo de generar productos con altos estándares de calidad que a su vez satisfagan y mejoren la calidad de vida de sus clientes obteniendo los más altos indicadores de costo beneficio de los proyectos.

Para poder ofrecer los productos y servicios, Aurora Medicinal cuenta con las siguientes licencias y registros expedidas por las correspondientes autoridades nacionales que respaldan su operación.

- Variedades de cannabis certificadas ante el ICA – Expedida por el ICA.
- Licencia de uso de semillas para fines científicos, comercialización o entrega- expedida por Ministerio de Justicia.
- Licencia de cultivo de cannabis psicoactivo - expedida por Ministerio de Justicia.
- Licencia de cultivo de cannabis no psicoactivo - expedida por Ministerio de Justicia.
- Licencia de fabricación de derivados de cannabis para investigación científica - expedida por Ministerio de Justicia.
- Licencia de fabricación de derivados de cannabis para uso nacional - expedida por Ministerio de Justicia.
- Licencia de fabricación de derivados de cannabis para exportación - expedida por Ministerio de Justicia

- Registros INVIMA – expedido por Invima

El cultivo de cannabis de Aurora Medicinal se encuentra ubicado en la vereda Pantanillo del municipio de Albán como se puede ver Figura 2.5, este a su vez se ubica en el extremo noroccidental del departamento de Cundinamarca en la Zona semi montañosa correspondiente a la Cordillera Oriental Andina, su altitud oscila entre los 1500 m.s.n.m. en su parte baja y los 3100 m.s.n.m. en sus cerros más altos, encontrándose su cabecera Municipal a los 2246 m.s.n.m.

Sus coordenadas geográficas son de 4°53'00" latitud Norte y 74°26'00" longitud Oeste. El municipio se encuentra ubicado a una distancia de 59 Km de la ciudad de Bogotá D.C. con la cual se comunica por medio de la troncal de occidente. Limita por el norte con Villeta y Sasaima, por el oriente con Sasaima y Facatativá, por el sur con Anolaima y por el occidente con Guayabal de Siquima (Turismo 2020).



*Figura 2.5 Ubicación del Caso de Estudio Aurora Medicinal*

Fuente: Google Earth., 2022

Aurora Medicinal se dedica al cultivo de diferentes tipos de plantas de cannabis psicoactivo y no psicoactivo, comercialización de semillas, transformación en derivados, investigación de la planta y desarrollo de nuevos productos para el tratamiento de diferentes enfermedades; por lo tanto, para el adecuado funcionamiento de las actividades desarrolladas por la compañía se requiere de las facilidades que se enuncian a continuación.

- i. Tres invernaderos de 500 m<sup>2</sup> con capacidad de albergar aproximadamente 110 plantas cada uno
- ii. Un Cuarto de secado
- iii. Laboratorio de transformación de cannabis
- iv. Cuarto de almacenamiento de insumos químicos
- v. Cuarto de almacenamiento de materia prima
- vi. Cuarto de almacenamiento de residuos orgánicos
- vii. Reservorio de agua
- viii. Tres tanques de almacenamiento de agua de 2 m<sup>3</sup> cada uno

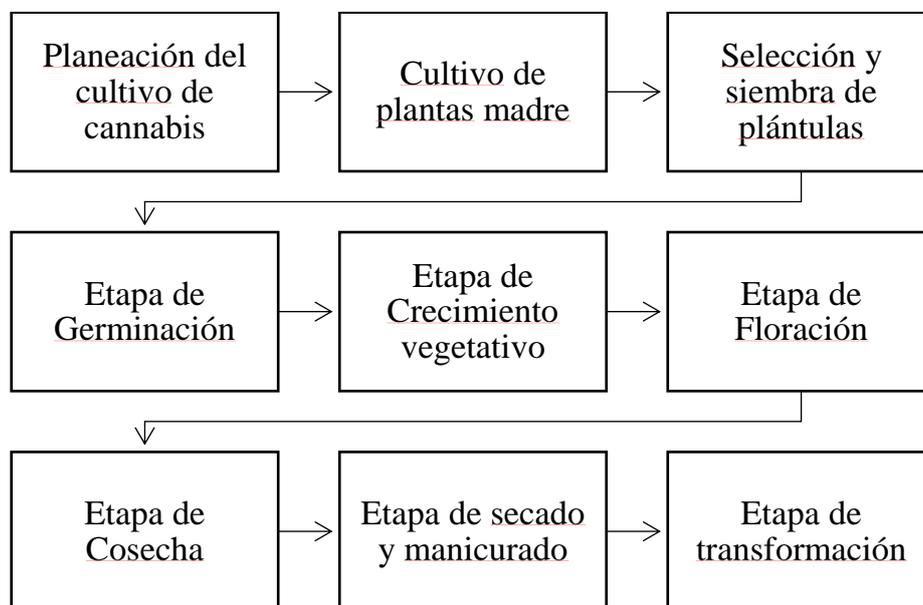


*Fotografía 2.1 Invernadero Tipo de Aurora Medicinal*

Fuente. Autor, 2022.

### 2.3 Descripción del ciclo de vida del cultivo en el estudio de caso

En la Figura 2.6 se enuncian las principales etapas por las que atraviesa el cultivo de cannabis medicinal y el proceso de transformación hasta convertirse en los productos medicinales que ofrece la compañía, principalmente aceites, esencias y cremas que alivian diferentes tipos de dolencias y enfermedades. Estos son algunos productos que se pueden fabricar utilizando como materia prima el aceite extraído de la planta, sin embargo, la regulación colombiana aún no permite la comercialización de productos de uso recreativo a partir del cannabis.



*Figura 2.6 Descripción de las actividades de la compañía*

Fuente: Autor, 2022.

### 2.3.1 Cultivo de plantas madre

Las facilidades se encuentran divididas de tal forma que en el invernadero N°1 se cuenta con un espacio permanente dedicado a producción y mantenimiento de las plantas madre (ver Fotografía 2.2), estas son plantas en perfecto estado de conservación que contienen el material genético certificado de las diferentes variedades psicoactivas y no psicoactivas aprobadas en la Licencia de uso de semillas para fines científicos, comercialización o entrega expedida por Ministerio de Justicia.

La intención de conservar estas plantas madre se debe a que de ellas se extrae el material vegetal de propagación que cuenta con exactamente las mismas características fisicoquímicas de los cannabinoides aprobados en la licencia de uso de semillas, evitando que por el uso de semillas y variaciones mínimas en las condiciones del ambiente de cultivo se modifique la genética de las plantas y posteriores derivados.

Estas plantas son sembradas en una mezcla de suelo orgánico y sustratos que normalmente están compuestos por perlita, vermiculita, humus de lombriz y fibra de coco con el objetivo de generar un anclaje del sistema radicular de las plantas permitiendo el adecuado crecimiento de esta y la disponibilidad de oxígeno dentro del medio en el cual son sembradas. Una vez preparado el sustrato, se agregan los fertilizantes en las dosis necesarias para evitar enfermedades por exceso o por defecto de estos.



*Fotografía 2.2 Cultivo de plantas madre*

Fuente: autor, 2022.

Para que estas plantas madre se mantengan en estado de crecimiento vegetativo es necesario mantenerlas bajo unas condiciones de iluminación por al menos 18 horas al día con el fin de confundir a la planta y que no se lleve a cabo el proceso de floración puesto que una vez la planta florece ya no puede ser utilizada para las actividades de clonación. De igual forma es necesario garantizar unas condiciones de temperatura controlada por medio de la instalación de termómetros en el invernadero de entre 24 ° C a 27 ° C y la humedad por debajo del 40% controlada con ventiladores convencionales y un consumo promedio de 200 ml de agua por

planta al día aplicados manualmente sobre las materas en las que se encuentran sembradas las plantas madre.

Es necesario controlar estas condiciones puesto que la planta de cannabis utilizada para obtener los derivados es una planta feminizada, que al ser una planta hermafrodita, si esta llega a sentirse atrapada o en situaciones de estrés automáticamente cambia de sexo para garantizar su supervivencia, pasando a convertirse en una planta macho y de igual forma, pasaría de producir flores a producir semillas de cannabis.

### 2.3.2 Etapa de germinación

El material vegetal para clonación obtenido del cultivo de plantas madre es seleccionado cuidadosamente escogiendo los esquejes que tienen las mejores características fenotípicas con el fin único de garantizar el crecimiento de una planta saludable; este es trasplantado en bandejas de germinación con mezcla de suelo y sustrato por un periodo de aproximadamente 32 días (ver Fotografía 2.3), en dónde se deben controlar las variables de temperatura en los mismos rangos que para las plantas madre así como el periodo de iluminación de 24 horas y de esta manera estimular el crecimiento y enraizamiento de las plantas, manteniendo la humedad cercana al 60%.



*Fotografía 2.3 Plantines de cannabis obtenidos por clonación*

Fuente: Autor, 2022.

Durante esta etapa del ciclo de vida el riego de las plantas se realiza por nebulización, que consiste en expulsar el agua en forma de neblina a través de emisores colocados en la parte superior de los cultivos como se puede ver en la Fotografía 2.3 por donde además del suministro de agua se suministran los fertilizantes en las dosis necesarias en caso de requerirse, este método además permite controlar la temperatura y humedad durante esta etapa del cultivo.

Después de aproximadamente dos semanas cuando se realiza la inspección física del plantín en dónde se busca validar si tiene el suficiente crecimiento radicular, la apariencia y estructura firme de una planta de cannabis miniatura, se define si se encuentra lista para realizar el trasplante e iniciar la etapa de crecimiento vegetativo o por el contrario se define si requiere de un tiempo adicional en la etapa de germinación o se descarta.

### 2.3.3 Crecimiento vegetativo

En esta etapa se trasplanta la plántula en una maceta con la mezcla de suelo y sustrato necesarios para que albergue la planta hasta que alcance la madurez esperada, se traslada al invernadero en el cual continuará el proceso de crecimiento durante aproximadamente 10 a 12 semanas con requerimientos de humedad y temperatura del 40% y 24 °C a 27 °C respectivamente ( ver Fotografía 2.4); con el objetivo de estimular el crecimiento de la planta hasta alcanzar el tamaño esperado y el desarrollo de los cannabinoides se mantienen las condiciones de iluminación durante 18 horas continuas iniciando a las 12 a.m. y finalizando a las 6 p.m.

