

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**DESARROLLO Y RENDIMIENTO DE CANNABIS MEDICINAL CW2a EN
SIEMBRAS TARDÍAS DE DÍA CORTO**

por

**Sebastián BARLOCCO AMORIN
Julieta LUST ÁLVAREZ
Mateo URIOSTE PANISSA**

**TESIS presentada como uno
de los requisitos para obtener
el título de Ingeniero Agrónomo**

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2021**

Tesis aprobada por:

Director:

Ing. Agr. Mercedes Arias

Ing. Agr. Adriana Zumarán

Ing. Agr. Guillermo Siri-Prieto

Fecha: 5 de octubre de 2021

Autores:

Sebastián Barlocco Amorin

Julieta Lust Álvarez

Mateo Urioste Panissa

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestros agradecimientos a las empresas Cannabis Uruguay Ltda. y Aguas Uruguay Ltda. por su colaboración en la realización de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.1.1. <u>Objetivo general</u>	2
1.1.2. <u>Objetivos específicos</u>	2
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. PRODUCCIÓN MUNDIAL: TECNOLOGÍAS Y PRODUCTIVIDAD.....	3
2.2. PRODUCCIÓN NACIONAL.....	4
2.2.1. <u>Surgimiento y estado actual</u>	4
2.2.2. <u>Características productivas</u>	5
2.3. DESCRIPCIÓN DE LA ESPECIE.....	6
2.3.1. <u>Origen</u>	6
2.3.2. <u>Domesticación</u>	7
2.3.3. <u>Taxonomía</u>	8
2.3.4. <u>Botánica</u>	10
2.3.5. <u>Cannabinoides</u>	13
2.4. CICLO ANUAL.....	14
2.4.1. <u>Ciclo fenológico</u>	14
2.4.2. <u>Germinación y desarrollo vegetativo</u>	16
2.4.3. <u>Desarrollo reproductivo</u>	17
2.5. SISTEMAS DE PRODUCCIÓN.....	18
2.6. RENDIMIENTO: FACTORES Y COMPONENTES.....	19
2.6.1. <u>Factores ambientales determinantes</u>	19
2.6.2. <u>Medidas de manejo determinantes</u>	23
2.6.3. <u>Componentes del rendimiento</u>	25
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
3.1. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN GENERAL.....	29
3.1.1. <u>Localización</u>	29
3.1.2. <u>Descripción del cultivo</u>	29
3.1.3. <u>Descripción del cultivar CW2a</u>	29
3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS.....	30
3.3. VARIABLES ANALIZADAS Y METODOLOGÍA.....	32
3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	33

4. <u>RESULTADOS</u>	35
4.1. MEDICIONES FENOLOGICAS DEL CICLO DEL CULTIVO.....	35
4.2. PLANTAS SIN PODAR.....	36
4.2.1. <u>Medidas de resumen</u>	36
4.2.2. <u>Boxplot</u>	37
4.2.3. <u>Intervalos de confianza</u>	39
4.2.4. <u>Correlaciones</u>	40
4.2.5. <u>Regresiones</u>	43
4.2.6. <u>Componentes principales</u>	46
4.3. TOTAL DE PLANTAS.....	48
4.3.1. <u>Intervalos de confianza</u>	48
4.3.2. <u>Correlaciones</u>	49
5. <u>DISCUSIÓN</u>	50
5.1. PLANTAS SIN PODAR.....	50
5.1.1. <u>Interrupción nocturna y duración de los ciclos</u>	51
5.1.2. <u>Variables analizadas</u>	53
5.1.3. <u>Variables integradas</u>	54
5.1.4. <u>Densidad y fecha de siembra</u>	54
5.2. TOTAL DE PLANTAS.....	54
6. <u>CONCLUSIONES</u>	56
6.1. DE LOS RESULTADOS.....	56
6.2. OBSERVACIONES AGRONÓMICAS A EVALUAR EN FUTUROS ENSAYOS.....	56
7. <u>RESUMEN</u>	57
8. <u>SUMMARY</u>	58
9. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	59
10. <u>ANEXOS</u>	68

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Escala BBCH fenológica del cannabis.....	15
2. Densidad de siembra de acuerdo al objetivo productivo y el sistema de producción.....	24
3. Variables del rendimiento en función de la densidad de siembra y el sistema de producción.....	28
4. Características del espectro lumínico para los 3 tratamientos bajo luz.	31
5. Código de la escala BBCH en las fechas de mayor relevancia.....	35
6. Medidas de resumen de la población general para las distintas variables.....	36
7. Medidas de resumen por tratamiento para las distintas variables.....	36
8. Intervalos de confianza para las principales variables.....	39
9. Correlaciones de todas las variables considerando todos los tratamientos de las plantas sin podar.....	40
10. Correlaciones entre variables para el tratamiento campo 1.....	41
11. Correlaciones entre variables para el tratamiento campo 3.....	41
12. Correlaciones entre variables para el tratamiento macro 1.....	42
13. Correlaciones entre variables para el tratamiento macro 2.....	42
14. Intervalos de confianza y estimador de las regresiones.....	43
15. Auto valores de componentes principales.....	47
16. Auto vectores de componentes principales.....	47
17. Intervalos de confianza de las principales variables para el total de plantas.....	48

18. Correlaciones entre variables para el total de plantas.....	49
19. Contenido de CBD y THC de las plantas cosechadas en las distintas condiciones.....	53
Figura No.	
1. Croquis representativo de la disposición de los tratamientos.....	34
2. Diagrama de la duración y composición de los ciclos en ambas condiciones de desarrollo.....	35
3. Boxplot de índice de cosecha.....	37
4. Boxplot de altura.....	38
5. Boxplot de peso neto flor seca.....	38
6. Boxplot de biomasa vegetativa.....	39
7. Regresión de la variable número de nudos en los brotes y las fechas de medición.....	44
8. Regresión entre la variable altura y las fechas de medición.....	44
9. Regresión entre la variable número de nudos en el tallo principal y las fechas de medición.....	45
10. Regresión entre la variable número de nudos en los brotes laterales y los grados días.....	45
11. Regresión entre la variable número de nudos del tallo principal y los grados días.....	46
12. Biplot de componentes principales.....	47

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se realiza en el marco de la Ley de regulación y control de cannabis (2013) de cual exime de prohibición “*La plantación, el cultivo, la cosecha, el acopio para fines de investigación así como la industrialización para uso farmacéutico, siempre que se realice en el marco de la legislación vigente...*”. Como consecuencia de esta legalización, la cual convirtió a Uruguay en el primer país del mundo en legalizar el cannabis recreativo y sus derivados, comenzó a desarrollarse la producción e industrialización tanto recreativo como para fines farmacéuticos, cosméticos, e industriales. Sin embargo, dado el carácter ilegal que caracterizó a este cultivo por décadas, lo cual condicionó la investigación y desarrollo del mismo, este sector se enfrenta a una situación de falta de información y conocimiento científico confiable para llevar adelante las diferentes etapas y variantes del proceso productivo.

Por tanto, a raíz de esta situación y como respuesta a la demanda de información por parte del sector productivo surge la iniciativa e interés por llevar a cabo este trabajo el cual aspira a generar conocimiento agronómico relevante para la producción de cannabis medicinal. El cultivo para la producción de flor con fines no recreativos se ha realizado en Uruguay en los últimos 5 años a campo y en sistemas protegidos siendo muy poca la experiencia como para identificar las potencialidades de cada sistema en las condiciones edafoclimáticas del país. Los sistemas protegidos en principio permitirían ampliar el periodo de producción con la posibilidad de realizar dos ciclos de cultivo por estación de crecimiento. El primero llevado a cabo desde agosto a diciembre y el segundo de enero a mayo aproximadamente. Sin embargo, no se dispone de información sistemática en las condiciones del Uruguay sobre como los rendimientos y los componentes del mismo son afectados por los diferentes sistemas de producción, las fechas de siembra y los materiales genéticos disponibles en el país.

Mediante un estudio exploratorio en condiciones comerciales, el presente trabajo pretende describir el comportamiento del cultivo (variedad CW 2a) en condiciones de siembra tardía, correspondiente al segundo ciclo del doble cultivo. El mismo se llevó a cabo en condiciones de cultivo a campo y bajo macro túnel y se evaluó la estrategia de interrupción de la noche con luz artificial como control de la floración.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo general

Describir la evolución del desarrollo y el rendimiento de plantas del cultivar CW 2a en siembras tardías con diferentes condiciones de luz nocturna.

1.1.2. Objetivos específicos

- Describir la evolución de variables fisiológicas durante el ciclo completo del cultivo.
- Identificar correlaciones entre variables fisiológicas del desarrollo y componentes del rendimiento.
- Describir componentes de rendimiento en las diferentes condiciones de producción.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. PRODUCCIÓN MUNDIAL: TECNOLOGÍAS Y PRODUCTIVIDAD

La producción de cannabis ha aumentado considerablemente desde el año 2000, gracias a la legalización del uso de cannabis (JIFE, citado por Ramírez, 2019). Sin embargo, aún el mercado de cannabis está limitado por el estatus legal en los distintos países. El cual se estima que de aquí a 10 años se flexibilice y aumente su potencial demanda a nivel mundial, donde el producto de mayor relevancia será el del cannabis medicinal (Uruguay XXI, 2020).

Los principales productores de cannabis para el año 2017 fueron Reino Unido y Canadá superando el 90% de la producción mundial. A su vez el Reino Unido fue el principal exportador de cannabis para el 2017, mientras que EEUU fue el principal importador de cannabis para el año 2016 (JIFE, citado por Ramírez, 2019). Es sustancial mencionar que en el año 2018 se aprobó la Farm Bill en EEUU, esto provocó que queden aprobados todos los productos con menos de 0.3% de THC, es decir, una gran cantidad de alimentos y suplementos. Este acontecimiento es muy importante para el desarrollo mundial del sector (Uruguay XXI, 2020).

Según diversos autores (Euromonitor international, citado por Ramirez 2019, Banco de Toronto, citado por Uruguay XXI 2020), el mercado global de cannabis aumentará en los próximos años, ubicándose en un rango entre 194 y 214 mil millones para el año 2025.

El sector productivo de cannabis medicinal es el que tiene mayores certezas en aumentar las habilitaciones para su producción, es decir, aquellos materiales que tengan menos del 1% de THC. Esto no quiere decir que aquellas producciones que tengan mayores valores no tengan futuro en el mercado mundial, sino que su habilitación se estima será más lenta. Es imperativo aclarar que mayores valores de THC no quiere decir solamente uso recreacional, también son utilizados como insumos medicinales (Uruguay XXI, 2020).

Hoy el mercado de THC medicinal es pequeño dado que pocos son los países que consumen de manera legal THC con propósito medicinal. Esta situación no solo se da por el rechazo social que tiene dicha sustancia por ser psicoactiva sino que también por las altas exigencias en las certificaciones de buenas prácticas agrícolas y de recolección (Ramírez, 2019).

Si bien el mercado se está abriendo y hay buenos pronósticos para este material, aún hay incertidumbre sobre las posturas de grandes potencias que podrían catapultar la producción del cannabis. Se hace referencia a países

como China, India y Rusia. En China ya está habilitada la producción y el comercio como insumos para el uso textil y alimenticio, pero no hay una postura concreta sobre el uso medicinal (Uruguay XXI, 2020).

Ahondando sobre las exportaciones e importaciones, con respecto a las primeras, las fibras es el material con más peso en el caso. La pulpa para la composición de papeles y otros abarca el 70-80% del mercado, siendo Francia el principal consumidor de la misma. Otro sector que está pisando fuerte es el automovilístico, ocupando un 15% del mercado, unas 25.000 toneladas de fibras naturales se usaron en el 2002 para este sector. La construcción no se queda atrás cuando de innovación se trata, por eso para materiales aislantes consume un 5% de la producción de las fibras de cáñamo (Ceretta et al., 2013).

Continuando con las exportaciones, las semillas para consumo de animales ocupa el 95%, el sector de cosmética el restante 5%: los principales exportadores de semillas son los Países Bajos, Francia, España, Italia, Bélgica y Alemania. Sobre las importaciones, Europa del Este importa materia prima que se procesa en Europa Occidental. En cuanto a las semillas, los principales importadores son los Países Bajos (Ceretta et al., 2013).

Con el importante incremento de la producción de cannabis en el mundo se espera que haya una reducción importante en los precios internacionales de los productos derivados de la industrialización del cannabis y en los precios de la flor seca.

2.2. PRODUCCIÓN NACIONAL

2.2.1. Surgimiento y estado actual

La producción y uso de la planta de cannabis y sus derivados surge en el país a partir de la Ley 19.172 aprobada en el año 2013, en la cual se crea el IRCCA (Instituto de Regulación y Control del Cannabis) y se desarrolla el marco legal necesario para el uso del cultivo para fines recreativos, productivos y de investigación. De esta manera, Uruguay se convirtió en el primer país del mundo en legalizar los distintos usos de la planta de cannabis (medicinal y recreativo) y en regular la producción y distribución de la misma. La legalización define los distintos usos de la planta de cannabis en función de su contenido de THC, molécula encargada de producir el efecto psicoactivo. Plantas con un contenido mayor al 1% se consideran para el uso recreativo de la planta mientras que aquellas con un contenido menor al 1% se permiten para fines productivos como la producción de aceites medicinales, cáñamo industrial, entre otros. El MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca) y el IRCCA, son las instituciones que otorgan las licencias según los diferentes fines productivos.

Dentro de los objetos de la ley se encuentra el de proteger a los habitantes de los riesgos que existe en el comercio ilegal y el narcotráfico de dicho material y reducir la incidencia de este último. Para ello proporciona medidas de control y regulación del cannabis psicoactivo y sus derivados, propagar educación y concientizar a la sociedad sobre los riesgos para la salud por el uso del mismo. Esta ley tiene algunas excepciones dentro de las cuales están la plantación con fines de investigación o para elaborar productos medicinales, plantación e industrialización de cannabis no psicoactivo (cáñamo), este deberá ser autorizado por el MGAP, entre otros (Ley No. 19.172).

A partir de este hecho, surgió un interés generalizado por rubro y se genera una cadena agroindustrial conformada por distintos servicios asociados al rubro (mano de obra, técnicos, laboratorios, transporte, etc.) que representa una gran oportunidad para el país (Uruguay XXI, 2020). Actualmente hay registrados 86 cultivares en el registro nacional de cultivares (RNC, INASE, 2021).

2.2.2. Características productivas

De acuerdo a Ceretta et al. (2013) las condiciones agroclimáticas del país son adecuadas para el cultivo de cáñamo teniendo en cuenta factores como temperatura, fotoperiodo, radiación incidente y precipitaciones.

La industria del cáñamo en Uruguay está recién comenzando y por ello aún no hay registros de producción nacional de semillas de dicho material en el país, por lo general son importadas de la Unión Europea, Canadá, Australia y China. En cuanto a los rendimientos, se registran hasta $2259 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de grano y $15.5 \text{ Mg MS}\cdot\text{ha}^{-1}$ de planta entera (biomasa) en condiciones experimentales, pero a nivel comercial los rendimientos van hasta $1100 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Esto sugiere que hay grandes diferencias en los rendimientos según el cultivar y los distintos factores que influyen (MGAP, 2018).

La principal producción de cannabis que se genera en el país es en mayor medida la de cannabis con menos del 1% de THC, lo que se considera no psicoactivo y alto CBD. El principal destino es el de la exportación a Suiza exactamente. Este mercado se autorizó en el 2018 hasta el 2020. Una de las formas de exportación más redituables es bajo la forma de flores secas, pudiendo obtener hasta $400 \text{ US}\$. \text{kg}^{-1}$, siendo la media $200 \text{ US}\$. \text{kg}^{-1}$. Si bien estos números son altos, también es alto el costo de producción en Uruguay, dado que se necesita mucha mano de obra y los costos energéticos son elevados (Rodríguez, 2021).

2.3. DESCRIPCIÓN DE LA ESPECIE

2.3.1. Origen

La planta de *Cannabis sativa* L. es originaria de zonas templadas de Asia (Bazzaz et al., 1975) y su vínculo con el hombre, como fuente de fibra, alimento y resinas medicinales, data de miles de años hacia el pasado siendo una de las especies cultivadas más antiguas (Schultes, citado por Bazzaz et al., 1975). De acuerdo a Kung, Chang, citados por Small (2016a) hay evidencia arqueológica del uso del cannabis que data de hace 10.000 años. A su vez, se cree que los chinos cosechaban cannabis, aunque sea de especies salvajes, hace 8500 años (Schultes y Hofmann, citados por Small, 2016a). Sin embargo, de acuerdo a Flemming y Clarke (1998), la domesticación de la planta por los humanos y el uso deliberado de la misma se lleva a cabo desde hace por lo menos 6000 años. Desde entonces, fue utilizada como materia prima para la producción de papel, como alimento a través del grano y su fibra utilizada en la manufactura de cuerdas y redes de pesca (Roulac, citado por Ceretta et al., 2013).

El centro de origen del género Cannabis no ha sido establecido con exactitud debido a la expansión territorial que ha tenido la planta desde hace siglos causado por la domesticación del hombre. Sin embargo, según Li (1974) el origen corresponde a zonas templadas del centro y Oeste de Asia. Otros autores, como Sharma, citado por Chandra et al. (2017), afirman que la planta puede ser nativa de Siberia, China o el Himalaya. Lo que es claro es que debido a la vasta presencia de ejemplares salvajes presentes a lo largo de Asia, la planta tuvo una amplia extensión en dicha región en tiempos pre-históricos (Small, 2016a).

En base a las condiciones climáticas en las que se encuentran actualmente especies silvestres de cannabis, a datos obtenidos de registros fósiles de polen y a estudios sobre la evolución y cambios del clima desde hace cientos de miles de años, Clarke y Merlin (2013) afirman que la especie evolucionó bajo la influencia de períodos de avance y retroceso de los glaciares entre otros factores climáticos, en regiones templadas del interior del continente asiático en donde la primavera y el verano presentan precipitaciones y temperaturas cálidas. Estos autores consideran que la especie evolucionó en nichos donde pudo sobrevivir a estos periodos glaciares y expandiéndose en períodos climáticamente favorables hasta evolucionar a los ejemplares previo a la domesticación por el hombre. Estos nichos, ubicados en puntos distantes del continente asiático y aislados entre sí dieron origen a distintos pools genéticos que, en combinación con la posterior manipulación e influencia de las distintas culturas posteriormente desarrolladas, tuvieron un gran impacto en la

variabilidad que el género cannabis presenta en la actualidad. A su vez, en estas latitudes se desarrolló la respuesta al acortamiento de los días que presenta la especie para pasar a estadios reproductivos. Esta teoría justifica también la poca tolerancia del cannabis a condiciones extremas como exceso de calor, sequías, heladas y extrema humedad, más habituales de zonas tropicales y subtropicales.

2.3.2. Domesticación

Con el origen de la agricultura y el establecimiento de las civilizaciones se empezaron a cultivar y seleccionar plantas para distintos fines como alimentación y manufactura. En sus inicios el cannabis fue mayormente fuente de fibra para la elaboración de redes, cuerdas entre otros productos manufacturados y que posteriormente fue extendiéndose el uso de la semilla como alimento y de las flores por su poder intoxicante para fines medicinales y espirituales (Clarke y Merlin 2013, Small 2016a).

En el correr de los siglos posteriores a la “revolución agrícola”, y con el establecimiento de las civilizaciones, la planta de cannabis acompañó a distintos grupos humanos distribuidos a lo largo y ancho del continente asiático en primer lugar, y prontamente introduciéndose a Europa y África, generando una amplia expansión geográfica de la especie. Esta expansión, que expuso a la planta a diferentes condiciones climáticas, de latitud, tipo de suelo, en conjunto con la gran influencia de la selección disruptiva del hombre impulsada por las distintas culturas, provocó una gran diversidad de biotipos característicos de cada región (Clarke y Merlin, 2013). A continuación se presenta una forma de clasificar estos biotipos diferenciados principalmente por el uso final de la planta de acuerdo a Hillig (2005), Small (2016a).

- 1) Cannabis utilizado para fibra y semilla en Europa y Asia Occidental. Alto en CBD y con contenido despreciable de THC.
- 2) Cannabis utilizado para fibra y semilla en Asia del Este. Contenido moderado a bajo de THC y despreciable en CBD.
- 3) Cannabis utilizado para fines recreativos y espirituales en India y Nepal. Alto contenido de THC y despreciable de CBD.
- 4) Cannabis utilizado para fines recreativos y espirituales en Afganistán y países vecinos. Considerable y balanceado contenido entre CBD y THC.

La conformación de estos grupos pone en evidencia la influencia cultural para definir las características de una planta, a través de la selección

disruptiva. A su vez, se observa la versatilidad del cannabis tanto para adaptarse a condiciones climáticas y de crecimiento muy distintas, como para ofrecer distintos productos valiosos para cada cultura o región. Por ejemplo, civilizaciones establecidas en latitudes más hacia el Norte cultivaron y ejercieron la selección hacia la producción de fibra debido a la limitada oferta de especies capaces de proporcionar esta materia prima, en comparación con las regiones más subtropicales o tropicales con mayores fuentes nativas de la misma (Clarke y Merlin, 2013).

2.3.3. Taxonomía

La clasificación taxonómica oficial hoy en día es *Cannabis sativa* L. y se reconocen 4 subespecies (*sativa*, *indica*, *rudularis*, *afghanica*). La especie pertenece al género *cannabis*, uno de los 10 que componen la cosmopolita familia de las *cannabaceae*. La misma cuenta con un total de 120 especies y tiene su origen hace 70 a 90 millones de años (Yang et al. 2013, Jin et al. 2020).

La sistemática del cannabis es una de las más controversiales y ha sido objeto de debate entre los botánicos desde hace siglos (Hillig 2005, Small 2016a). Precisamente desde que el naturalista Jean-Baptiste Lamarck identificara en 1785 a *Cannabis indica*, abundante en India y regiones cercanas, como una especie diferente de la previamente establecida por Linneo en 1753, *Cannabis sativa* (Linnaeus 1753, de Lamarck 1783). Esta última, de amplia distribución en el continente europeo por sus aptitudes para la producción de fibra (Hillig 2005, Clarke y Merlin 2013). Desde entonces, numerosos estudios arqueológicos, análisis de fósiles de polen y trabajos de botánicos de campo entre otros se han llevado a cabo para definir si se trata de un género poliespecífico o uno monoespecífico con distintas subespecies o biotipos (Li 1974, Small y Cronquist 1976, Clarke y Merlin 2013, Lynch et al. 2016, Chandra et al. 2017).

A la gran variabilidad fenotípica del género, expresada en características como altura, cantidad de ramificaciones, y sobre todo el perfil de cannabinoides se le agrega la denominación no científica de “*sativa*” e “*indica*” por consumidores de cannabis para fines recreativos o espirituales. Esta diferencia en la terminología complejiza aún más la tarea de los taxonomistas a la hora de aislar y clasificar la diversidad morfológica, botánica y genética que presenta el cannabis debido a los diferentes significados que se le da a “*sativa*” o “*indica*” (Chandra et al. 2017, McPartland y Guy 2017).

Por otra parte, la hibridación intraespecífica y la introgresión entre distintos biotipos/poblaciones dificulta más poder separarlos correctamente,

determinar su filogenética y clasificarlos ya que reduce la variabilidad genética y fenotípica (McPartland y Guy, 2017). Sobre este punto, Clarke y Merlin (2013), Small (2016a), McPartland (2018), informan sobre la capacidad de plantas domesticadas de escapar y reproducirse con especímenes salvajes dando lugar a híbridos con características intermedias entre ambas poblaciones y por lo tanto, de difícil identificación. A su vez, desde el punto de vista de la mejora genética, lo mencionado anteriormente perjudica la conservación *in situ* del germoplasma de poblaciones nativas debido a la pérdida de genes en el proceso de cruzamiento con poblaciones domesticadas y a una tendencia hacia la homogeneización genética (Small, 2016a).

Actualmente, si bien aún es un tema de debate, y más allá de distintos argumentos a favor y en contra del polimorfismo del cannabis, es utilizada una clasificación en función del perfil de cannabinoides del material vegetal denominado “quimiotipo” (Dei Cas et al., 2020). Small y Cronquist, citados por McPartland y Guy (2017), utilizaron por primera vez este criterio para clasificar material genético proveniente de distintas regiones del mundo. Primero cuantitativamente, según el porcentaje de THC de la inflorescencia femenina seca (% mayor o menor que 0.3). Y luego usando un criterio cualitativo, la relación THC/CBD y agrupando las plantas en tres quimiotipos.