Durante esta etapa se realiza la aplicación de aproximadamente 200 ml agua y los nutrientes que sean necesarios de forma manual una vez al día, a medida que las plantas crecen se van acondicionando los invernaderos de manera tal que los tallos crezcan de manera vertical evitando que se el tallo se pueda quebrar por el peso de la planta y optimizando el espacio utilizado por cada planta dentro del invernadero.

Así mismo, durante esta etapa se supervisan y en caso de requerirse se controlan de forma manual las enfermedades y plagas que comúnmente se presentan durante el crecimiento del cultivo y que pueden poner en riesgo la calidad de la flor de cannabis. Por tanto, durante este segmento de tiempo de 10 a 12 semanas se debe garantizar el adecuado crecimiento de la planta de tal forma que sea posible obtener una mayor densidad de flores por planta durante la siguiente etapa.



*Fotografía 2.4 Planta durante crecimiento vegetativo*

Fuente: Autor, 2022.

### 2.3.4 Etapa de floración

En esta etapa se induce a la planta al cambio de estado hacia la etapa de floración modificando las horas de luz que recibe al día por un periodo continuo de 12 horas de luz y 12 horas de

oscuridad. En esta etapa los tallos de la planta dejan de crecer y la planta experimenta cambios hormonales fruto del cambio de ciclo de iluminación que permite dar inicio al desarrollo de las flores o cogollos de cannabis sobre las cuales se empiezan a desarrollar los tricomas, responsables del olor característico de las plantas de cannabis; normalmente esta etapa en el cultivo de Aurora medicinal se da en una ventana de tiempo de 8 a 10 semanas (ver Fotografía 2.5).

La manera de identificar que la flor se encuentra en condiciones óptimas para ser aprovechada se da por inspección a detalle, normalmente utilizando una lupa sobre las flores del cultivo, normalmente los tricomas que aparecen en las primeras semanas de la etapa sobre la flor tienden a cambiar de color cristalino a color ámbar, este es el indicador de que la planta cuenta con la mayor cantidad de cannabinoides y se encuentra lo suficientemente madura para aprovechar todas las propiedades de la planta en la siguiente etapa.

Durante la etapa de floración se deben controlar los parámetros de humedad y temperatura en los mismos rangos que durante la etapa de crecimiento (del 40% y 24 °C a 27 °C respectivamente) para que las plantas no sientan cambios bruscos en el medioambiente en el cual se encuentran albergadas ya que al ser una planta hermafrodita, si esta se siente vulnerable pueden llegar a presentarse cuadros de estrés que generan cambios de sexo en las plantas o aparición de enfermedades por exceso o defecto de humedad.



*Fotografía 2.5 Flor en etapa de floración*

Fuente: Autor, 2022.

### **2.3.5 Etapa de Cosecha**

En la etapa de cosecha se realiza la inspección visual del cultivo de cannabis con el fin de validar si los tallos cuentan con la cantidad y calidad de flores esperada, adicionalmente, se confirma que al menos el 60% al 80% de los tricomas sean de color ámbar e inmediatamente después de verificar las condiciones óptimas de la planta, se procede a realizar el aprovechamiento del material vegetal.

Esta labor consiste básicamente en realizar la poda de las plantas desde la base del tronco y recuperando la mayor cantidad de tallos y cogollos que tiene el potencial de ser convertido en derivados (ver Fotografía 2.6). La duración aproximada de esta fase es de 2 días y el método de aprovechamiento normalmente utilizado en las plantas es manual con equipos y herramientas de jardinería convencionales.

Durante esta etapa no es necesario seguir adicionando agua y nutrientes al cultivo, tampoco controlar las variables climatológicas dentro del mismo ya que esta es la etapa final del proceso de cosecha de la planta y una vez se dé por terminada, los restos de material orgánico serán almacenados para posteriormente ser aprovechados en procesos de economía circular. Finalmente, durante esta etapa el régimen de horas de luz y sombra es de 12 horas continuas cada uno.



*Fotografía 2.6 Etapa de cosecha del cultivo de cannabis*

Fuente: Autor, 2022.

### **2.3.6 Etapa de secado y manicurado**

En esta etapa los tallos de cannabis que tienen las hojas y flores son almacenados en cuerdas dentro de un cuarto de secado en condiciones de oscuridad total por un periodo de 7 a 9 días a una temperatura entre 24 °C a 28 °C y humedad relativa por debajo del 40% hasta que la planta pierde el 90% de humedad en peso. Esta condición es controlada pesando las plantas recién cortadas y al cabo de los 9 días se vuelven a pesar para estimar ahí el porcentaje de pérdida de humedad (ver Fotografía 2.7).

Estas condiciones ambientales del cuarto de secado son controladas por medio de un extractor de humedad, ventiladores y calentadores que se utilizan solamente cuando las condiciones externas al cuarto de secado no permiten que solo por medio del extractor se controlen los parámetros que garantizan el adecuado secado de las plantas.



*Fotografía 2.7 Cuarto de secado*

Fuente: Autor, 2022.

Una vez la flor alcanza el peso deseado, se procede a separar el tallo de las hojas y la flor formando lo que comúnmente se conoce como el “moño” que es la materia prima que contiene todos los cannabinoides que pueden ser utilizados para la transformación en derivados. Este “moño” se lleva nuevamente al cuarto de secado y se almacena en bandejas por 3 días más hasta que llega a perder en total el 95% de humedad.

Este es el valor máximo esperado de reducción de la humedad para que se pueda realizar el proceso de transformación la transformación. Finalmente los moños son retirados del cuarto de secado y se llevan al cuarto de almacenamiento de materia prima hasta que se almacene la suficiente cantidad de materia prima, este es el paso intermedio para proceder a la transformación final en productos farmacéuticos (ver Fotografía 2.8).



*Fotografía 2.8 Flor seca de cannabis*

Fuente: Autor, 2022.

### 2.3.7 Etapa de transformación.

Con el objetivo de dejar solamente la flor seca de cannabis para la producción de aceites que es la parte de la planta que contiene la mayor cantidad de cannabinoides, se debe pasar primero por un equipo en donde se realiza el proceso de manicurado más conocido como el “trim” del cogollo en el cual se obtiene únicamente la flor; el resto de material orgánico obtenido de hojas y tallos que componen el cogollo y que sirven para la preparación de té e infusiones debido a las bajas concentraciones de CBD se almacena tolva que luego tiene un proceso de transformación diferente a los derivados (ver Fotografía 2.9).



*Fotografía 2.9 Manicurado de la planta*

Fuente: Autor, 2022.

Después de obtener solamente la flor, esta es pasada por el molino en donde esta es triturada obteniendo material con un tamaño de partícula similar al del azúcar; continuando con el proceso de transformación, este material es combinado con alcohol de alta pureza y se pasa por la máquina centrífuga o rotoevaporador para producir el macerado o la tintura, en esta etapa se separa el alcohol y las partículas sólidas de los cannabinoides (ver Fotografía 2.10).



*Fotografía 2.10 Rotoevaporador, molino y materia prima*

Fuente: Autor, 2022.

Con el propósito de obtener un porcentaje de pureza más alto al obtenido inicialmente, la tintura es puesta de nuevo en el rotoevaporador por un tiempo adicional de 5 horas y de esta manera se obtiene una jalea que es conocida como el “full spectrum”, el cual es un producto que contiene todos los componentes principales del tipo de cannabis aprovechado (Cannabinoides, terpenos y flavonoides entre otros).

Finalmente, con el fin de obtener material destilado al 85% de pureza, se refina el destilado en el equipo Short Path (ver Fotografía 2.11) por un tiempo adicional de 8 horas en dónde se obtiene la materia prima concentrada con el % de pureza más alto posible; este es el insumo base para la industria farmacéutica que produce cremas, aceites, ungüentos, relajantes musculares entre otros productos.



*Fotografía 2.11 Material destilado al 85% de pureza y Short path*

Fuente: Autor, 2022.

#### **2.4 Análisis del ciclo de vida del cultivo de Aurora Medicinal**

De la visita realizada el 24 de septiembre del 2022 al cultivo de cannabis de la compañía Aurora medicinal (Medicinal 2022a) se pudo verificar que, si bien el cultivo cuenta con las instalaciones mínimas requeridas para llevar a cabo una plantación agroindustrial de cannabis medicinal de gran calidad como lo establece la regulación colombiana, el cultivo aún es susceptible de realizar varios procesos de mejora continua que le permitan mejorar los indicadores de producción de plantas de cannabis.

En línea con lo anterior, validando el ciclo de vida del cultivo, se encontró que el consumo de energía eléctrica durante la operación a máxima capacidad del invernadero se puede describir en el ciclo de cultivo por un periodo de tiempo aproximado de 3,5 meses en dónde se consume en promedio 1200 kWh-mes y el proceso de transformación tiene un periodo aproximado de 0,5 meses donde sumando el consumo habitual más el consumo de la planta de transformación da como resultado un consumo estimado de 6415 kWh-mes como se puede ver en la Tabla 2.1.

<b>Facturas</b>	
<b>Mes</b>	<b>Consumo kWh/mes</b>
Enero	6415
Febrero	1200
Marzo	1200

Abril	1200
Mayo	6415
Junio	1200
Julio	1200
Agosto	1200
Septiembre	6415
Octubre	1200
Noviembre	1200
Diciembre	1200

*Tabla 2.1 Consumos energéticos de Aurora Medicinal*

Fuente: Tomado y adaptado de documentos de (Medicinal 2022a).

Este análisis da como resultado inicial que la compañía actualmente está incurriendo en costos indirectos de producción ligados al componente energético entre COP \$ 1.000.000 en los meses donde no se realiza el proceso de transformación hasta COP \$ 5.000.000 cuando se da el mencionado proceso, por lo cual se evalúa la posibilidad disminuir dichos costos por medio de la implementación de un sistema de autogeneración utilizando energía solar fotovoltaica para las instalaciones actuales y del mismo modo pensar en la futura ampliación del cultivo como se tiene previsto garantizando la estabilidad y sostenibilidad del consumo de energía eléctrica.