Quimiotipo 1: THC >0.3%, CBD <0.5%. Cannabis psicoactivo

Quimiotipo 2: THC >0.3%, CBD >0.5%; Intermedio

Quimiotipo 3: THC <0.3%, CBD >0.5%. Cannabis para fibra/grano

Posteriormente se agregan los quimiotipos 4 y 5 a esta clasificación que corresponden a plantas con un perfil de cannabinoides donde predomina el CBG y plantas sin producción de cannabinoides, respectivamente (de Meijer y Hammond 2005, de Meijer et al. 2009).

Esta clasificación no es adecuada como criterio taxonómico al estar regulado genéticamente por mecanismos simples lo que conlleva, en poblaciones segregantes, a quimiotipos contrastantes en plantas muy emparentadas. A su vez, Small y Beckstead, de Meijer et al., citados por Schilling et al. (2020) consideran que los quimiotipos no son un criterio válido para la clasificación filogenética al no estar basado en relaciones evolutivas. Sin embargo, estos autores lo consideran un criterio útil y coherente, en conjunto con otras características agronómicas y botánicas, a la hora de clasificar distintas variedades.

2.3.4. Botánica

Cannabis sativa es una especie herbácea anual, de porte erecto y altura mediana a alta, dicotiledónea. La arquitectura de la planta es monopodial con un tallo principal y un importante número de ramificaciones laterales (Spitzer-Rimon et al., 2019). Sin embargo, la misma varía enormemente entre plantas de distintas variedades y sobre todo de acuerdo al interés productivo que llevó a seleccionar determinadas plantas, desde la domesticación. Por ejemplo, variedades destinadas a la producción de fibra presentan una ramificación mucho menor que las utilizadas para obtener cannabinoides ya que, en estas últimas, más ramas permiten mayor cantidad de inflorescencias. Asimismo, son de una considerable mayor altura, importante para cosechar fibra de calidad (Small, 2016a). En este sentido, factores de manejo como la densidad de plantas inciden en el crecimiento lateral y en altura (Tang, 2018).

Las hojas de cannabis son pinnadas compuestas con entre 1-3 folíolos en los primeros estadios de desarrollo aumentando a medida que avanza el desarrollo hasta alcanzar, en la zona basal, de 10-13 folíolos. Las más cercanas al ápice son de un tamaño menor. Cuentan con un pecíolo cilíndrico de hasta 7 cm de largo. Los folíolos son generalmente lanceolados aunque a veces pueden ser oblanceolados, y presentan un borde aserrado. Miden entre 3-20 cm de largo y alcanzan hasta 1,8 cm de ancho. Presentan un color verde oscuro en la zona adaxial y más pálido en la abaxial (Chandra et al., 2017). Algunos tipos de cannabis presentan antocianinas en hojas y tallos, las cuales pueden generar una coloración púrpura en caso de heladas o temperaturas bajas (Small, 2016a). La filotaxia de la planta (ubicación de las hojas en el tallo principal) es opuesta hasta que ocurre la inducción reproductiva, cuando pasa a ser alterna hasta final de ciclo. Esto ocurre en ambos sexos (Clarke y Merlin, 2013). A su vez, cuando esto ocurre el número de folíolos por hoja comienza a disminuir (Tang, 2018).

El sistema radicular del cannabis es extenso y puede alcanzar hasta 2 metros de profundidad en suelos de texturas gruesas. Se conforma por una raíz principal y varias raíces secundarias delgadas. Esto le permite explorar el suelo y alcanzar agua almacenada a profundidad. En suelos de texturas más finas, la profundidad puede alcanzar el metro y las raíces secundarias se extienden lateralmente sobre la superficie, y sobre la zona más profunda de la raíz. Si un suelo presenta una napa de agua superficial, el sistema radicular se desarrolla lateralmente y sobre la superficie ya que no tolera el anegamiento (Small, 2016a). Se trata de una especie naturalmente dioica, es decir, que las flores masculinas o femeninas (incompletas) se encuentran en plantas distintas, y anemófila (utiliza el viento para dispersar el polen). Sin embargo, es posible

encontrar plantas con ambas flores masculina y femenina, lo que se denomina hermafrodita o monoica (Clarke y Merlin, 2013).

En la fase vegetativa las plantas hembra y macho se diferencian solamente por el hábito de crecimiento siendo las hembras más bajas y ramificadas que plantas macho (Clarke y Merlin, 2013) y por la mayor densidad de estomas y de tricomas en plantas femeninas (Truță et al., citados por Small, 2016a). Las flores masculinas son pequeñas y están agrupadas generalmente en racimos sueltos. Las inflorescencias se encuentran muy ramificadas y dispersas, a modo de exponer los estambres al viento (Small, 2016a). Cuentan con muy pocas hojas dispersas, a lo largo del brote (Tang, 2018). Las flores miden aproximadamente 5 mm y pueden estar solitarias, agrupadas de a 3, o en racimos. Las mismas son pediceladas y están conformadas por 5 tépalos verdosos o blanquecinos y 5 estambres verdosos, opuestos a los tépalos, que liberan el polen por los poros terminales en las anteras. No se distinguen sépalos ni pétalos. Una vez ocurrida la polinización, la planta macho finaliza su ciclo y muere (Chandra et al., 2017).

Por otra parte, las plantas hembras presentan sus inflorescencias más congestionadas y ubicadas en las axilas de los brotes, sobre todo en las superiores. La presencia de hojas rodeando la inflorescencia es notoriamente más abundante que en el caso de las plantas masculinas. A diferencia de las masculinas, las flores femeninas son sésiles y no se distinguen sépalos o pétalos (Small, 2016a). Cada flor consiste de un ovario unilocular, un estigma corto y por dos estilos largos y delgados, de color blanco o amarillento. En la base de la flor, se encuentra rodeando el ovario un perianto membranoso y una bráctea perigoneal. Esta última cubierta por cientos de “pelos” denominados tricomas glandulares, donde se concentra la resina compuesta por cannabinoides (Clarke y Merlin 2013, Chandra et al. 2017). En el caso de que ocurra la polinización, se desarrolla el fruto de tipo aquenio.

Los tricomas se encuentran prácticamente en todos los órganos aéreos del cannabis. Son las estructuras encargadas de la producción y almacenamiento de los cannabinoides. Se concentran mayormente en la bráctea que rodea al ovario en la flor femenina y en las hojas cercanas a la misma (Chandra et al., 2017). Sin embargo, según Leme et al. (2020) las flores masculinas también presentan tricomas aunque a una menor densidad y producción de cannabinoides.

De acuerdo a Clarke (1981), la resina liberada por los tricomas cumple la función de proteger los órganos reproductivos de la excesiva transpiración, evitando la desecación de los tejidos, y de repeler patógenos o artrópodos herbívoros. La especie presenta diferentes tipos de tricomas. En primer lugar,

los tricomas no glandulares, son unicelulares y se concentran más hacia el ápice de la hoja. Existen dos tipos de estos tricomas: los tricomas cistolíticos y los tricomas simples. La función de ambos es ejercer de defensa mecánica contra los herbívoros y disminuir la palatabilidad. Los primeros se ubican mayormente en la zona adaxial de la hoja mientras que los otros se ubican en ambos lados de la hoja pero mayormente en zona abaxial (Small 2016a, Chandra et al. 2017). Por otra parte, los tricomas glandulares son los principales productores de la resina donde se concentran los cannabinoides y otros compuestos. Se concentran mayormente en la bráctea perigoneal y en las hojas jóvenes pero también en otras partes reproductivas como sépalos o anteras. De esto se deduce que la función de la resina es proteger a los tejidos jóvenes o sensibles (Small, 2016a). A continuación se detallan los tres tipos de tricomas glandulares.

Capitado con tallo: están conformados por una cabeza globular de entre 50 – 70 μm de diámetro conectada a un tallo de 100-200 μm de largo. El largo del tallo es muy variable, llegando a ser tan corto asemejándose a un tricoma sésil (Chandra et al., 2017). La cabeza en variedades de alta producción de THC puede tener un diámetro de incluso 119 μm . Es en la cabeza, donde se concentra el mayor contenido de cannabinoides (Small y Naraine, 2016b). Precisamente en una cavidad no-celular superior a un conjunto de células secretoras especializadas con forma de disco. Ambos componentes de la cabeza están rodeados por una capa de cutícula que mantiene la resina producida por las células encapsulada (Small, 2016a). Son el tipo de tricoma de mayor abundancia en la inflorescencia femenina y particularmente en la bráctea (Kim y Mahlberg 1991, Livingston et al. 2020).

Capitado sésil: son los más frecuentes en las primeras etapas de formación de la bráctea perigoneal. Se encuentran mayormente en la superficie abaxial de hojas, pecíolos y tallos jóvenes (Chandra et al., 2017). Son comparativamente menores en tamaño que los tricomas con tallo, pero los componentes de la cabeza son los mismos (Small, 2016a). Esta última tiene un diámetro de 30-50 μm (Hammond y Mahlberg, 1973). A pesar de denominarse y parecer sésiles, cuentan con un tallo conformado por unas pocas células (Dayanandan y Kaufman, 1976).

Bulboso: son el tipo más pequeño de tricoma glandular. Su tamaño es posiblemente debido a que no lograron desarrollarse como tricomas capitados. La cabeza es muy pequeña por lo que la producción de cannabinoides es considerablemente menor que los tricomas anteriormente descritos (Small 2016a, Livingston et al. 2020). Su tamaño varía entre 10–20 μm de diámetro y 15–30 μm de altura (Hammond y Mahlberg 1973, Dayanandan y Kaufman 1976).

De acuerdo a Livingston et al. (2020), el perfil de cannabinoides producidos por ambos tipos de grandes tricomas glandulares es el mismo. Sin embargo, no ocurre esto en el perfil de terpenos (otros compuestos químicos de interés). Los tricomas capitados con tallo realizan un mayor aporte al total de cannabinoides producido (Turner et al. 1978, Livingston et al. 2020). Esto se debe posiblemente al número de células secretoras presentes en la cabeza, Livingston et al. (2020) constataron que los tricomas con tallo cuentan con entre 12 y 16 células mientras que los tricomas sésiles están conformados exactamente por 8 células. Esta diferencia significativa se constató para tricomas presentes tanto en las brácteas como en hojas. A su vez, estos autores afirman que los tricomas sésiles presentes en las brácteas son un estado de desarrollo inferior a los capitados con tallo. Es decir, los tricomas sésiles se convierten en capitados con tallo de acuerdo avanza el estado de madurez del tejido floral. No obstante, esto no se comprobó para los tricomas sésiles presentes en tejidos vegetativos, en donde estos se mantienen de tal forma.

2.3.5. Cannabinoides

Los fitocannabinoides son el principal producto obtenido a partir del cannabis convirtiéndola, desde hace milenios, en una planta de singular interés. Esto se debe a que son estas moléculas las responsables tanto del efecto psicoactivo como del valor medicinal de la planta. Se denomina fitocannabinoides para diferenciarlos de aquellos cannabinoides de origen no vegetal (Schilling et al., 2020). Si bien *Cannabis sativa* es la especie principal en cuanto al número y cantidad de cannabinoides producidos, se ha registrado presencia de cannabinoides en otras especies vegetales (Lynch et al. 2016, Small 2016a). Estos compuestos químicos del tipo terpenofenolico corresponden al metabolismo secundario de la planta, es decir, no están involucrados directamente en el crecimiento, desarrollo o reproducción del organismo. Su biosíntesis está localizada mayormente en los tricomas glandulares de la inflorescencia femenina (Potter 2014, Livingston et al. 2020). Según si cuentan con un grupo carboxilo o no se los denomina ácidos cannabinolicos o cannabinoides neutrales, respectivamente. En la planta se sintetizan y acumulan de esta última forma. El proceso de descarboxilación ocurre durante el almacenamiento del extracto vegetal o en presencia de calor (de Meijer et al. 2003, Aizpurua-Olaizola et al. 2016, Chandra et al. 2017).