## **2.5 Identificación de requerimientos energéticos del estudio de caso**

Una vez identificados los costos energéticos y después de realizar el análisis intensivo del ciclo de vida del cultivo de cannabis de Aurora medicinal, fue necesario realizar la identificación de todos los requerimientos energéticos por fases de operación y en conjunto puesto que, como se logró establecer preliminarmente en el numeral 1.6 y confirmar en la visita al proyecto, esta industria es intensiva en el consumo de energía por las características de producción y transformación de la materia prima, razón por la cual, cuando el cultivo se encuentra en operación al máximo de la capacidad pueden presentarse valores como los que se muestran en la Tabla 2.1.

Siguiendo con el análisis, en la Tabla 2.2 se muestra cada uno de los equipos utilizados en el cultivo que aportan requerimientos energéticos al consumo de energía total. Se pueden dividir en dos fases principales que son los equipos de la etapa de cosecha y los equipos de la etapa de transformación. En la etapa de cosecha el mayor consumo energético se asocia a las actividades de iluminación, mantenimiento de las condiciones climáticas del invernadero y cuartos de secado, que cuando el cultivo se encuentra funcionando con los 3 invernaderos en su máxima capacidad puede alcanzar valores promedio de 1200 kwh-mes de acuerdo con la factura de energía de Aurora Medicinal (ver Tabla 2.1).

Por otro lado, cuando se incluye al ciclo de vida del cultivo la etapa de transformación que es en dónde se necesitan equipos con requerimientos importantes de energía para la fabricación del producto terminado, el consumo promedio mensual de energía durante el periodo de tiempo que funciona la planta de derivados puede alcanzar los 6000 kwh-mes de acuerdo con la factura de energía mensual como se muestra en la Tabla 2.1.

Esta situación, permite analizar que los elevados costos en energía en los que incurre el cultivo para la producción tanto de materia prima como de sus derivados elevan los costos finales de los mismos, si bien no son los únicos costos en los que incurre el cultivo si se identificó que aproximadamente el 12% de los costos finales del producto son producto de los requerimientos energéticos.

Un indicador de los elevados costos de producción actualmente es el costo de producción del gramo de flor seca de cannabis el cual se encuentra alrededor de los 75 centavos de USD, de igual forma el indicador del costo de producción de una fórmula magistral de cannabis medicinal por 10 ml se encuentra alrededor de 13 USD, esto representa un valor de mercado por encima de estos valores de referencia.

Es importante mencionar que actualmente el proceso de transformación de derivados no se puede realizar durante los periodos del día en donde el kwh es más económico que es principalmente en horas de la noche puesto que solamente hay un transformador que alimenta a la compañía y las fincas aledañas, por lo que, si el proceso llegase a realizarse en dicho horario, se podría presentar una inestabilidad en el Sistema de Distribución Local debido al elevado consumo de los equipos con lo que se lleva a cabo la fabricación del derivado.

En la Tabla 2.2 se enlistan todos los equipos y cantidades de estos requeridos para el adecuado funcionamiento del cultivo de Aurora Medicinal, de igual forma, se realizó la identificación de la potencia a la cual trabajan los equipos sin embargo, se aclara que la suma total de esta potencia no es la potencia instalada puesto que los equipos no trabajan de manera continua durante 24 horas, por lo tanto el cálculo de la potencia a instalar depende de la cantidad de horas que funcionan los equipos en el cultivo.

<b>Cultivo de Cannabis de Aurora Medicinal</b>		
<b>Equipos de Cultivo</b>	<b>Und</b>	<b>Potencia de los equipos</b>
Bombillas Led	450	20 w
Extractores	6	14 w
Ventiladores	6	80 w
Bomba de agua para Nebulizador	1	1 HP
Control de condiciones meteorológicas	1	50 w
<b>Equipos Auxiliares</b>	<b>Und</b>	<b>Potencia</b>
Motobomba sumergible	1	1000 w
Sistema de iluminación	1	200 w
CCTV	1	400 w
<b>Equipos de Secado y manicurado</b>	<b>Und</b>	<b>Potencia</b>
Ventilador	3	80 w
Calentador	12	800 w
Extractor	1	14 w
<b>Equipos de Transformación</b>	<b>Und</b>	<b>Potencia</b>
Trimmer	1	1100 w
Molino	1	1000 w
Báscula	1	50 w
Bomba centrífuga	1	370 w
Bomba de vacío	2	200 w
Rotoevaporador	1	3000 w
Sistema de enfriamiento	1	1600 w
Short Path	1	2100 w

*Tabla 2.2 Identificación de consumos energéticos*

Fuente: Tomado y adaptado de documentos de (Medicinal 2022a).

### 3 Implementación de un sistema de energía solar fotovoltaico en el cultivo del caso de estudio

#### 3.1 Simulación del Sistema Solar Fotovoltaico en SolarGis - PVSyst

En línea con lo descrito anteriormente con respecto a los beneficios que se pueden obtener de la implementación de un parque solar fotovoltaico, la posibilidad de convertirse en autogenerador y las proyecciones de crecimiento de la compañía en dónde se plantea la expansión por medio de la construcción y operación de al menos dos invernaderos más que permitan aumentar el volumen de materia prima producida por la compañía. Se realiza una simulación de los parámetros meteorológicos que permita evidenciar los beneficios que trae la implementación de un Sistema solar fotovoltaico al cultivo de Aurora Medicinal.

Con el objetivo de realizar una simulación adecuada se realizó primero una evaluación preliminar de la radiación solar del municipio de Albán - Cundinamarca, más exactamente en el predio en el que se encuentra ubicado el cultivo de la compañía Aurora Medicinal identificado con las Coordenadas geográficas  $04.907907^\circ$ ,  $-074.460197^\circ$  ( $04^\circ54'28''N$ ,  $-074^\circ27'37''O$ ) por medio del uso del programa SolarGis - Prospect. En la Figura 3.1 se muestran el detalle del punto seleccionado para elaborar la simulación.



*Figura 3.1 Coordenadas de entrada para la Simulación*

Fuente: (Solargis 2022)

Por medio del análisis realizado en el software SolarGis, se obtiene información detallada acerca una serie de variables meteorológicas importantes para el diseño del parque solar como son temperatura ambiente, velocidad del viento, irradiancia, estadísticas de radiación solar diaria, con el fin de validar preliminarmente que las condiciones meteorológicas del lugar permitan la instalación de un proyecto solar fotovoltaico.

En la Figura 3.2 se muestra el resumen de los datos generales de localización del proyecto, esta información es proyectada por el software una vez se incluyen las coordenadas del predio seleccionado para realizar el estudio. Para más detalle de la simulación de las variables climáticas revisar el Anexo 1

<b>Nombre del proyecto</b>	Aurora Medicinal_Prospect
<b>Dirección</b>	unnamed road, Albán, Colombia
<b>Coordenadas geográficas</b>	04.907907°, -074.460197° (04°54'28", -074°27'37")
<b>Zona horaria</b>	UTC-05, America/Bogota [COT]
<b>Elevación</b>	1789 m
<b>Cobertura del terreno</b>	Cobertura arbórea, hoja ancha, perenne (>15%)
<b>Densidad de población</b>	102 hab./km <sup>2</sup>
<b>Azimut del terreno</b>	2°
<b>Pendiente del terreno</b>	11°
<b>Localización en el mapa</b>	<a href="https://apps.solargis.com/prospect/map?c=4.907907,-74.460197,10&amp;s=4.907907,-74.460197">https://apps.solargis.com/prospect/map? c=4.907907,-74.460197,10&amp;s=4.907907,-74.460197</a>

Figura 3.2 Datos de entrada para el análisis de radiación solar

Fuente: (Solargis 2022)

Finalmente, los datos más importantes del análisis preliminar de radiación solar son los datos de Irradiación Global que se puede entender como la suma de la radiación directa y difusa sobre una misma superficie Figura 3.3.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0 - 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 - 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2 - 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3 - 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4 - 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5 - 6	0	-	0	1	2	2	2	2	2	3	2	1
6 - 7	34	30	44	67	87	85	76	75	87	93	84	50
7 - 8	209	190	202	225	252	253	255	260	276	270	253	230
8 - 9	398	373	377	396	417	417	436	455	471	446	414	407
9 - 10	539	503	496	497	510	508	525	556	587	551	515	517
10 - 11	610	578	557	542	539	537	551	584	616	595	563	562
11 - 12	618	598	576	596	607	592	612	611	600	606	566	565
12 - 13	576	569	551	542	523	517	547	544	567	578	542	543
13 - 14	506	522	501	492	486	462	472	498	512	515	479	476
14 - 15	442	440	426	422	420	407	415	423	436	426	408	416
15 - 16	343	352	333	325	330	328	342	348	338	308	286	303
16 - 17	207	222	210	203	202	209	230	224	200	159	134	167
17 - 18	51	71	68	65	63	74	89	78	50	20	16	22
18 - 19	1	2	2	1	1	2	2	2	1	-	-	0
19 - 20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20 - 21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21 - 22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22 - 23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23 - 24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Suma</b>	<b>4534</b>	<b>4449</b>	<b>4343</b>	<b>4376</b>	<b>4439</b>	<b>4393</b>	<b>4553</b>	<b>4659</b>	<b>4743</b>	<b>4570</b>	<b>4263</b>	<b>4259</b>

Figura 3.3 Irradiación global horizontal

Fuente: (Solargis 2022)}

Con el objetivo de proceder a realizar la simulación del requerimiento energético del cultivo de Aurora Medicinal, es necesario contar con los datos de entrada que necesita el software; estos son los datos meteorológicos extraídos de Solargis (Anexo 1) y el estimado del consumo horario del cultivo durante un año, el cual se realizó por medio del análisis de la factura de energía obtenida para el cultivo basándose en los consumos establecidos en la Tabla 2.2 y utilizando como referencia el Anexo 2 para realizar el ajuste de los consumos horarios durante un año entero y de esta manera realizar la simulación de la forma más acertada posible.

Una vez incluidos estos datos de entrada en el Software PVSyst este realiza el cálculo de la potencia nominal a instalar en el sistema de generación solar para el proyecto, en este caso dicha potencia nominal se estima en 6,51 kWn para un total de 14 paneles solares (465 w / und) y 1 inversor de 5 kW como se puede ver en la Figura 3.4, que se traduce en 7 kWp. para ver en detalle los datos obtenidos de la simulación revisar el Anexo 3.