De acuerdo a Pertwee (2014), se tiene conocimiento de más de 100 cannabinoides clasificados en 11 grupos químicos. Todos estos compuestos son muy similares y se desarrollan a partir de los mismos precursores. Del total de cannabinoides, hay 3 que son de mayor relevancia debido a sus aplicaciones médicas y por lo tanto, el interés productivo y comercial del

cannabis se centra en ellos. A su vez, son los producidos en mayor cantidad por la planta. Estos son el tetrahidrocannabinol (THC), cannabidiol (CBD) y cannabigerol (CBG, Schilling et al., 2020). Sin embargo, con diferencia los dos primeros son más importantes y por lo tanto han sido objeto de innumerables estudios científicos (Toth et al., 2020). El THC es el principal componente psicoactivo del cannabis y el responsable de que la misma haya sido ilegal en gran parte del último siglo. Sin embargo, se ha constatado propiedades medicinales de esta molécula debido a que interacciona con dos receptores presentes en el cerebro que conforman el sistema endocannabinoide, CB1 y CB2 (Lynch et al. 2016, Chandra et al. 2017). El CBD por su parte, no presenta efecto psicoactivo y tiene conocidas propiedades medicinales (Eichhorn Bilodeau et al. 2019, Toth et al. 2020).

De acuerdo a de Meijer et al. (2003), el contenido total de cannabinoides está regulado por muchos genes y es influenciado fuertemente por las características del ambiente. De esta manera, las plantas de cannabis pueden tener cantidades muy variables de cannabinoides, desde nada en absoluto a contenidos muy considerables, incluso mayores al 20% (Schilling et al., 2020).

2.4. CICLO ANUAL

2.4.1. Ciclo fenológico

El cannabis es una planta anual que completa su ciclo de vida en entre 4 y 6 meses (Clarke y Merlin, 2013). La duración del mismo y de las distintas etapas que lo componen se ve afectada fuertemente por las condiciones ambientales como la temperatura o el fotoperiodo (Schilling et al., 2020).

Mishchenko et al. (2017), realizaron una adaptación de la escala BBCH para esta especie (Cuadro 1), determinando un código para cada una de las etapas fenológicas principales del cannabis: germinación y brotación (0), desarrollo de hojas (1), formación de brotes laterales (2), elongación del tallo (3), emergencia de la floración (5), floración (6), desarrollo del fruto (7), madurez del fruto (8), senescencia (9). Estos estadios principales se subdividen a su vez en estadios secundarios establecidos de acuerdo a características distintivas. Para estos, se establece un segundo dígito que representa el estado de desarrollo de la planta. De acuerdo a esta escala, distintas etapas fenológicas coinciden en el tiempo como por ejemplo la formación de brotes laterales (2) con un número elevado de hojas desarrolladas (1.7).

Cuadro No. 1. Escala BBCH fenológica del cannabis

Código	Descripción
Estado fenológico 1: desarrollo foliar	
1.0	Cotiledones completamente desarrollados. Primeras hojas separadas
1.1	1er. par de hojas (simples)
1.2	2º. par de hojas (compuestas)
1.3	3er. par de hojas (compuestas)
1.4	4º. par de hojas (compuestas)
1.5	5º. par de hojas (compuestas)
1.6	6º. par de hojas (compuestas)
1.7	7º. par de hojas (compuestas)
1.8	8º. par de hojas (compuestas)
1.9	9º. par de hojas (compuestas)
Estado fenológico 2: formación de brotes laterales	
2.1	Primer brote lateral visible
2.5	Numerosos brotes laterales en la base de las hojas
Estado fenológico 3: elongación del tallo principal	
3.1	10% del largo final del tallo
3.2	20% del largo final del tallo
3.3	30% del largo final del tallo
3.4	40% del largo final del tallo
3.5	50% del largo final del tallo
3.6	60% del largo final del tallo
3.7	70% del largo final del tallo
3.8	80% del largo final del tallo
3.9	90% del largo final del tallo
Estado fenológico 5: emergencia de la inflorescencia	
5.1	Primer botón de flor individual visible
5.5	Numerosos botones florales visibles
5.9	Hojas del perianto caliciforme separadas pero botón floral aun cerrado
Estado fenológico 6: floración	
6.0	Primera flor individual abierta
6.2	20% de las flores abiertas
6.3	30% de las flores abiertas
6.4	40% de las flores abiertas

6.5	Plena floración: 50% de las flores abiertas
6.7	Floración terminando: 70% de las flores abiertas
6.9	Fin de la floración

Fuente: adaptado de Mishchenko et al. (2017).

Corresponde mencionar que esta escala incluye las etapas posteriores a la floración, como desarrollo, madurez del fruto y senescencia, que no ocurren en la producción de cannabis medicinal ya que el órgano de interés que se cosecha es la inflorescencia. A su vez, esta escala discrimina entre plantas macho y hembra dado el carácter dioico de la especie. Sin embargo, en el cultivo del cannabis para la producción de flor para consumo directo o para la obtención de extractos medicinales sólo interesan las plantas femeninas.

2.4.2. Germinación y desarrollo vegetativo

En la primavera, las semillas de cannabis germinan entre 3 y 7 días. Posterior a la emergencia de los cotiledones, a unos 10 cm las primeras hojas se desarrollan orientadas de forma opuesta (Clarke y Merlin, 2013).

Según Clarke y Merlin (2013), los sucesivos pares de hojas se colocan de forma opuesta a lo largo del tallo principal, el cual se va elongando a partir del meristema apical. En la base de las hojas se ubica el meristema axilar, que da origen a los tallos secundarios o brotes de la planta. A medida que la planta se desarrolla, las hojas emergentes van aumentando el número de folíolos, desde 3 hasta incluso 13. Esto ocurre hasta la inducción floral, donde este proceso se ve interrumpido y revertido con las últimas hojas compuestas por un solo folíolo y por lo tanto de menor tamaño.

Según Amaducci et al. (2008), una primer etapa “juvenil” del desarrollo vegetativo del cultivo se ve afectado solo por la temperatura hasta que el fotoperiodo comienza a influir en el desarrollo floral. En este sentido, la duración total de esta etapa se ve afectada por las condiciones fotoperiódicas dependiendo de la sensibilidad de la variedad (Small, 2016a). En general, la duración del periodo vegetativo es de unos 3 meses (Clarke y Merlin, 2013).

En la escala BBCH previamente mencionada la etapa vegetativa se clasifica principalmente de acuerdo al número de hojas desarrolladas (código 1.0, 1.1 y así sucesivamente). En simultáneo con la aparición de hojas se da la aparición de brotes laterales y la elongación del tallo que corresponden al código 2.0 y 3.0, respectivamente (Cuadro 1).

2.4.3. Desarrollo reproductivo

El primer cambio morfológico que indica el inicio de la fase reproductiva es el cambio en la filotaxia, que cambia de opuesta a alterna. Posteriormente se diferencian los primordios florales debajo de las estípulas en la base de las hojas (Clarke y Merlin, 2013).

De acuerdo a Cervantes (2006), Spitzer-Rimon et al. (2019), la inducción floral estrictamente hablando, manifestada por la mencionada aparición de flores solitarias en la base de las hojas, es independiente del fotoperiodo y estaría afectada por la edad de la planta y mecanismos de regulación interna. El efecto del fotoperiodo sobre la fenología de la planta se hace notable a partir de ese momento con la aparición y desarrollo de inflorescencias en toda la planta. Sin embargo, teniendo en cuenta que sin el fotoperiodo no habría desarrollo floral de importancia, se considera al mismo como el responsable principal de regular la floración en esta especie (Salentijn et al., 2019). Sin embargo, dentro de la extensa diversidad de la especie, existen plantas denominadas “autoflorecientes” que son insensibles al fotoperiodo debido a su origen genético, como se detalla más adelante (Small, 2016a).

En aquellas variedades o biotipos sensibles al fotoperiodo, se observa una respuesta facultativa al acortamiento de los días variando de acuerdo a la sensibilidad del material genético (Salentijn et al., 2019). Esto significa que para inducir la floración se requiere un mínimo número de días con un periodo (denominado valor crítico) ininterrumpido de oscuridad (Small, 2016a). El término “facultativo” hace referencia a que cuanto mayor sea el periodo de oscuridad por encima del valor crítico, más rápido ocurre el proceso de floración pero este no deja de ocurrir en caso de no alcanzar dicho valor (Clarke y Merlin 2013, Schilling et al. 2020). Se considera que para el cannabis el valor crítico es de aproximadamente 9 a 14 horas de luz, 15 a 10 horas de oscuridad, respectivamente (Lisson et al., 2000). Sin embargo, en general se utiliza un fotoperiodo de 12 horas como valor de referencia (Cervantes, 2006).

De acuerdo a Small (2016a), el origen genético de la variedad define la sensibilidad de la misma al fotoperiodo ya que se asocia con las estrategias adaptativas de los biotipos a cada región. Como ya fue mencionado, existen plantas que son independientes o insensibles al régimen de luz y esto se debe a que son originarias de latitudes extremas, es decir, de zonas o muy cercanas o muy lejanas al ecuador. En el primer caso el régimen de luz (fotoperíodo) no varía mayormente en la estación de crecimiento y a su vez esta es mayor al ciclo de vida de la planta por lo que los ejemplares distribuidos en esta zona desarrollaron otros mecanismos para iniciar la floración. Por otra parte, aquellas

plantas que evolucionaron en zonas muy lejanas al ecuador, debido a que la estación de crecimiento es extremadamente acotada, se independizaron del fotoperiodo ya que el tiempo no sería suficiente para completar el ciclo de vida si se espera a que los días se acorten.

Los biotipos que evolucionaron en la amplia región comprendida entre las zonas previamente mencionadas (entre latitudes 10 y 60 aproximadamente) son los que presentan respuesta al régimen lumínico en diferente medida. Aquellos que evolucionaron al Norte del continente europeo (mayor latitud) presentan mayor sensibilidad al acortamiento de los días ya que esto indica el fin de la estación del crecimiento por la llegada del invierno. De esta manera, la floración se desarrolla rápidamente para poder producir semillas. Por el contrario, ejemplares originarios de zonas más cercanas al ecuador (menor latitud) presentan menor sensibilidad al régimen lumínico debido a que la estación de crecimiento es más extensa permitiendo que la floración se desarrolle de forma más lenta (Small, 2016a).

2.5. SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

Existen distintos sistemas de producción para el cultivo de cannabis, que se puede desarrollar tanto de manera extensiva como intensiva, y dentro de esta última se encuentra la producción a campo o con estructuras de protección (invernaderos, macro túneles, etc.). El sistema de producción se establece de acuerdo al producto objetivo que se desea obtener. Dentro de los sistemas extensivos se encuentra la producción de fibra, semilla y algunos cultivos medicinales, que tienen como fin la extracción de CBD. Por otro lado, aquellos productos que tienen un mayor valor en el mercado son producidos bajo sistemas intensivos, donde hay una mayor inversión de recursos (capital y mano de obra) por unidad de superficie. Aquí se encuentran la producción de flores para fines recreativos llevada a cabo bajo invernadero, la producción de flores para consumo directo con alto contenido de CBD producidos a campo e invernadero y la mayoría de los productos con fines medicinales. Dentro de estos se encuentran los cultivos con altos contenidos de CBD y THC producidos bajo invernaderos y por otro lado, aquellos cultivos con altos contenidos de CBD que se pueden llevar a cabo bajo invernadero o a campo.¹

Tanto el sistema de producción con cultivo protegido como el que se desarrolla a cielo abierto presenta ventajas y desventajas. El primero tiene la ventaja de poder alcanzar mayores rendimientos por unidad de superficie, y por otro lado poder obtener un producto de mayor calidad (Potter 2014, Small 2016a, Chandra et al. 2017). A su vez, tienen la posibilidad de llevar a cabo

¹ Zumarán, A. 2021. Com. personal.

varios ciclos de cultivo al año gracias al control del fotoperíodo. Estos sistemas tienen como desventajas un mayor nivel de inversión y áreas de cultivo más reducidas en comparación a los cultivos a campo. En los sistemas donde se incluyen luces artificiales, es de suma importancia tanto el flujo de fotones incidente como el espectro lumínico. Las plantas utilizan mayormente la luz roja, roja lejana y azul para la fotosíntesis y para respuestas fotomorfogénicas (Gupta y Agarwal, 2017). Las luces de sodio son las más usadas en la producción de cannabis entre otras razones por un menor costo y una elevada eficiencia luminosa, de entre 80 y 125 lm.w^{-1} (Gupta y Agarwal 2017, Eichhorn Bilodeau et al. 2019). A su vez, respecto a sistemas con luces LED, las luces de sodio permiten un ancho de distribución lumínica uniforme y por lo tanto cubrir una mayor área de producción en sistemas a gran escala, con plantas ubicadas a distancia uniforme (Nelson y Bugbee, 2014). Sin embargo, presentan ciertas desventajas como la mayor proporción de luz amarilla dentro de la radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés) emitida y la alta luz infrarroja que no es útil para la fotosíntesis (Gupta y Agarwal, 2017). A su vez, según estos autores las luces de sodio presentan “una calidad espectral desequilibrada en relación con los picos de absorción de la clorofila a, b y b-caroteno que los hace inadecuados para promover la fotosíntesis y foto morfogénesis”. Otra desventaja es la elevada temperatura que alcanzan estas lámparas sino se realiza un control, pudiendo afectar al desarrollo de plantas (Eichhorn Bilodeau et al., 2019). Las luces de sodio presentan una menor relación rojo/rojo lejano, menor luz azul y más luz verde en comparación con luces LED. Luz verde y rojo lejano provocan efectos de elongación de tallo y mayor área foliar al simular condiciones de sombra, contrariamente a la luz roja y azul (Magagnini et al., 2018).