El cultivo consume al año 30,05 MWh de los cuales la planta solar está en la capacidad de producir 8,95 MWh/año que traducido en producción específica da como resultado la generación de 1375 kWh/kWp/año, es decir que el cultivo tomaría la energía producida por el parque solar durante el 20,55% de año. En la Figura 3.4 se muestra el detalle de los datos entregados por el Software (Medicinal 2022b)

Resumen del proyecto					
<b>Sitio geográfico</b>		<b>Situación</b>		<b>Configuración del proyecto</b>	
Aurora Medicinal_Prospect		Latitud	4.91 °N	Albedo	0.20
Colombia		Longitud	-74.46 °W		
		Altitud	1789 m		
		Zona horaria	UTC-5		
<b>Datos meteo</b>					
Aurora Medicinal_Prospect					
SolarGIS Monthly aver. , period not spec. - Sintético					

Resumen del sistema					
<b>Sistema conectado a la red</b>		<b>Sin escena 3D definida, sin sombras</b>			
Simulación para el año n° 1					
<b>Orientación campo FV</b>		<b>Sombreados cercanos</b>		<b>Necesidades del usuario</b>	
Plano fijo		Sin sombreados		Ext. definida como archivo	
Inclinación/Azimut	7 / 0 °			Hourly_Parameter_Template_Aurora Medicinal.c	
<b>Información del sistema</b>					
<b>Generador FV</b>					
Núm. de módulos	14 unidades	<b>Inversores</b>		Núm. de unidades	1 unidad
Pnom total	6.51 kWp	Pnom total		Pnom total	5.00 kWca
		Proporción Pnom			1.302

Resumen de resultados					
Energía producida	8.95 MWh/año	Producción específica	1375 kWh/kWp/año	Proporción rend. PR	84.36 %
Energía usada	30.05 MWh/año			Fracción solar (SF)	20.55 %

Figura 3.4 Resumen de resultados de la simulación

Fuente: (Medicinal 2022b)

De igual forma, con el objetivo de diseñar el sistema que mejor se adapte a los requerimientos del cultivo y poder obtener la generación deseada, se han seleccionado los paneles solares (Anexo 4) e inversores (Anexo 5) con los que se puede tener el mejor rendimiento y de igual forma se ha evaluado dentro del software el tipo de montaje que se desea realizar que corresponde a montaje en piso con los paneles solares conectados en Serie (cadena). En la Figura 3.5 se pueden ver las características técnicas del campo generador fotovoltaico que incluye la marca de los equipos principales seleccionados para el sistema solar así como las

pérdidas que se pueden presentar por el desgaste normal de los equipos, temperatura, auxiliares y mantenimiento entre otras.

Características del generador F-V			
<b>Módulo FV</b>		<b>Inversor</b>	
Fabricante	Jinkosolar	Fabricante	Huawei Technologies
Modelo	JKM465M-7RL3-V	Modelo	SUN2000-5KTL-M1 220Vac
(Definición de parámetros personalizados)		(Base de datos PVsyst original)	
Unidad Nom. Potencia	465 Wp	Unidad Nom. Potencia	5.00 kWca
Número de módulos FV	14 unidades	Número de inversores	1 unidad
Nominal (STC)	6.51 kWp	Potencia total	5.0 kWca
Módulos	1 Cadena x 14 En series	Voltaje de funcionamiento	140-980 V
En cond. de funcionam. (50°C)		Potencia máx. (=>50°C)	5.50 kWca
Pmpp	5.97 kWp	Proporción Pnom (CC:CA)	1.30
U mpp	540 V		
I mpp	11 A		
<b>Potencia FV total</b>		<b>Potencia total del inversor</b>	
Nominal (STC)	7 kWp	Potencia total	5 kWca
Total	14 módulos	Número de inversores	1 unidad
Área del módulo	31.4 m <sup>2</sup>	Proporción Pnom	1.30
Área celular	29.3 m <sup>2</sup>		

Pérdidas del conjunto					
<b>Pérdidas de suciedad del conjunto</b>		<b>Factor de pérdida térmica</b>		<b>Pérdidas de cableado CC</b>	
Frac. de pérdida	3.0 %	Temperatura módulo según irradiancia		Res. conjunto global	808 mΩ
		Uc (const)	29.0 W/m <sup>2</sup> K	Frac. de pérdida	1.5 % en STC
		Uv (viento)	0.0 W/m <sup>2</sup> K/m/s		
<b>Pérdida diodos serie</b>		<b>LID - Degradación Inducida por Luz</b>		<b>Pérdida de calidad módulo</b>	
Caída de tensión	0.7 V	Frac. de pérdida	2.0 %	Frac. de pérdida	-0.8 %
Frac. de pérdida	0.1 % en STC				
<b>Pérdidas de desajuste de módulo</b>		<b>Pérdidas de desajuste de cadenas</b>		<b>Módulo de degradación media</b>	
Frac. de pérdida	2.0 % en MPP	Frac. de pérdida	0.1 %	Año n°	1
				Factor de pérdida	0.55 %/año
				Desajuste debido a la degradación	
				Dispersión Imp RMS	0.4 %/año
				Dispersión Vmp RMS	0.4 %/año

Figura 3.5 Características del sistema solar

Fuente: (Medicinal 2022b)

Finalmente, de acuerdo con el análisis de la simulación realizada se tiene que el sistema solar fotovoltaico diseñado para el cultivo de cannabis medicinal puede realizar la entrega de excedentes de energía al sistema interconectado por un valor de 2,77 MWh/año lo que es aproximadamente el 30% de los excedentes de generación del sistema de autoconsumo (ver Figura 3.6 y Anexo 3).

El resto de la energía generada por el sistema solar que corresponde a 6,18 MWh/año será consumida por el cultivo, lo que mejora el rendimiento del cultivo al no presentarse inestabilidades en la red por el uso de los equipos con elevados requerimientos energéticos durante las horas de luz solar, disminuyendo además el costo por kWh principalmente en el proceso de la fabricación de derivados; de igual forma, en caso de pensar en una expansión del cultivo y de las áreas de transformación, se cuenta con el aproximado del 30 % de energía que puede ser consumido por el cultivo en vez de entregarla como excedentes.

	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	DiffHor kWh/m <sup>2</sup>	T_Amb °C	GlobInc kWh/m <sup>2</sup>	GlobEff kWh/m <sup>2</sup>	EArray MWh	E_User MWh	E_Solar MWh	E_Grid MWh	EFrGrid MWh
Enero	140.6	75.60	19.70	146.0	140.8	0.829	6.415	0.806	-0.002	5.609
Febrero	124.6	73.90	20.10	127.3	122.7	0.723	1.200	0.399	0.302	0.801
Marzo	134.6	87.20	20.20	135.1	130.1	0.768	1.200	0.392	0.334	0.808
Abril	131.3	81.70	20.10	129.2	124.3	0.737	1.200	0.420	0.289	0.780
Mayo	137.6	81.10	19.80	133.3	128.2	0.767	6.415	0.746	-0.002	5.669
Junio	131.8	75.00	19.40	126.4	121.5	0.730	1.200	0.411	0.275	0.789
Julio	141.2	78.00	19.20	136.6	130.3	0.781	1.200	0.434	0.324	0.766
Agosto	144.4	81.20	19.50	140.8	135.3	0.806	1.200	0.453	0.330	0.747
Septiembre	142.3	80.00	19.70	141.8	136.6	0.808	6.415	0.769	-0.002	5.646
Octubre	141.7	80.70	19.70	143.6	138.4	0.815	1.200	0.478	0.314	0.722
Noviembre	127.9	75.10	19.80	132.4	127.5	0.758	1.200	0.444	0.290	0.756
Diciembre	132.0	74.30	19.80	138.0	133.1	0.788	1.200	0.424	0.321	0.776
Año	1630.0	943.78	19.75	1629.5	1568.8	9.311	30.045	6.176	2.774	23.869

**Legendas**

GlobHor	Irradiación horizontal global	EArray	Energía efectiva a la salida del conjunto
DiffHor	Irradiación difusa horizontal	E_User	Energía suministrada al usuario
T_Amb	Temperatura ambiente	E_Solar	Energía del sol
GlobInc	Global incidente plano receptor	E_Grid	Energía inyectada en la red
GlobEff	Global efectivo, corr. para IAM y sombreados	EFrGrid	Energía de la red

*Figura 3.6 Resultados principales de la simulación*

Fuente: (Medicinal 2022b)

### 3.2 Diseño conceptual de Sistema Solar Fotovoltaico

De acuerdo con la simulación realizada en el Software PVSyst, se pudo establecer que el área requerida para la construcción del sistema solar fotovoltaico es de aproximadamente 40 m<sup>2</sup> considerando el área libre que debe quedar en el perímetro del sistema para poder realizar las actividades de mantenimiento de este, adicionalmente se diseñó el sistema con una inclinación del 10% para garantizar el autolavado de los paneles durante periodos de lluvia y de esta forma realizar autolimpiezas periódicas.

En este sentido, es necesario identificar el área adecuada para la instalación del sistema solar teniendo en cuenta el área requerida por la compañía para la expansión del cultivo en dos invernaderos adicionales, por lo tanto se validó el área disponible en el predio para la instalación del sistema, el cual, si bien no necesita un área muy grande si tienen requerimientos adicionales para el adecuado funcionamiento del sistema durante la vida útil del cultivo y hacen referencia a pendientes inferiores al 10%, suelos consolidados en donde no se evidencie preliminarmente presencia de suelos rocosos, suelos consolidados, que sea un área que no se encuentre rodeada por vegetación con el fin de evitar sombras y pérdidas de energía asociadas a las mismas.

Finalmente se buscó que el área seleccionada no se encontrara en la ronda hídrica de cuerpos de agua, puesto que, de acuerdo con lo establecido en la guía técnica de criterios para el acotamiento de rondas hídricas en Colombia del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Buitrago et al. 2018) se debe respetar una franja de retiro de 30 metros de cualquier cuerpo de agua natural.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriormente descritas, se eligió un área dentro del predio que cuente con las características necesarias para la operación del sistema solar. En la Figura 3.7 y en el Anexo 6 se muestra la ubicación del sistema solar compuesto por 14 paneles en dos cadenas de 7 paneles cada uno, el cual por estar considerado en sistema fijo se ubica en posición Norte – Sur para aprovechar la radiación solar durante todo el día que será conectado a un inversor ubicado dentro de las facilidades administrativas del Cultivo.

La estructura sobre la cual se montará el proyecto consiste en una estructura metálica capaz de mantener el peso de los paneles solares durante la vida útil del proyecto, la misma será

enterrada por medio de una máquina hincadora a una profundidad entre 1 y 2 metros de profundidad de acuerdo con el análisis de las propiedades del suelo en el predio, esto se hace con el fin de garantizar la ubicación de los paneles durante la vida útil de los mismos ya que en caso de presentarse una inclinación en la ubicación de las mesas se está perdiendo eficiencia de generación por el cambio en el ángulo que llega la radiación sobre los paneles.



*Figura 3.7 Ubicación del sistema Solar*

Fuente: (Celis 2022b)

Con el ánimo de representar gráficamente la distribución de equipos y dispositivos que componen el sistema solar fotovoltaico, en la Figura 3.8 se puede ver el diagrama unifilar diseñado para el proyecto. Para poder ver en mayor detalle la información contenida en el diagrama unifilar ver el Anexo 7.

## DIAGRAMA UNIFILAR SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO 6.51 kWp

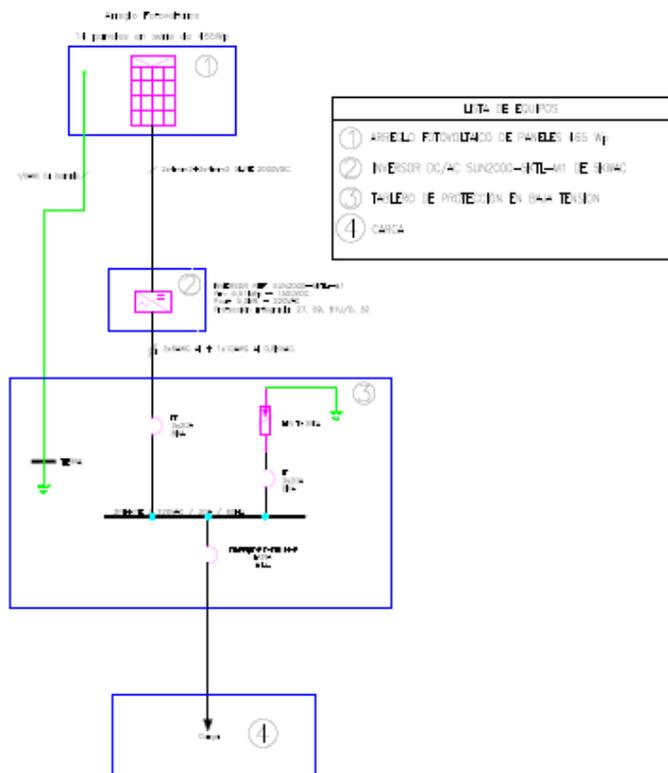


Figura 3.8 Diagrama conceptual del unifilar para el sistema solar

Fuente: (Celis 2022a)

### 3.3 Estructuración de Costos

Después de realizar las simulaciones descritas en el numeral anterior, se procedió a realizar un diseño de ingeniería conceptual en dónde se ajustaron los requerimientos del sistema solar para ser incluidos dentro del cultivo de cannabis medicinal, en este diseño se dimensionaron el número de equipos principales, auxiliares y estudios necesarios para que el sistema funcione adecuadamente durante una vida útil de 25 años.

En la Tabla 3.1 se muestra el detalle de los equipos y demás componentes que hacen parte del sistema solar, en este orden de ideas, para un consumo promedio de energía de 1200 kWh/mes, se realizó un diseño del sistema solar con una potencia instalada de 6,51 kWp, capaz de producir en promedio 800 kWh, por medio de la instalación de 14 paneles solares Jinko 465 Wp que son los que más se adaptan a los requerimientos del cultivo por relación costo beneficio y 1 inversor Huawei 5 kW en un área de 40 m<sup>2</sup> considerando el espacio necesario para realizar las actividades de mantenimiento del sistema solar fotovoltaico.

Ítem	Descripción	Cantidad	Costo COP
1	Panel Fotovoltaico Jinko 465 Wp	14	20.000.000
2	Inversor Huawei 5 kW	1	3.000.000
3	Estructura Aluminio tipo piso	1	5.000.000
4	Cableado y accesorios	1	2.000.000

Ítem	Descripción	Cantidad	Costo COP
5	Sistema de Monitoreo	1	2.000.000
6	Medidor Bidireccional	1	5.000.000
7	Certificación RETIE	1	1.000.000
8	Tramites e incentivos tributarios	1	1.000.000
9	Estudio de Conexión	1	2.870.000
10	Ingeniería, Logística, Construcción y permisos	1	8.000.000

*Tabla 3.1 Descripción de equipos, auxiliares y estudios*

Fuente: Autor, 2022.

Luego de realizar este análisis, se estableció el costo total que tiene el sistema solar fotovoltaico a valores actuales del mercado colombiano por medio de la solicitud de cotización con la empresa Erco Energía, identificando que el CapEx (Capital Expenditure) que en español significa la inversión de capital es de COP \$ 49.870.000 IVA incluido o indicador de COP \$ 6.320 wp instalado para el sistema de 6,51 kWp.

Por otro lado, se realizó el análisis del OpEx (Operational Expenditures) que en español significa Costo Operacional el cual establece los costos fijos durante la etapa de operación de 25 años en los que se debe incurrir para el adecuado funcionamiento del sistema, encontrando que este valor en el año 1 es del orden de los COP \$ 704.000 y en el año 25 es de COP \$ 2.850.000; la fluctuación de estos costos están asociados al incremento de indicadores financieros como inflación, aumento de IPC, IPP entre otros factores (ver Anexo 8).

Finalmente, en la Tabla 4.2 se muestra el análisis financiero del proyecto en donde se realiza una comparación inicial entre el precio de venta actual del kWh por parte de la comercializadora, el precio de compra de la comercializadora de los excedentes de generación del cultivo, que como se mencionó anteriormente corresponden al costo del kWh menos el componente de comercialización, la energía generada anualmente, la energía auto consumida por el cultivo y la energía entregada como excedentes.

De la misma forma, con el objetivo de establecer las utilidades del proyecto se realiza el análisis financiero en donde se resta la inversión inicial del proyecto, la cual se da en el año 0, los costos anuales de operación y mantenimiento del proyecto y se suman el ahorro en la energía auto consumida, los excedentes de energía entregados a la red y los beneficios de la implementación de la ley 1715 que corresponden a la devolución del IVA, el descuento tributario y la depreciación acelerada de los equipos en los primeros 4 años de vida útil del proyecto.

Finalmente se obtiene como resultado el Flujo de caja acumulado del proyecto en el cual se puede comprobar que el proyecto encuentra el punto de equilibrio a partir del cuarto año y a partir de este momento genera un ahorro anual promedio de COP \$ 13 millones de pesos por la vida útil del proyecto. Este valor indica que el proyecto empieza a ser rentable por sí solo a partir del 4 año, lo cual es beneficioso para el cultivo puesto que el horizonte analizado es de 25 años.

## **4 Análisis de la implementación de un sistema solar fotovoltaico en el cultivo de Cannabis agroindustrial**

### **4.1 Análisis Ambiental**

Implementar un sistema solar fotovoltaico que permita al cultivo de cannabis generar y consumir energía renovable en un porcentaje de la energía total requerida para el desarrollo de las actividades del cultivo de cannabis, así como entregar los excedentes de energía al Sistema

Interconectado Nacional SIN, genera una serie de impactos ambientales tanto positivos como negativos durante cada una de las etapas que componen el proyecto.

En la Tabla 4.1 se puede ver cada uno de los impactos ambientales identificados que son generados durante cada una de las actividades que componen las fases de construcción, operación y desmantelamiento del proyecto. La cual se hizo teniendo en cuenta el listado de impactos ambientales específicos establecidos en el marco del licenciamiento ambiental del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Urbana y Sostenible 2020).

En la Tabla 4.1 se puede ver que se presentan interacciones entre las actividades del proyecto y los componentes abiótico, biótico y socioeconómico, de estas interacciones hay algunas que son de carácter negativo producto de las actividades que tienen lugar en las etapas de construcción y operación, esto se debe a que, naturalmente se requiere hacer una intervención en el terreno para realizar la construcción, sin embargo estas interacciones se pueden calificar como impactos irrelevantes puesto que se realizan en un área que ya ha sido intervenida para llevar a cabo actividades agroindustriales, por lo que no es necesario intervenir ecosistemas estratégicos.

De igual forma hay interacciones de carácter positivo referentes a la contratación de personal, generación de energía y etapa de desmantelamiento que tienen incidencia directa en la economía de la región producto de la generación de empleo para las actividades constructivas y de operación del sistema solar, disminución de requerimiento de servicios ecosistémicos como combustibles fósiles y recurso hídricos atribuibles al uso de energía solar como una fuente no convencional de energía renovable y finalmente, en la etapa de desmantelamiento del sistema solar puesto que se realizarán acciones enfocadas a la reconfiguración del terreno y mejoramiento del mismo.

La instalación y puesta en marcha del sistema solar presenta impactos que son considerados como irrelevantes debido a la duración de las actividades, uso actual del suelo, el tamaño del proyecto entre otros factores, se evidencia que este proyecto puede ser implementado dentro del cultivo de la compañía sin generar un daño ecosistémico y social implícitamente; sin embargo la puesta en marcha trae beneficios principalmente socioeconómicos que pueden llevar a la compañía a ser una empresa reconocida en el mercado por su compromiso ambiental y social.

Este panorama se puede dar puesto que implementando el sistema solar se compensa la emisión de 5,48 Toneladas de CO<sub>2</sub> anualmente, este es el equivalente a sacar de circulación 6 vehículos de combustión interna que usan combustibles fósiles como fuente de energía, el proyecto también es comparable a realizar la reforestación de 20 árboles anualmente; lo cual, sumado a la captura de CO<sub>2</sub> de las plantas de cannabis permite que Aurora Medicinal pueda convertirse en una compañía carbono neutral, alineándose con los objetivos como país hacia la transición energética y el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (CONPES 2018).