El cultivo a campo presenta la ventaja de ser más económicos, y permiten llevarse a cabo en grandes superficies. Sin embargo, la calidad del producto que se puede obtener es menor que en los cultivos bajo invernadero. Por otro lado, en zonas templadas solo se puede realizar un ciclo de cultivo por año, el cual dura entre 5 a 7 meses (Small 2016a, Chandra et al. 2017).

2.6. RENDIMIENTO: FACTORES Y COMPONENTES

2.6.1. Factores de ambiente determinantes

Tanto la producción de inflorescencias como el contenido total de cannabinoides están determinados tanto por factores genéticos, dependientes de cada variedad, así como de la influencia del ambiente (Small, 2016a). Dentro de estos últimos, son de gran relevancia la radiación, temperatura, tipo de suelo y disponibilidad de agua. El efecto de los mismos sobre el desarrollo y rendimiento del cannabis se presenta a continuación.

2.6.1.1. Intensidad y calidad de luz

La cantidad de radiación incidente sobre el cultivo es uno de los factores determinantes de su potencial de rendimiento afectando directamente el proceso fotosintético (Pertwee, 2014). Si bien la especie puede crecer en condiciones de sombra, su mejor desempeño ocurre bajo radiación directa en espacios abiertos y se observa una respuesta positiva al aumento en la radiación recibida sea natural o artificial (Small, 2016a). A mayor radiación la relación flor/hoja y el contenido de cannabinoides en la flor aumenta. Sin embargo, no se observa un efecto sobre la concentración de los distintos cannabinoides (Potter y Duncombe, 2012). La máxima actividad fotosintética, que se asocia a la productividad y rendimiento de la planta, ocurre en torno a los $1500 \mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Chandra et al., 2008). El punto de saturación lumínica presenta variaciones según la variedad habiendo algunas que aumentan la tasa fotosintética hasta los $2000 \mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Chandra et al., 2015). Niveles bajos de radiación limitan el desarrollo de la planta mientras que niveles muy elevados, por encima del punto de saturación afectan el metabolismo y por lo tanto el potencial de rendimiento (Aguirre-von-Wobeser et al., Osmond, citados por Chandra et al., 2008).

Las respuestas de la planta a la calidad de la luz del ambiente ocurren mediante fotoreceptores como los fitocromos y criptocromos (Gupta y Agarwal, 2017). El mecanismo de los fitocromos es el proceso por el cual la planta censa los cambios en el fotoperiodo durante las estaciones del año (Azcón-Bieto y Talón, 2008). El mismo está compuesto por dos moléculas interconvertibles entre sí en función de espectro lumínico (calidad de luz) absorbido: Fr absorbe luz roja y se convierte en Frl y este último al absorber rojo lejano se convierte en Fr (Eichhorn Bilodeau et al., 2019). Los fitocromos se encuentran en las plantas de forma biológicamente activa (fitocromo Rojo Lejano, Frl) e inactiva (fitocromo Rojo, Fr, Shinomura et al., 2000). En la luz del día predomina la luz roja sobre la roja lejana estableciéndose así un equilibrio entre ambas formas que resulta una relación Frl/F_{total} ($Fr + Frl$) alta al concluir el periodo luminoso. Durante la noche ocurre un proceso denominado “reversión nocturna” en el cual las moléculas de Frl se transforman en Fr. Por lo tanto, al finalizar la noche, la relación Frl/F_{total} es baja y su valor disminuye en proporción con el largo del periodo nocturno. De esta manera, las plantas “saben” el largo de la noche (y por lo tanto del día) en función de la relación Frl/F_{total} y a partir de ella se desencadenan las respuestas fotoperiódicas (Azcón-Bieto y Talón, 2008). Las plantas de día corto, como el cannabis, al percibir que la noche comienza a alargarse (y por tanto, el día a acortarse) promueven el desarrollo reproductivo. Sin embargo, Cervantes (2006), Spitzer-Rimon et al. (2019), señalan que en esta especie el efecto del fotoperiodo es sobre la tasa de desarrollo reproductivo y no sobre la inducción de la floración.

Por otra parte, la calidad de la luz incide sobre el desarrollo morfológico de las plantas al estas ser capaces de identificar situaciones de sombreado o dirección de la luz durante el día, y así se afectan varios procesos del desarrollo, denominando a dichas respuestas fotomorfogénicas (Taiz et al. 2015, Magagnini et al. 2018). Una respuesta típica al sombreado es la elongación de los entrenudos y la predominancia del crecimiento en base a pocos tallos como lo evidencia Ballaré (2014) con relaciones R/RL bajas en condiciones controladas. También hay receptores de la luz azul que regulan los procesos del desarrollo, en cannabis hay un efecto inhibitorio de la luz azul sobre la elongación de la planta lo que permite obtener plantas de menor largo de tallo y laterales y por lo tanto con inflorescencias más comprimidas (Small, 2016a).

La luz incidente también afecta la síntesis de THC y CBD (Magagnini et al., 2018). Este trabajo expresa que cultivos llevados a cabo bajo luz suplementaria de sodio (compuesta por una baja R/RL y baja luz azul) presentan una menor proporción de estos cannabinoides, respecto a aquellos bajo luces LED (alta R/RL). De acuerdo a Lydon et al. (1987), el uso de luces ultravioleta aumenta el contenido de THC.

2.6.1.2. Temperatura y humedad

La especie puede crecer sin problemas en condiciones de altas temperaturas si no presenta deficiencias en el agua disponible. La resina producida por las inflorescencias contribuye a bajar la temperatura en esa zona y evitar así la desecación de los tejidos en condiciones de excesiva transpiración. Por otra parte, el cultivo es muy sensible a las heladas sobre todo en estadios avanzados en comparación con la etapa juvenil (Clarke y Merlin, 2013). Las condiciones de la región de origen determinan el rango de temperatura óptimo de desarrollo para cada variedad (Chandra et al., 2017). En general la mayoría de las variedades presentan un rango óptimo de entre 25 y 30 °C aunque se han registrado aumentos en actividad fotosintética a temperaturas hasta incluso los 35 °C (Chandra et al., 2011a). Según Chandra et al. (2008), la tasa fotosintética se ve influida en conjunto por el nivel de radiación y la temperatura. En este sentido, la máxima tasa se dio a los 30°C observándose descensos en la actividad fotosintética a temperaturas mayores con igual nivel de radiación.

Amaducci et al. (2008) determinaron para variedades de fibra una temperatura base de 1,9°C para la fase juvenil y de 11,3°C a partir de que la planta adquiere sensibilidad a la luz. A su vez, la temperatura máxima considerada en este trabajo fue de 40°C con un óptimo de 26,4°C. Si bien el estudio no fue en variedades para producción de cannabinoides, las

temperaturas de desarrollo son considerables como referencia. Por otra parte, la temperatura influye también en la tasa de respiración nocturna. La misma aumenta desde los 20°C alcanzando un máximo a los 30°C. A partir de este punto, aumentos en temperatura significan descensos en la tasa de respiración. Se observa una asociación entre las temperaturas de máxima fotosíntesis con las de máxima respiración, según el comportamiento de cada variedad. Mayores tasas de respiración se asocian a menor productividad (Chandra et al. 2008, 2011b).

Respecto a la humedad, el cultivo requiere niveles elevados en las primeras etapas de plantin y disminuye este requerimiento en las etapas vegetativas avanzadas y reproductivas. Los valores utilizados en producciones indoor, donde la humedad es controlada, son en torno a los 75% y entre 55-60%, respectivamente (Chandra et al., 2017).

2.6.1.3. Requerimientos hídricos

El cannabis no requiere cantidades excesivas de agua y se desarrolla en condiciones variables de disponibilidad hídrica. Se adapta a condiciones de relativa escasez hasta humedad considerable. Sin embargo, situaciones extremas de deficiencias o excesos hídricos impactan negativamente en el cultivo. En el primer caso se ve comprometido el desarrollo radicular y foliar. En condiciones de producción, donde el cultivo crece rápidamente es necesario el aporte constante de agua y por lo tanto se recomienda regar cuando la zona sub superficial (3-4 cm) está seca (Cervantes, 2006).

Según Chandra et al. (2008), la transpiración por parte del cultivo en condiciones experimentales es creciente a mayor radiación incidente y temperatura. A su vez, existe una importante relación entre la tasa fotosintética y la eficiencia de uso de agua por el cultivo ($R = 0.92$). Esta última ocurrió en la máxima tasa fotosintética y no en el punto de máxima transpiración por el cultivo lo que sugiere que la primera ejerce un mayor control en la eficiencia de uso del agua por la planta. Por otra parte, se ha reportado que someter el cultivo a estrés hídrico moderado y controlado en momentos puntuales genera un aumento en la concentración de los cannabinoides principales y en el rendimiento de las inflorescencias (Caplan et al., 2019).

2.6.1.4. Suelos

La especie requiere suelos con buen drenaje para el correcto desarrollo de su amplio sistema radicular. Situaciones de anegamiento favorecen la aparición de hongos que atacan las raíces y perjudican seriamente el cultivo (Clarke y Merlin, 2013). A su vez, el cultivo requiere suelos de buena fertilidad y

sobre todo con elevada disponibilidad de nitrógeno debido a la evolución de la especie en ambientes con dichas características. Si bien el cultivo se puede desarrollar en suelos con deficiencias nutricionales, la fertilización (sobre todo con nitrógeno) provoca una elevada respuesta en crecimiento (Small, 2016a).

Además de llevarse a cabo a sobre el suelo a nivel de chacra, el cannabis se produce en macetas con suelo o sustratos específicos en sistemas hidropónicos. Estas alternativas son más frecuentes en sistemas de producción indoor o bajo invernáculo (Cervantes, 2006).

2.6.2. Medidas de manejo

2.6.2.1. Métodos de propagación

En cuanto a la propagación, se utilizan dos métodos: sexual (semillas) y asexual (esquejes). Para llevar a cabo la propagación vegetativa, se selecciona el genotipo de interés, para luego hacer crecer las plantas (denominadas madres) y mantenerlas en estado vegetativo. A estas plantas madres se le extraen brotes y se enraízan produciéndose esquejes, que luego darán origen a una nueva planta con el mismo genotipo, es decir, clones (Cervantes, 2006). Este método de propagación permite mantener la identidad genética y por lo tanto uniformidad fenotípica en comparación a la propagación por semilla. Si bien en la propagación por semilla se necesita cierta infraestructura, para hacer germinar las semillas y criar a los plantines que luego serán llevados al campo, en la propagación por esquejes se necesita una mayor inversión. Esto es debido a que se necesita un ambiente controlado, para poder cultivar las plantas madre y mantenerlas en estado vegetativo en épocas en donde naturalmente no es posible.

2.6.2.2. Densidad y fecha de siembra

A medida que se atrasa la fecha de siembra, se produce un acortamiento de la fase vegetativa y una disminución en la altura por lo que deberá sembrarse a densidades más altas (Rosenthal, citado por Amaducci et al., 2015). Desde un punto de vista agronómico en cultivos anuales, la densidad de plantación va a estar muy asociada a la fecha de siembra en la medida que se pretende la máxima eficiencia en la intercepción de luz por unidad de superficie efectiva de cultivo. Además, se obtiene así, una máxima eficiencia de uso de todos los insumos fijos invertidos en el ciclo productivo, como instalación de riego, gasto de combustible y horas hombre.

Por otro lado, esta especie se caracteriza por ser muy plástica, pudiéndose adaptar a distintas situaciones de densidad de siembra (Amaducci et al., 2015). Esto genera que la densidad de siembra tenga un fuerte impacto

en el rendimiento. Si la densidad de siembra es muy baja aumentan los rendimientos por planta, contrariamente a plantaciones muy densas en las que disminuye el rendimiento por planta. Sin embargo, estos incrementos en el rendimiento por planta no necesariamente suponen un incremento en rendimiento total, llevando por lo tanto a una baja eficiencia de utilización de la superficie (DEA, 1992). Además, la densidad de siembra estará determinada de acuerdo al objetivo de producción: fibra, semilla o flor (Cuadro 2).

Cuadro No. 2. Densidad de siembra de acuerdo al objetivo productivo y el sistema de producción

Objetivo productivo	pl.m ⁻²	Sistema de producción	Fuente
Fibra	50 - 750	outdoor	Dempsey *
Semilla	30 - 75	outdoor	Van der Werf *
Flor	1 - 4	outdoor	García-Tejero et al. (2014)
-	10	-	Rosenthal *
-	16 - 20	indoor	Vanhove et al. (2011)

*citados por Amaducci et al. (2015).

2.6.2.3. Control de la floración con luz

En las producciones comerciales de floricultura usualmente se manipula el fotoperiodo de tal forma de atrasar o adelantar la floración (Blanchard y Runkle, 2010). Uno de los métodos más utilizados para afectar el fotoperiodo es la interrupción nocturna (Whipker et al., 2020), el mismo consiste en suministrar luz artificialmente en el periodo de oscuridad de tal forma de crear una condición de día largo. Gracias a este mecanismo es que los cultivadores de cannabis regulan la luz que le llega al cultivo, de tal forma de inducir la floración o inhibir la misma. Un experimento llevado a cabo por Whipker et al. (2020), demostró la respuesta de la especie de cannabis a la interrupción nocturna. En donde se cultivaron plantas bajo 3 tratamientos lumínicos: día corto, día largo y día corto con interrupción nocturna. En este último, se suministró luz artificial desde las 22:00 hasta las 02:00 horas, revirtiendo el efecto de inducción floral y prolongando el periodo vegetativo.

Por otro lado, en sistemas de producción indoor en los cuales se realizan varios ciclos al año se utilizan, además de la interrupción nocturna, tecnologías que apuntan a interrumpir el pasaje de luz solar al cultivo, de tal forma de acortar el fotoperiodo e inducir la floración en aquellas épocas en donde naturalmente no ocurriría la inducción floral.¹

2.6.2.4. Cosecha, secado y procesado

Para efectuar la cosecha las plantas son cortadas al ras del suelo sobre la base del tallo principal. El punto óptimo de cosecha es aquel en cual se alcanza la mayor cantidad de cannabinoides, este se determina mediante análisis químicos y/o apreciación visual. En este último se estima que los mayores contenidos de cannabinoides se dan cuando al menos el 75% de los estigmas cambian su coloración de blanco a naranja o marrón (Small, 2016a).

En cuanto al secado existen distintos métodos dependiendo de la escala del cultivo: si esta es pequeña, simplemente se cuelgan de un cordón; por otro lado, en grandes plantaciones se utilizan secaderos con aire forzado de grado industrial. Las condiciones ambientales deben de ser con temperaturas entre 25-30 °C y con baja humedad, por lo general el proceso de secado dura un par de días. El contenido de humedad antes del secado representa el 80% del peso total, luego del secado este alcanza valores en el orden del 15% (Small, 2016a).

A la hora de procesar en primer lugar se separan las flores de los tallos y estos últimos se desechan ya que las concentraciones de cannabinoides son bajas. Si el objetivo es la venta de flores, estas se tienen que recortar, este proceso consiste en separar las hojas que bordean a las inflorescencias, ya que las mismas presentan menores niveles de cannabinoides. Para efectuar este trabajo las flores deben de estar suficientemente húmedas para que no se dañen en el proceso. Este trabajo se puede efectuar con máquinas y/o a mano (Small, 2016a).

2.6.3. Componentes de rendimiento

En la producción de cannabis medicinal, el objetivo productivo es obtener el mayor rendimiento posible de un cannabinoide, por ejemplo CBD. El mismo se puede descomponer y expresar a través de la siguiente ecuación.

$$\mathbf{RC \text{ (g.m}^{-2}\text{)} = MS \text{ (g.m}^{-2}\text{)} * PFlor \text{ (g.g}^{-1}\text{)} * Ctot \text{ (g.g}^{-1}\text{)} * PCn \text{ (g.g}^{-1}\text{)}}$$

RC = Rendimiento de cannabinoides

MS = Materia seca aérea

PFlor = Proporción en peso de hojas y brácteas de la inflorescencia

Ctot = Contenido total de cannabinoides en PFlor

PCn = Pureza, proporción de un determinado cannabinoide del total

La misma fue desarrollada por de Meijer et al. (2003), quienes establecen que los primeros 3 componentes de la fórmula son poligénicos, es decir, están regulados por un número importante de genes y por lo tanto se ven fuertemente influenciados por las condiciones del entorno. Sin embargo, el último componente, la proporción de un determinado cannabinoide en el perfil total de cannabinoides de la planta, está asociado a vías metabólicas específicas determinadas por el genotipo. Este último componente se define como el quimiotipo cualitativo de la planta, normalmente expresado como la relación THC/CBD. Según Pacifico et al. (2008), Aizpurua-Olaizola et al. (2016), esta relación es clara desde el inicio y se mantiene constante durante todo el crecimiento tanto en las hojas como en las flores independientemente del valor cuantitativo de cada cannabinoide, que presenta variaciones a lo largo del ciclo del cultivo.

Considerando plantas del quimiotipo 3, es decir, altas en CBD y bajas en THC, el contenido del primero en la planta aumenta progresivamente en hojas y flores hasta la maduración de las mismas. Posteriormente, con el desarrollo del fruto y la senescencia ocurre una baja en el nivel de cannabinoides (Pacifico et al. 2008, Aizpurua-Olaizola et al. 2016). Sin embargo, a nivel productivo se cosecha la inflorescencia madura y por lo tanto, con el máximo contenido de cannabinoides. De acuerdo a Richins et al. (2018), existe una fuerte correlación ($R = 0.92$) entre el contenido de CBD en hojas y el que se obtiene de las flores de variedades de alto potencial productivo.

La ecuación anterior permite obtener la producción de cannabinoides por unidad de superficie. Sin embargo, el producto final en del presente ensayo es la flor seca para consumo directo y no para la extracción de cannabinoides. En este contexto, el enfoque está puesto en los dos primeros componentes de la fórmula, la biomasa aérea total y la proporción de flores. A continuación se presentan los valores reportados para las variables relacionadas a los componentes de la fórmula.

Dentro el componente “materia seca” que incluye la flor, se define **biomasa vegetativa** al peso total por planta sin flor. El peso por planta ya sea en base seca o húmeda es directamente dependiente de la densidad de plantación en la que se desarrolle la planta (García-Tejero et al. 2014, 2020). En condiciones de indoor, donde se manejan densidades entre 10 y 15 pl.m⁻², se han registrado valores en peso fresco de entre 90 y 132 g.pl⁻¹ en los trabajos de Magagnini et al. (2018), considerando que 2/3 se pierden en el proceso de secado (DEA, 1992). En condiciones de producción a campo se reportan entre 0,44 y 0,27 kg.pl⁻¹ de biomasa vegetativa fresca en densidades entre 1 y 4 pl.m⁻², respectivamente (García-Tejero et al., 2014). En un trabajo posterior, se evaluaron distintas variedades en 3 densidades diferentes (0,97,

0,73 y 0,58 pl.m⁻²) arrojando valores de biomasa vegetativa en peso fresco por planta de 1,06, 0,91 y 1,2 kg.pl⁻¹, respectivamente (García-Tejero et al., 2020). Los datos extraídos de ambos trabajos se adaptaron considerando que el peso de flor representa 2/3 del rendimiento expresado como flor más hoja (Pertwee, 2014).

La **altura** de la planta, es una variable relacionada al desarrollo vegetativo y por lo tanto a la producción de biomasa, depende fuertemente de la variedad, origen genético y de las condiciones de crecimiento pudiendo variar entre 0,2 – 6 metros (Chandra et al., 2017). Las plantas denominadas “sativa” presentan alturas en el entorno de 2 a 4 m, siendo más altas que las “indica” con valores de 1 a 2 m (Small, 2016a). En general, en la producción de cannabis medicinal se utilizan variedades de menor altura.¹ Magagnini et al. (2018) reportan en condiciones de indoor alturas de planta de hasta 80 cm. Valores similares de altura en indoor a cosecha, en el entorno de los 60 cm son reportados por Cervantes (2006). Whipker et al. (2020) por su parte registraron alturas en el rango entre 30,5 a 57,2 cm en distintas condiciones de régimen lumínico. Para cultivos a campo para flor se registran alturas máximas a cosecha de 2.60 metros (Yoshimatsu et al., 2004).

A la proporción en peso de las flores con respecto al peso total de planta se le llama **índice de cosecha**. Según Singh y Stoskopf (1971), en los cereales a medida que se reduce la altura de la planta los índices de cosecha se reducen. Sin embargo, en cannabis, García-Tejero et al. (2014), en condiciones de campo, encontraron que los índices de cosecha varían entre un 20 y 40% dependiendo de la variedad. En este mismo sentido, en un trabajo posterior García-Tejero et al. (2020), en condiciones de macrotúnel, para tres variedades con fines medicinales, encontraron índices de cosecha que varían entre 30 y 45%. Los datos extraídos de ambos trabajos se adaptaron considerando que el peso de flor representa 2/3 del rendimiento expresado como flor más hoja (Pertwee, 2014). Se pone en evidencia así el efecto de la variedad en el índice de cosecha.

El rendimiento expresado como **peso seco de la inflorescencia** en condiciones de producción indoor, donde comúnmente se manejan densidades entre 10 y 15 pl.m⁻², los rendimientos registrados por Magagnini et al. (2018) oscilan entre los 20-30 g.pl⁻¹. Por su parte, Small (2016a) afirma que en estas condiciones los rendimientos se ubican en torno a los 0,250 a 0,500 kg.m⁻². Para condiciones de campo, García-Tejero et al. (2014) reportan rendimientos de 0,9, 0,12 y 0,15 kg.pl⁻¹ bajo densidades de 4, 2, y 1 pl.m⁻², respectivamente. En cuanto a condiciones de macrotúnel se reportan rendimientos de 0,14 a 0,24 kg.pl⁻¹ para densidades de entre 0,97 y 0,58 pl.m⁻² (García-Tejero et al., 2020). Los datos extraídos de ambos trabajos se adaptaron considerando que el peso

de flor representa 2/3 del rendimiento expresado como flor más hoja (Pertwee, 2014).

Los rendimientos relevados en condiciones similares al presente trabajo se presentan en el Cuadro 3. Se destaca la fuerte influencia de la densidad de plantas en el rendimiento.

Cuadro No. 3. Variables del rendimiento en función de la densidad de siembra y el sistema de producción

Fuente	Sistema de producción	Densidad de siembra (pl.m ⁻²)	Rendimiento (kg.m ⁻²)	Rendimiento (kg.pl ⁻¹)	Peso fresco biomasa (kg.pl ⁻¹)	Índice de cosecha (%)
García - Tejero et al. (2014)**	Exterior, con riego	1	0,15	0,15	0,45	41
		2	0,24	0,12	0,37	42
		4	0,34	0,09	0,27	42
Thomas (2002)	Exterior, con riego	1	0,5	0,5	-	-
ONUDD, Marruecos	Exterior, secano	1	0,076	0,076	-	-
Starks (1990)	Exterior	0,66	0,152 a 0,304	0,227 a 0,454	-	-
Uruguay XXI (2020)	Invernáculo	-	0,05 a 0,1	-	-	-
García - Tejero et al. (2020)**	Macro túnel	0,97	0,19	0,20	1,1	30
		0,73	0,11	0,15	0,91	30
		0,58	0,13	0,24	1,2	31
Magagnini et al. (2018)	Indoor	-	-	0,0262	0,136*	-

*Asumiendo que pierde 2/3 en el proceso de secado (DEA, 1992).

**Considerando que el peso de flor representa 2/3 del rendimiento expresado como flor más hoja (Pertwee, 2014)

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN GENERAL

3.1.1. Localización

El ensayo se realizó en un cultivo comercial del establecimiento llamado “La Pindó”, ubicado en Paraje Piedra del Toro, cercano a Empalme Olmos, a 100 metros de la Ruta Nacional no. 8 “Brigadier General Juan Antonio Lavalleja”. El establecimiento se ubica sobre Formación Pando, y pertenece al grupo CONEAT 10.7.