De igual forma, en pro de garantizar la sostenibilidad del proyecto durante todo el ciclo de vida se garantizará que se realice la sustitución de equipos y la disposición final de los sistemas fotovoltaicos cuando se requiera producto del cumplimiento de la vida útil del parque solar de acuerdo con lo establecido en el protocolo para el manejo de residuos de aparatos electrónicos y eléctricos – RAEE para sistemas fotovoltaicos (Fotovoltaicos 2019) y demás lineamientos establecidos en la normatividad ambiental colombiana.

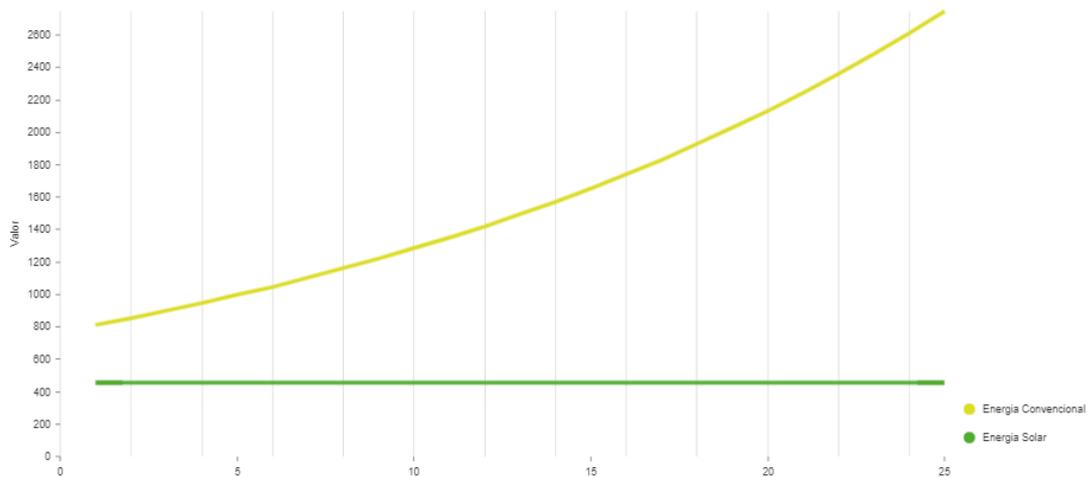
Descripción			Construcción						Operación y mantenimiento			Desmantelamiento		
Componente	Elemento	Impacto Específico	Contratación de	Preparación del terreno	Anclaje de	Montaje de Paneles	Conexión al	Conexión al Medidor	Rocería	Generación de	Lavado y secado de paneles	Retiro de infraestructura	Disposición final	Reconformación del
Abiótico	geomorfológico	Alteración de la geoforma del terreno		X (-)	X (-)	X (-)	-	-	-	X (+)	-	X (+)	-	X (+)
	Suelo	Alteración a la calidad del suelo	-	X (-)	-	-	-	-	-	X (+)	X (-)	X (+)	-	X (+)
	Atmosférico	Alteración a la calidad del aire	-	X (-)	-	X (-)	X (-)	X (-)	X (-)	X (+)	X (-)	X (+)	-	X (+)
		Alteración en los niveles de presión sonora	-	X (-)	X (-)	X (-)	X (-)	X (-)	X (-)	X (+)	X (-)	X (+)	-	X (+)
	Hidrología	Alteración en la calidad del recurso hídrico superficial	-	X (-)	-	-	-	-	X (-)	X (+)	X (-)	X (+)	-	X (+)
Biótico	Ecosistema	Alteración a ecosistemas terrestres	-	X (-)	-	X (-)	X (-)	X (-)	-	X (+)	-	X (+)	X (+)	X (+)
	Fauna	Alteración a comunidades de fauna terrestre	-	X (-)	-	X (-)	X (-)	X (-)	-	X (+)	-	X (+)	X (+)	X (+)
	Flora	Alteración a cobertura vegetal	-	X (-)	X (-)	X (-)	X (-)	X (-)	X (-)	X (+)	-	X (+)	X (+)	X (+)
Socioeconómico	Cultural	Cambio en el uso del suelo	-	X (-)	X (-)	X (-)	X (-)	X (-)	-	X (+)	-	X (+)	X (+)	X (+)
	Paisaje	Alteración en la percepción visual del paisaje	-	X (-)	-	X (-)	X (-)	X (-)	-	X (+)	-	X (+)	X (+)	X (+)
	Económico	Modificación de las actividades económicas de la zona	X (+)	-	-	-	-	-	-	X (+)	-	-	X (+)	-

Tabla 4.1 Matriz de Evaluación de Impactos

Fuente: Autor, 2022.

## 4.2 Evaluación Financiera

Con la implementación del sistema solar fotovoltaico se puede analizar inicialmente de la Figura 4.1 que el costo de la energía generada solar será constante en el escenario de tiempo analizado (25 años) en COP \$ 450, por otro lado, teniendo en cuenta un factor de crecimiento anual del 5,2% en el precio del kWh proveniente de la red se puede ver que la tarifa en el año 0 es de COP \$813 kWh y en el año 25 COP \$ 2700 en promedio, lo que significa que en el caso de operar de la manera en la que se viene haciendo, al costo final de los productos anualmente se tendrá que incrementar un porcentaje que cubra los costos de la factura de energía eléctrica con el objetivo de cubrir los costos de producción del producto.

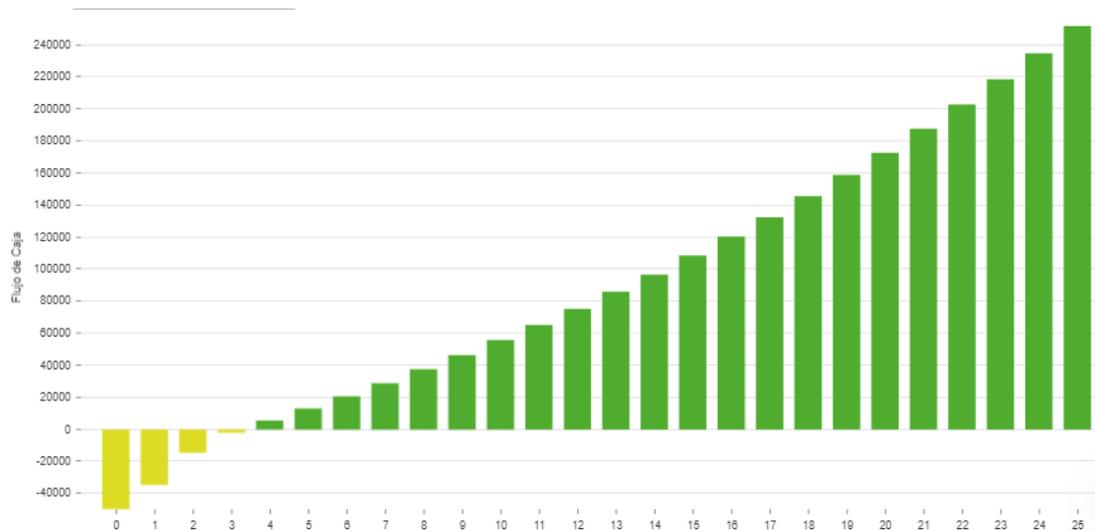


*Figura 4.1 Comparación del costo de generación de energía*

Fuente: Autor, 2022.

Lo anterior significa que, en el escenario en el que se implemente el sistema solar fotovoltaico los costos de generación de energía permanecerán constantes y por medio de los beneficios que ofrece la Ley 1715 y la Resolución 174 del 2021 de la CREG se recuperará la inversión en un periodo de tiempo de 4 años, a partir del año 5 de la vida útil del sistema solar se puede ver en la Figura 4.2 como el flujo de caja del proyecto aumenta anualmente en aproximadamente un 10%; así mismo este proyecto presenta una Tasa Interna de Retorno TIR del 24,45%.

Financieramente se establece que una  $TIR > 0$  es aceptable ya que la rentabilidad del proyecto es mayor a los costos de inversión, por lo que esto significa que es un proyecto seguro en el cual invertir; estándares empresariales más competitivos evalúan proyectos con una TIR por encima del 10%, por lo que comparándolos con este proyecto en particular se puede ver como por medio de la generación de energía del sistema solar permitirá al cultivo mejorar los índices de competitividad en el mercado sin tener que disminuir la calidad de sus productos, por el contrario puede mantener el precio comercial de los mismos obteniendo márgenes de utilidad más atractivos ya que de acuerdo con el gerente general de Aurora Medicinal aproximadamente el 12% de los costos de producción de los derivados están asociados a los requerimientos energéticos del ciclo de vida del cannabis medicinal.



*Figura 4.2 Retorno de la Inversión*

Fuente: Autor, 2022.

Finalmente, en la Tabla 4.2 se muestra el análisis financiero del proyecto en dónde se realiza una comparación inicial entre el precio de venta actual del kWh por parte de la comercializadora, el precio de compra de la comercializadora de los excedentes de generación del cultivo, que como se mencionó anteriormente corresponden al costo del kWh menos el componente de comercialización, la energía generada anualmente, la energía auto consumida por el cultivo y la energía entregada como excedentes.

De la misma forma, con el objetivo de establecer las utilidades del proyecto se realiza el análisis financiero en donde se resta la inversión inicial del proyecto, la cual se da en el año 0, los costos anuales de operación y mantenimiento del proyecto y se suman el ahorro en la energía auto consumida, los excedentes de energía entregados a la red y los beneficios de la implementación de la ley 1715 que corresponden a la devolución del IVA, el descuento tributario y la depreciación acelerada de los equipos en los primeros 4 años de vida útil del proyecto.

Finalmente se obtiene como resultado el Flujo de caja acumulado del proyecto en el cual se puede comprobar que el proyecto encuentra el punto de equilibrio a partir del cuarto año y a partir de este momento genera un ahorro anual promedio de COP \$ 13 millones de pesos por la vida útil del proyecto.