3.1.2. Descripción del cultivo

La preparación del suelo se realizó con herramientas de laboreo vertical respetando los desagües naturales. La sistematización del cultivo se realizó a partir de las curvas de nivel en filas con pendientes entre 0,6 y 0,8% de no más de 80 metros de largo sobre suelo alomado, esto permitió aumentar el volumen de suelo donde se desarrolló el sistema radicular y se aseguró un buen drenaje interno.

Las plantas se desarrollaron a partir de semillas y se mantuvieron en un contenedor con luces artificiales por aproximadamente 40 días hasta alcanzar 3 pares de hojas para luego ser trasplantadas a los canteros.

En cada cantero se instaló “mulch” plástico como forma de control de malezas. La entredila se mantuvo siempre empastada y rematada al centro para que funcione como drenaje. El ancho de cada cantero era de 1 m y se encontraban a una distancia de 3 metros entre ellos, para permitir la mecanización de las tareas. La distancia entre plantas fue de 1 metro por lo que la densidad de siembra efectiva fue de 1 pl.m⁻² de cantero. Si se toma en cuenta el espacio entre canteros la densidad promedio fue de 3333 pl.ha⁻².

El cultivo se desarrolló con riego localizado por goteo con emisores de 1.5 litros por hora separados a 33 cm, con diseño hidráulico dimensionado para entregar una lámina neta de 5 mm. El riego tenía un sistema de inyección de fertilizantes Venturi y se abastecía de un pozo semisurgente de 10.000 litros/hora. Por medio del riego se adicionaron 70,5 mm de lámina neta en todos los tratamientos por igual. Las precipitaciones registradas durante el periodo de crecimiento del cultivo fueron de 75 mm.

El objetivo productivo del cultivo era el consumo directo de la flor.

3.1.3. Descripción del cultivar CW 2a

Según el formulario de descripción varietal del INASE (Instituto Nacional de Semillas), la variedad CW 2a de *Cannabis sativa* L. presenta una pigmentación antociánica fuerte del pecíolo en las últimas hojas opuestas completamente abiertas.

El número de folíolos de las últimas hojas opuestas completamente abiertas es medio. Presenta una época de floración masculina temprana. El contenido de THC total en la inflorescencia es de 0,15%. Considerando el THC en su forma ácida, como normalmente se realiza, el contenido es de 0,6%. La proporción de plantas hermafroditas en semilla regular es media, la proporción de plantas femeninas es alta y la masculina baja. En el ensayo se trabajó con semilla feminizada y el porcentaje de plantas hermafroditas fue 0 y de plantas machos fue de 0,03%. La altura de la planta es media y el color del tallo principal es verde medio.

3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS

Se realizaron 4 tratamientos con 38 plantas (dispuestas en 2 canteros) inicialmente cada uno, estudiando así un total de 152 plantas. En la Figura 1 se aprecia un croquis de la ubicación de los tratamientos.

1) Macro túnel con luz (M1): con lámparas de sodio de 400 watts 1/6 m² dentro del macro túnel. 3 horas de luz durante la noche de 00 a 3 am.

2) Macro túnel con luz indirecta (M2): sin focos dentro. 3 horas de luz durante la noche de 00 a 3 am. A menos de 10 metros de la fuente de luz artificial.

3) Campo con luz indirecta (C1): 3 horas de luz durante la noche de 00 a 3 am. A menos de 10 metros de la fuente de luz artificial del macro túnel.

4) Campo sin luz (C3): cultivo sin cobertura a unos 70 metros de la fuente de luz artificial del macro túnel. En este tratamiento solo se midieron las variables de cosecha.

Debido a la heterogeneidad en el desarrollo de las plantas, entre un 30 y un 40% de las correspondientes a los tratamientos M1, M2, C1 fueron podadas apicalmente el 1/3/2021 como una medida de manejo por parte de la empresa para todo el cultivo. Las plantas podadas eran aquellas de mayor altura (utilizando como criterio una altura de 40 cm, aproximadamente). Al no ser posible separar el efecto poda del efecto tratamiento y ya que la poda apical afecta algunas de las variables asociadas al desarrollo del cultivo como la altura

y el número de nudos, el análisis de los resultados y la discusión se presentan considerando las plantas sin podar por un lado y la totalidad de plantas (incluyendo las podadas) por otro.

Respecto al diseño experimental no es posible identificar uno dentro del presente ensayo dada la ausencia de repeticiones en las situaciones de producción por lo tanto el análisis estadístico se realiza en base a herramientas descriptivas.

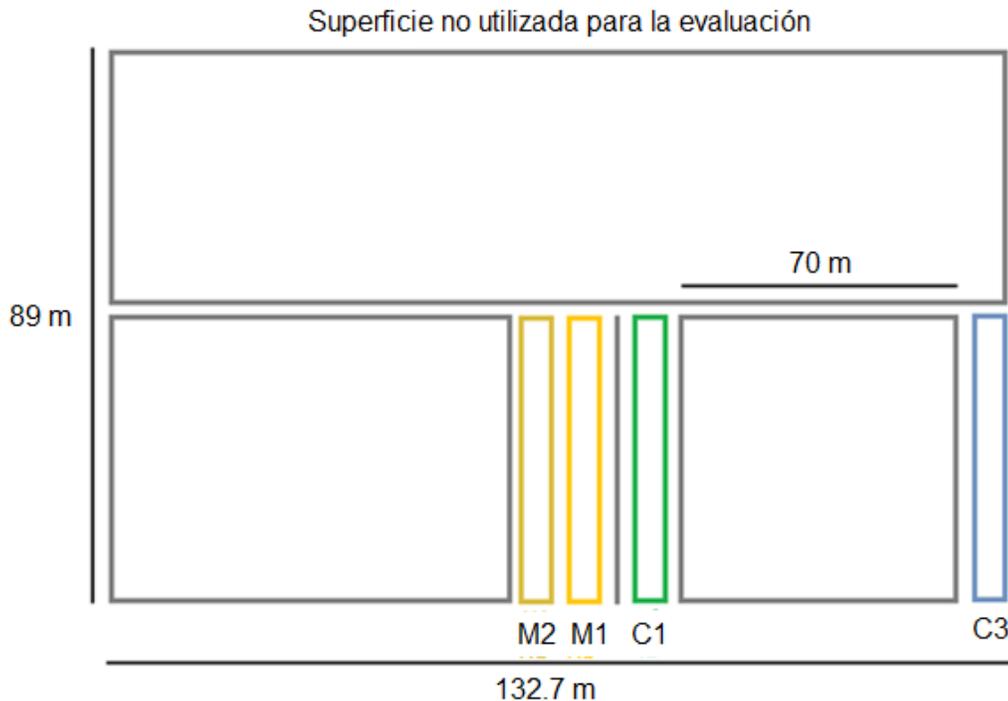


Figura No. 1. Croquis representativo de la disposición tratamientos

Utilizando un espectro radiómetro, se midió la radiación que le llegaba a las plantas en la noche con las luces encendidas. A partir de esos datos se calculó un espectro promedio por tratamiento. En el Cuadro 4 se aprecian los valores de radiación total en $w.m^{-2}$ y por tipo de luz (azul y roja) con su respectiva proporción sobre el total para cada tratamiento. En los Anexos 1, 2, 3, 4 se encuentran los espectros lumínicos graficados para cada tratamiento.

Cuadro No. 4. Características del espectro lumínico para los tratamientos bajo luz

Tratamiento	Luz indirecta (M2)	Luz directa (M1)	Luz indirecta (C1)
Total ($w.m^{-2}$)	58,75	1609,49	9,4
Luz azul ($w.m^{-2}$)	11,7	543,45	0,41

% Azul/total	20%	34%	4%
Luz roja (w.m ⁻²)	6,67	158,66	0,51
% Rojo/total	11%	10%	5%
Luz roja lejana (w.m ⁻²)	3,48	75,00	1,38
% RL/total	6%	5%	15%
R/RL	1,92	2,12	0,37

3.3. VARIABLES ANALIZADAS Y METODOLOGÍA

Las variables estudiadas fueron altura de planta, número de nudos en el tallo principal (discriminando entre nudos opuestos y alternos), número de brotes, número de brotes con flor, rendimiento de flor en fresco, rendimiento de flor en seco, peso de planta, IAF, CBD (%) y THC (%).

Como se mencionó anteriormente, el cultivo se instaló el 27/01/2020. La primera medición se realizó el 10/02/2020 y continuando en las fechas 10-18-26/02/2020 y 03-12-21-29/03/2020. Hasta el 29 de marzo del 2020 se realizaron las mediciones a campo de las variables altura de planta, número de nudos alternos y opuestos, número de brotes totales y número de hojas. Las mediciones se realizaron sobre las mismas plantas durante todo el proceso. Se midió la humedad y la temperatura de cada tratamiento en las fechas de marzo mencionadas.

Cuando las plantas cumplieron su ciclo y fueron cosechadas, se pasó a medir las variables de rendimiento, esto se llevó a cabo dentro de un contenedor donde se separaron los procesos por estaciones. Las variables fueron las siguientes.

- a) Peso planta entera.
- b) Separación de laterales de tallo principal.
- c) Separación de flores mecánicamente (descogollador): esta herramienta estaba compuesta por una placa de metal con varios agujeros de diferentes diámetros donde por allí se pasaban los tallos y los cogollos iban cayendo en un wenco.
- d) Peso total de flor húmeda.
- e) Trimiado mecánico (máquina que separa las flores de las hojas)
- f) Peso total por planta húmedo de flores trimiadas,

g) Secado en wuencos.

h) Peso total por planta seco de flores

Esto sucedió a partir del 15/04/2020 cuando se comenzaron a medir las variables de rendimiento en fresco con la cosecha del campo 3. El 20/04/2020 se midió las variables de rendimiento en seco. El rango de humedad residual definido como indicador para retirar las flores de secadero fue entre 10-12%.

El 13/05/2020 se cosechó el campo 1 y se midieron las variables de rendimiento en fresco y el 18/05/2020 en seco. El 25/05/2020 se cosechó los macro túneles y se hicieron las mediciones en fresco. El 30/05/2020 se midió las variables en seco.

3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Dada la ausencia de repeticiones, ya que solo se disponía de dos macros y focos para uno solo no es posible identificar un diseño experimental por ello se realizara un análisis estadístico descriptivo. Cada muestra fue separada en los componentes plantas podadas y no podadas. Las herramientas estadísticas utilizadas se presentan a continuación.

- Medidas de resumen: las medidas de resumen como su nombre lo indica resumen en una sola cifra toda la información contenida en una variable. Dentro de estas se utilizaron medias, medianas y coeficientes de variación (Balzarini et al., 2008).
- Boxplot: es un método estandarizado para representar gráficamente una serie de datos numéricos a través de sus cuartiles. De esta manera, el diagrama de caja muestra a simple vista la mediana y los cuartiles de los datos, pudiendo también representar los valores atípicos de estos (Balzarini et al., 2008).
- Intervalos de confianza: se llama intervalo de confianza a un par o varios pares de números entre los cuales se estima que estará cierto valor desconocido respecto de un parámetro poblacional con un determinado nivel de confianza. Formalmente, estos números determinan un intervalo, que se calcula a partir de datos de una muestra, y el valor desconocido es un parámetro poblacional. En base a esto se realizaron estadísticas descriptivas, correlaciones y gráficos (boxplot), se ajustaron los datos de las mediciones a regresiones lineales y a partir de las mismas se probó que los residuos de dichas regresiones tienen todos distribución normal y homogeneidad de varianza (Balzarini et al., 2008).

- **Análisis de correlación:** bajo este título se encuentran métodos de cálculo de coeficientes de correlación muestral, de coeficientes de correlación parcial y de efectos directos e indirectos en un análisis de sendero (path analysis). Todos estos métodos suponen que se tienen dos o más variables aleatorias relevadas sobre cada una de las unidades experimentales u observacionales. El interés es obtener una medida de la magnitud (y dirección) de la asociación o covariación de cada par de variables (Balzarini et al., 2008).
- **Análisis de regresión lineal:** predice el valor de la media poblacional de una variable dependiente, sobre la base de una combinación lineal de variables independientes para las cuales se conocen los valores que asumen en los individuos de una muestra. El objetivo del análisis discriminante es encontrar una combinación lineal de variables independientes que minimice la probabilidad de clasificar erróneamente individuos u objetos en sus respectivos grupos. En cuanto a los supuestos, en el análisis de regresión la variable dependiente se asume normalmente distribuida y las independientes son fijas. En el análisis discriminante las variables independientes son las que generalmente se asumen normalmente distribuidas y la dependiente (variable de agrupamiento) es fija (Balzarini et al., 2008).