Año	Costo Energía [COP/kWh]	Tarifa Comercialización	Producción Energía [kWh/año]	Energía Inyectada [kWh/año]	Energía Autoconsumo [kWh/año]	Inversión [COP*1000]	Mantenimiento [COP*1000]	Ahorro Energía [COP\$MM]	Ahorro Energía Inyectada [COP\$MM]	Recuperación IVA [COP\$MM]	Descuento Tributario [COP\$MM]	Depreciación acelerada [COPMM]	Flujo de caja [COP\$MM]	Flujo de caja acumulado [COP\$MM]
0	\$ 0	\$ 0	0	0	0	-\$ 49,88	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	-\$ 50	-\$ 50
1	\$ 814	\$ 615	9,402	2,821	6,581	\$ 0	-\$ 704	\$ 5,36	\$ 1,74	\$ 3,36	\$ 0	\$ 5,4	\$ 15	-\$ 35
2	\$ 856	\$ 647	9,337	2,801	6,536	\$ 0	-\$ 746	\$ 5,59	\$ 1,81	\$ 0	\$ 8	\$ 5,4	\$ 20	-\$ 14
3	\$ 900	\$ 681	9,271	2,781	6,490	\$ 0	-\$ 791	\$ 5,84	\$ 1,89	\$ 0	\$ 0	\$ 5,4	\$ 12	-\$ 2
4	\$ 947	\$ 716	9,205	2,762	6,443	\$ 0	-\$ 838	\$ 6,10	\$ 1,98	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 7	\$ 5
5	\$ 996	\$ 754	9,139	2,742	6,397	\$ 0	-\$ 889	\$ 6,38	\$ 2,07	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 8	\$ 13
6	\$ 1,05	\$ 793	9,073	2,722	6,351	\$ 0	-\$ 942	\$ 6,66	\$ 2,16	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 8	\$ 21
7	\$ 1,10	\$ 834	9,007	2,702	6,305	\$ 0	-\$ 999	\$ 6,95	\$ 2,25	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 8	\$ 29
8	\$ 1,16	\$ 877	8,942	2,683	6,259	\$ 0	-\$ 1,06	\$ 7,26	\$ 2,35	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 9	\$ 37
9	\$ 1,22	\$ 923	8,876	2,663	6,213	\$ 0	-\$ 1,12	\$ 7,58	\$ 2,46	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 9	\$ 46
10	\$ 1,28	\$ 971	8,810	2,643	6,167	\$ 0	-\$ 1,19	\$ 7,92	\$ 2,57	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 9	\$ 56
11	\$ 1,35	\$ 1,02	8,744	2,623	6,121	\$ 0	-\$ 1,26	\$ 8,27	\$ 2,68	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 10	\$ 65
12	\$ 1,42	\$ 1,08	8,678	2,603	6,075	\$ 0	-\$ 1,34	\$ 8,63	\$ 2,80	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 10	\$ 75
13	\$ 1,50	\$ 1,13	8,613	2,584	6,029	\$ 0	-\$ 1,42	\$ 9,01	\$ 2,92	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 11	\$ 86
14	\$ 1,57	\$ 1,19	8,547	2,564	5,983	\$ 0	-\$ 1,50	\$ 9,41	\$ 3,05	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 11	\$ 97
15	\$ 1,65	\$ 1,25	8,481	2,544	5,937	\$ 0	-\$ 1,59	\$ 9,82	\$ 3,18	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 11	\$ 108
16	\$ 1,74	\$ 1,32	8,415	2,525	5,890	\$ 0	-\$ 1,69	\$ 10,25	\$ 3,32	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 12	\$ 120
17	\$ 1,83	\$ 1,39	8,349	2,505	5,844	\$ 0	-\$ 1,79	\$ 10,70	\$ 3,47	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 12	\$ 132
18	\$ 1,93	\$ 1,46	8,284	2,485	5,799	\$ 0	-\$ 1,90	\$ 11,17	\$ 3,62	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 13	\$ 145
19	\$ 2,03	\$ 1,53	8,218	2,465	5,753	\$ 0	-\$ 2,01	\$ 11,66	\$ 3,78	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 13	\$ 159
20	\$ 2,13	\$ 1,61	8,152	2,446	5,706	\$ 0	-\$ 2,13	\$ 12,16	\$ 3,94	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 14	\$ 173
21	\$ 2,24	\$ 1,70	8,086	2,426	5,660	\$ 0	-\$ 2,26	\$ 12,69	\$ 4,11	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 15	\$ 187
22	\$ 2,36	\$ 1,78	8,020	2,406	5,614	\$ 0	-\$ 2,39	\$ 13,24	\$ 4,29	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 15	\$ 202
23	\$ 2,48	\$ 1,88	7,954	2,386	5,568	\$ 0	-\$ 2,54	\$ 13,82	\$ 4,48	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 16	\$ 218
24	\$ 2,61	\$ 1,97	7,889	2,367	5,522	\$ 0	-\$ 2,69	\$ 14,42	\$ 4,67	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 16	\$ 235
25	\$ 2,75	\$ 2,08	7,823	2,347	5,476	\$ 0	-\$ 2,85	\$ 15,04	\$ 4,88	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 17	\$ 252

Tabla 4.2 Análisis Financiero

Fuente: Autor, 2022.

### 4.3 Evaluación Técnica

La implementación del sistema solar fotovoltaico en el cultivo de cannabis medicinal desde el enfoque técnico se daría de manera viable, ya que, al utilizar un área que no cuenta con las características productivas necesarias para la ampliación del cultivo, no se generarían impactos abióticos, bióticos o socio económicos negativos asociados a las actividades de la compañía y que se puedan entender como una pérdida de ingresos fruto de la implementación del sistema.

Adicionalmente, al contar con un sistema fotovoltaico para el autoconsumo de energía eléctrica dentro de las facilidades de la compañía, se aumenta la confiabilidad del consumo de energía eléctrica durante las horas diurnas, que son normalmente las horas en las que se llevan a cabo los procesos de transformación en la industria del cannabis y es dónde se presentan los mayores requerimientos energéticos producto de la necesidad de utilizar maquinaria y equipos intensivos en energía. Basándose en información recolectada en campo, cuando los equipos del área de transformación se utilizan durante el día en las condiciones actuales de la red, la estabilidad del sistema de distribución local se ve afectada generando intermitencias o bajones en la prestación del servicio, por lo que, para solucionar este inconveniente, en la compañía, las labores de transformación se están realizando en la madrugada cuando el uso de energía disminuye en la zona.

Por esta razón, por medio de la implementación del sistema solar fotovoltaico no solo se puede retomar la transformación del cannabis en derivados en horarios diurnos de trabajo debido al aumento en la confiabilidad del sistema de distribución local SDL sino que también se pueden ahorrar costos producto del horario convencional de trabajo durante la jornada habitual en el país.

## 5 Conclusiones

- ❖ El potencial energético producto de la implementación del sistema solar fotovoltaico dentro del cultivo de cannabis medicinal genera un mejor rendimiento del cultivo puesto que durante la jornada diurna no es necesario acotar actividades que consuman mucha energía como los procesos de transformación de cannabis.
- ❖ La implementación de los sistemas solares fotovoltaicos en la industria del cannabis medicinal en el país, de acuerdo con el análisis ambiental y de sostenibilidad tiene el potencial de convertirse en una industria de carbono neutro ya que al ser un proyecto de energía por medio del uso de Fuentes No Convencionales De Energía Renovable FNCER compensa el carbono emitido por la actividad principal.
- ❖ La sinergia entre los dos sectores productivos genera valor ya que se alcanzan varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible que el país adoptó en la COP 21 y que se ratifican en la COP 26. La implementación de la tecnología solar en la industria agroindustrial de cannabis medicinal permite a los productores la emisión de bonos de carbono, lo cual significa una ventaja ambiental y financiera para los productores de cannabis.
- ❖ Por medio de la implementación de la ley 1715 y las normas que la modifican, complementan o derogan se solicitan y posteriormente se obtienen los beneficios tributarios que se otorgan por medio de la mencionada ley, estos garantizan la viabilidad financiera del proyecto mejorando los indicadores financieros que corresponden a la Tasa Interna de Retorno TIR y el Valor Presente Neto del mismo VPN.
- ❖ Dado que la mayoría de los cultivos de cannabis implementados en el país se ubican en las zonas rurales de los municipios, es común identificar que las redes de distribución pertenecientes al Sistema de Distribución Local en dichos lugares sean redes

desactualizadas que pueden presentar saturación ante la conexión de cualquier equipo. En el caso de los cultivos de cannabis, que es una industria intensiva en el consumo de energía significa la confiabilidad de poder continuar con el proceso productivo del ciclo de vida aún en las horas del día que mayores consumos se presentan en la zona sin causar un evento de falla o inestabilidad del sistema.

- ❖ Con la implementación del sistema de energía solar fotovoltaica en los cultivos de cannabis es más probable que estos proyectos obtengan financiamiento o capitalizaciones por parte de grupos financieros interesados en realizar inversiones en proyectos sostenibles que garanticen los compromisos de del país en la COP 21 y ratificados en la COP 26.

## 6 Recomendaciones

- ❖ Si bien el diseño y análisis multivariable se realizaron sobre el estudio de caso de Aurora Medicinal, se recomienda la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en los cultivos que requieran tener un mayor índice de confiabilidad en el abastecimiento de energía eléctrica.
- ❖ La implementación de sistemas solares fotovoltaicos en cultivos de cannabis agroindustrial se recomiendan en todos los pisos térmicos del país ya que el potencial solar del país puede ser aprovechado en todo el territorio nacional.
- ❖ Si bien la implementación del sistema solar fotovoltaico responde de manera adecuada a las necesidades del cultivo del caso de estudio, como continuación de la presente línea de investigación se propone evaluar la implementación del sistema de almacenamiento con baterías con el fin de aprovechar los excedentes de generación en el cultivo durante el periodo nocturno en el cual los requerimientos energéticos siguen siendo muy importantes.
- ❖ En la visita realizada al cultivo de aurora medicinal se evidenció un volumen importante de residuos orgánicos producto de las actividades propias del cultivo, con el objetivo implementar medias de economía circular, se recomienda implementar líneas de investigación que permitan aprovechar la energía térmica que ofrecen dichos residuos en los cultivos y de esta manera atender los requerimientos térmicos de los cultivos.
- ❖ Teniendo en cuenta el área requerida para la implementación del sistema solar, se recomienda evaluar la viabilidad de implementarlos en techos y de esta forma optimizar el área efectiva del sistema solar y de los planes de expansión de los cultivos.
- ❖ La implementación de soluciones solares en cultivos agroindustriales de cannabis disminuye significativamente la huella de carbono de estos últimos, sin embargo, debido a la novedad del sector, se recomienda profundizar en la identificación y manejo de los impactos ambientales que se generan con el crecimiento del sector de cannabis agroindustrial.

## 7 Bibliografía

- Agronegocios. 2019. «Los costos que hay cuando recién se comienza en un cultivo de cannabis a nivel local». Recuperado 21 de agosto de 2022 (<https://www.agronegocios.co/tecnologia/los-costos-que-hay-cuando-recien-se-comienza-en-un-cultivo-de-cannabis-a-nivel-local-2906598>).
- Agronegocios. 2022. «Cannabis, el oro verde legalizado e industrializado que puede conquistar el mercado».
- Alberto, Jorge, y Valencia Marín. 2014. «Invierta y Gane con Energía».
- Andrés, Carlos, y Estupiñán Iglesias. 2021. «Estudio de prefactibilidad para una planta de producción y comercialización de cannabis medicinal».
- Banco Mundial. 2022. «Colombia lidera el camino hacia la sostenibilidad en América Latina». Recuperado 13 de octubre de 2022 (<https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2022/08/31/colombia-leading-the-path-to-sustainability-in-latin-america>).
- Brigard Urrutia. 2022. «La nueva regulación del cannabis para usos industriales en Colombia | Brigard Urrutia». Recuperado 30 de agosto de 2022 (<https://bu.com.co/es/noticias-old/la-nueva-regulacion-del-cannabis-para-usos-industriales-en-colombia>).
- Buitrago, Claudia, Sergio Salazar, Claudia Patricia, Pineda González, Carlos Arturo Álvarez, Luis Alfonso, Escobar Trujillo, Ricardo Arnold, Baduin Ricardo, Diana Marcela, Moreno Barco, Luz Francly, Navarro Cuervo, Tania Fernanda, Santos Santos, Edgar Olaya Ospina, Gina Paola, Gallo Gil, Javier Eduardo, Posada Muñoz, Walter Leonardo, Niño Parra, Juan Sebastián Hernández, Andrés Felipe Rojas, Hilda María, Palacio Betancur, Diego González Parra, Hernando Ovalle, Oscar Hernán Manrique, Natalia María Ramirez, Laura Flórez Botero, Miriam Benjumea Hernández, Jenny Machado, José David, Ramírez Abraham, Mario Alberto Jimenez, Henry Garzón Sánchez, Jose David Ramirez, Abraham John, Jairo Gallego, José Manuel, Mojica Vélez, Carolina Neme, Alberto Zarate Yepes, Clara Inés, y Villegas Palacio. 2018. «Guía Técnica De Criterios Para El Acotamiento De Las Rondas Hídricas En Colombia». *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial* 1-86.
- Businesswire. 2019. «Cannadescent™ completa primer proyecto solar a nivel mundial para la producción de cannabis a escala comercial | Business Wire». Recuperado 8 de diciembre de 2022 (<https://www.businesswire.com/news/home/20190318005808/es/>).
- Cardona, Andrés Octavio. 2019. «Conozca los diferentes tipos de cultivos si quiere emprender en la industria cannábica». *Agronegocios*.
- Castañeda, Camilo, y Ingrid Ballesteros Ordóñez. 2019. «El viaje del cannabis medicinal en Colombia ¿cómo empezó esta historia?» Recuperado 30 de agosto de 2022 (<https://www.neuroeconomix.com/es/el-viaje-del-cannabis-medicinal-en-colombia-como-empezo-esta-historia/>).
- Celis, Santiago. 2022a. *DIAGRAMA UNIFILAR SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO 6.51 kWp*.
- Celis, Santiago. 2022b. «Mesas distribución cantidad potencia [kw]». 545.
- CONPES. 2018. «Estrategia para la implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en Colombia». *Documento Conpes 3918 74*.

- Conservancy, The Cannabis, y Cultivation Facilities. 2018. «Cannabis Cultivation , Energy Consumption and Sustainability 101 : Optimizing Design of Cultivation Facilities».
- Cotrina, Judy Vanessa Pastrana. 2020. *DISEÑO DE UNA PLANTA PARA LA FABRICACIÓN DE DERIVADOS DE CANNABIS EN EL MERCADO EMERGENTE COLOMBIANO Y EVALUACIÓN DE EFICIENCIA DEL LAYOUT PROPUESTO*.
- Denver, Renewable De. 2020. «Plan de Acción de Electricidad 100 % Renovable de Denver».
- Diario, El País. 2021. «Colombia saca músculo en el mercado del cannabis medicinal y pone en alerta a Canadá | Economía | América | EL PAÍS América». Recuperado 23 de mayo de 2022 (<https://elpais.com/economia/2021-09-02/colombia-saca-musculo-en-el-mercado-del-cannabis-medicinal-y-pone-en-alerta-a-canada.html>).
- Endocanabinoide, Centro de estudios y asesoramiento sobre el sistema. 2021. *Historia del cannabis / CE.ME.SEC*.
- España, El Diario. 2019. «Cannabis: la historia de la hipocresía humana». Recuperado 28 de agosto de 2022 ([https://www.eldiario.es/sociedad/cannabis-historia-hipocresia-humana\\_1\\_1481930.html](https://www.eldiario.es/sociedad/cannabis-historia-hipocresia-humana_1_1481930.html)).
- Fotovoltaicos, Sistemas. 2019. «Protocolo Para El Manejo De Residuos De Aparatos Eléctricos Y Electrónicos - Raee-». 8.
- Garzón, Dolli Xiomara Ariza, Luis Fernando Ugas Wies, y Kenny Ramírez Acevedo. 2019. «Plan de Negocios Para la Producción y Exportación De Cannabis Medicinal». *POLITÉCNICO GRAN COLOMBIANO* 1-159.
- Martinez, Nicolas. 2019. «Los desafíos del cannabis medicinal en Colombia. Una mirada a los medianos y pequeños productores». *Informe sobre políticas de drogas* 1-28.
- Medicinal, Aurora. 2022a. «Productos y Servicios Cannabis Medicinal CBD | Aurora Medicinal». Recuperado 9 de diciembre de 2022 (<https://auromedicinal.com/>).
- Medicinal, Aurora. 2022b. «PVsyst - Informe de simulación».
- MEHBOOB, NAFEESA, HANY E. Z. FARAG, y ABDULLAH M. SAWAS. 2020. «Energy Consumption Model for Indoor Cannabis Cultivation Facility». *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics* 1343-48. Recuperado 29 de agosto de 2022 ([https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4405051&casa\\_token=geFETzjuYooAAAAA:2\\_Hb4AUCKNIV9SJOGZKpkv8GB\\_DwIuTU0A4GfMyCc44LIEMKz7OpjKTFzmC8tAmzXW5NfB93iRU%0Ahttps://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9511469%0Ahttps://ieeexplore-ie](https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4405051&casa_token=geFETzjuYooAAAAA:2_Hb4AUCKNIV9SJOGZKpkv8GB_DwIuTU0A4GfMyCc44LIEMKz7OpjKTFzmC8tAmzXW5NfB93iRU%0Ahttps://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9511469%0Ahttps://ieeexplore-ie)).
- Mundial, EL orden. 2022. «El mapa de la legalización del cannabis en el mundo - Mapas de El Orden Mundial - EOM». Recuperado 29 de agosto de 2022 (<https://elordenmundial.com/mapas-y-graficos/mapa-legalizacion-cannabis-mundo/>).
- Portafolio. 2021. «Cannabis medicinal, una oportunidad de ‘oro verde’ para Colombia | Economía | Portafolio». Recuperado 23 de mayo de 2022 (<https://www.portafolio.co/economia/cannabis-medicinal-una-oportunidad-de-oro-verde-para-colombia-553745>).
- Ramirez, Juan Mauricio, Julián Naranjo, y Andrea Torres. 2019. «La industria del cannabis medicinal en Colombia: Una ventana de oportunidad para la transformación.»

*Fedesarrollo 44.*

República, Congreso de la. 2016. *Ley 1787*. Vol. 2.

República, Diario La. 2022a. «Cannabis regulado e ilícito genera ingresos de más de US\$344.000 millones en el mundo». *Diario La República*.

República, Diario La. 2022b. «Hasta la fecha en Colombia se han solicitado 2.634 licencias de cultivo de cannabis».

Semillas de Cannabis. 2020. «Cultivar Marihuana en Invernadero: Descubre La Guía Definitiva». Recuperado 20 de noviembre de 2022 (<https://www.semillas-de-marihuana.com/blog/cultivar-marihuana-invernadero/>).

Solargis. 2022. «Evaluación preliminar de la radiación solar del sitio: Proyecto Restitución».

El Tiempo. 2022. «Estas son las reglas para la exportación de cannabis medicinal - Sectores - Economía - ELTIEMPO.COM». Recuperado 12 de octubre de 2022 (<https://www.eltiempo.com/economia/sectores/estas-son-las-reglas-para-la-exportacion-de-cannabis-medicinal-662905>).

Turismo, Colombia. 2020. «CUNDINAMARCA-ALBÁN». Recuperado 5 de octubre de 2022 (<http://www.colombiaturismoweb.com/DEPARTAMENTOS/CUNDINAMARCA/MUNICIPIOS/ALBAN/ALBAN.htm>).

UNAL, Facultad de Ciencias Agrarias. 2019. «Bioprospección de Cannabis: Avances y retos desde la Academia». *Red de Investigadores de cannabis de la UNAL Colombia*.

Urbana, Dirección de Asuntos Ambientales Sectorial y, y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. 2020. «Listado De Impactos Ambientales Específicos En El Marco Del Licenciamiento Ambiental». *Gastronomía ecuatoriana y turismo local*. 1(69):5-24.

Wilson, Houston, Hekia Bodwitch, Jennifer Carah, Kent Daane, Christy Getz, Theodore E. Grantham, y Van Butsic. 2019. «First known survey of cannabis production practices in California». *California Agriculture* 73(3):119-27.

Zheng, Zhonghua, Kelsey Fiddes, y Liangcheng Yang. 2021. «A narrative review on environmental impacts of cannabis cultivation». *Journal of Cannabis Research* 3(1).

Zuleta, Pablo, Tatiana Martínez, David Restrepo, y Beatriz Ramos. 2021. «Serie Cannabis Legal Evolución de la normativa mundial Área del CESED: Consumo de Drogas, Salud Pública y Educación».