4. RESULTADOS

4.1. MEDICIONES FENOLÓGICAS DEL CICLO DEL CULTIVO

En las mediciones realizadas previo a la instalación de la luz suplementaria se observa la presencia de órganos reproductivos en estados inmaduros en todos los tratamientos. Una vez iniciada la suplementación lumínica el 15/02 se aprecia un menor desarrollo floral respecto a las plantas alejadas de la luz y la aparición de nuevos brotes vegetativos que se asocian a una reversión floral en la planta. El campo 3 presenta una duración del ciclo sensiblemente menor respecto a los tratamientos con luz, de 45 días de diferencia (Figura 2). En el Cuadro 5 se observa el estado fenológico de las plantas en las fechas mencionadas en la Figura 2.

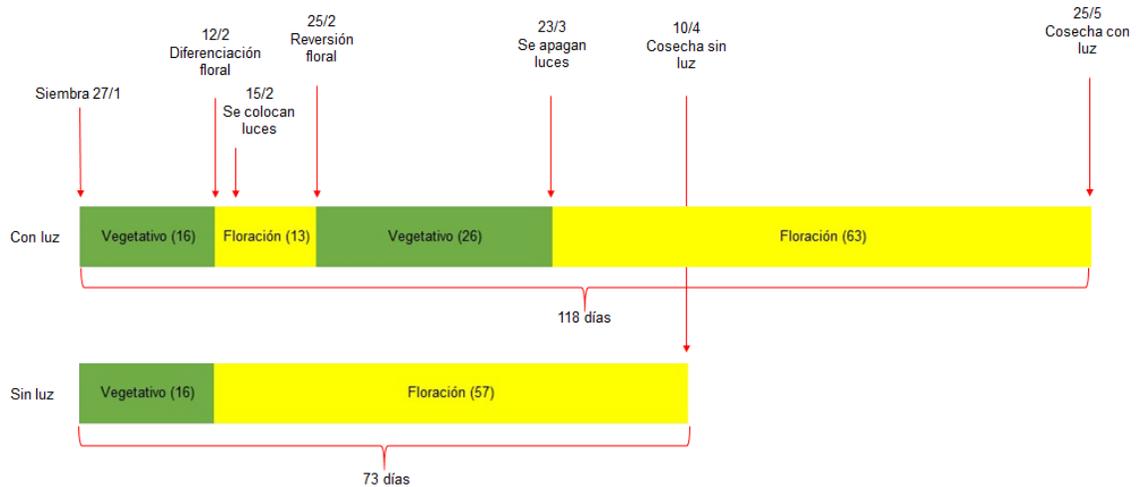


Figura No. 2. Diagrama de la duración y composición de los ciclos en ambas condiciones de desarrollo

Cuadro No. 5. Código de la escala BBCH en las fechas de mayor relevancia

Estado de desarrollo	Estado fenológico (escala BBCH)			
	12-feb.	15-feb.	25-feb.	23-mar.
Tratamientos con luz				
Vegetativo	1.5	1.6	1.9	1.11
Reproductivo	5.5	5.5	5.5	6.5
Tratamientos sin luz				
Vegetativo	1.5	1.6	1.6	-
Reproductivo	5.5	5.5	6.2	6.7

4.2. PLANTAS SIN PODAR

4.2.1. Medidas de resumen

Las poblaciones de las variables evaluadas tienen una distribución normal dada la simetría entre media y mediana observada tanto a nivel de población general como a nivel de las poblaciones de cada tratamiento (Cuadro 6, Figuras 3, 4, 5, 6).

Cuadro No. 6. Medidas de resumen de la población general para las distintas variables

Variable	n	Media	CV	Mediana
No. nudos opuestos	101	7,28	25,12	7
No. nudos alternos	101	15,73	34,62	16
No. nudos TP	101	23,01	21,38	23
Altura (cm)	101	55,77	25,05	56
Peso neto flor seca (kg.pl ⁻¹)	102	0,14	44,84	0,15
No. de nudos en brotes laterales	69	373	18,61	367
Biomasa vegetativa (kg.pl ⁻¹)	102	0,44	61,37	0,38
Índice de cosecha	102	61,92	15,37	63,16
IAF	72	2,87	48,74	2,68

Las variables con menor coeficiente de variación son: índice de cosecha (15%), número de nudos en brotes laterales (18%) y número de nudos en el tallo principal (21%, Cuadro 6). Las variables biomasa vegetativa, IAF y peso de flor seca, presentan coeficientes de variación que superan el 30%; para las mismas variables el campo 3 fue el tratamiento que más variación tuvo, 64%, 48% y 57% respectivamente (Cuadro 7).

Cuadro No. 7. Medidas de resumen por tratamiento para las distintas variables

Variable	Macro 2		Macro 1		Campo 1		Campo 3	
	Media	CV	Media	CV	Media	CV	Media	CV
No. nudos opuestos	6	24	7	28	8	28	7	15
No. nudos alternos	21	19	17	34	15	28	13	37
No. nudos tallo principal	27	14	24	22	23	13	20	23
Altura (cm)	64	22	55	24	58	19	51	29
Peso flor seca (kg.pl ⁻¹)	0,14	38	0,13	41	0,17	34	0,13	57
No. nudos brotes laterales	408	21	358	19	366	14	sd	sd
Biomasa vegetativa (kg.pl ⁻¹)	0,62	46	0,36	45	0,66	37	0,25	64

Índice de cosecha (%)	53	16	61	8	56	13	72	7
IAF	2,6	34	1,86	33	2,78	29	3,47	48

4.2.2. Boxplot

Se presentan las gráficas de boxplot para las variables: índice de cosecha, altura, biomasa vegetativa y peso de flor seca, ya que son las variables con resultados más relevantes y de mayor importancia agronómica.

La media del **índice de cosecha** del campo 3 es 10% superior a la media general (62% vs. 72%, Cuadro 6). El 90% de los datos son mayores a la media general. Los tratamientos restantes no presentan grandes diferencias entre ellos en su media pero si en la variabilidad, sobre todo en los tratamientos campo 1 y macro 2 (Figura 3).

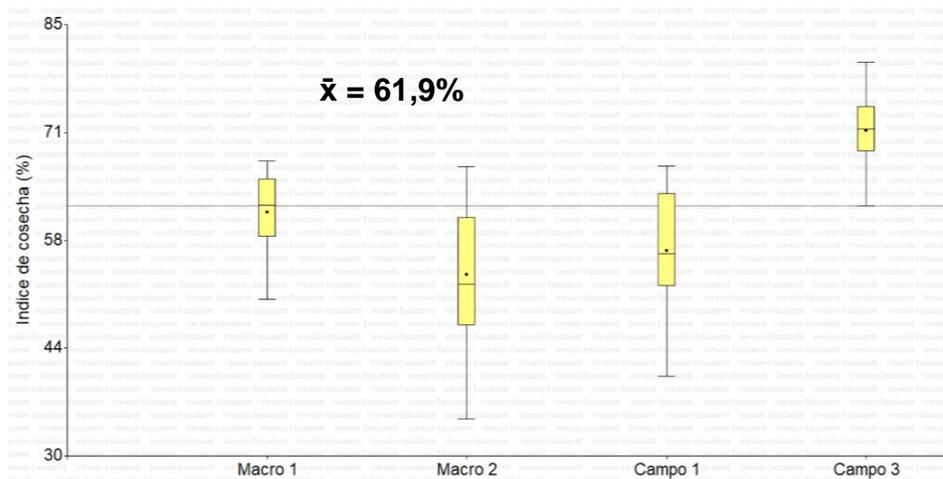


Figura No. 3. Efecto de los tratamientos sobre el índice de cosecha

En relación a la **altura** de planta las poblaciones se pueden agrupar los tratamientos en dos grupos. Macro 2 y campo 1 presentan una altura promedio superior a la media poblacional (56 cm, Cuadro 6). Por otro lado, el macro 1 y campo 3 presentan promedios de altura inferiores a la media poblacional. Estos últimos presentan una mayor variación de los datos (Figura 4).

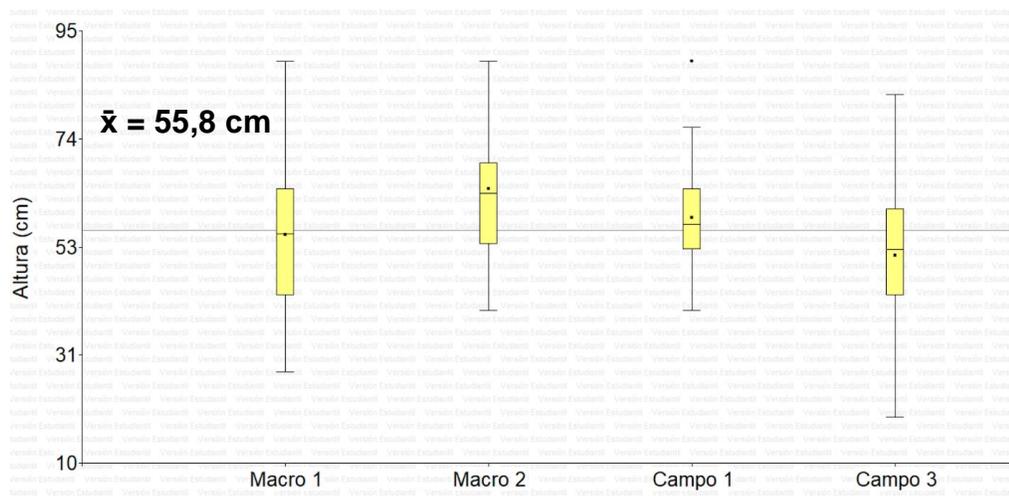


Figura No. 4. Efecto de los tratamientos sobre la altura (cm)

En relación al **peso de flor seca** (Figura 5) se observa la misma agrupación de las poblaciones que se observó para la variable altura (Figura 4). Las poblaciones del macro 2 y campo 1 presentan medias superiores a la media poblacional ($0,14 \text{ kg.pl}^{-1}$). No hubo una gran variación en el rendimiento entre los tratamientos, siendo en el campo 1 donde se obtuvieron los rendimientos más altos: $0,17 \text{ kg.pl}^{-1}$. Por otro lado, los rendimientos más bajos se obtuvieron en el campo 3 y macro 1: $0,13 \text{ kg.pl}^{-1}$. El macro 2 es el que presenta menor variabilidad (Figura 5).

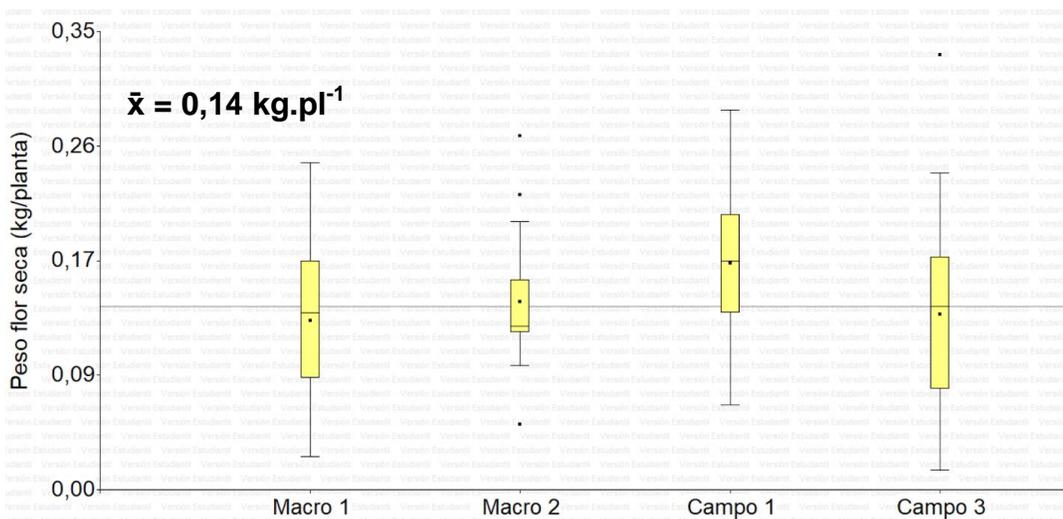


Figura No. 5. Efecto de los tratamientos sobre el peso de flor seca (kg.pl^{-1})

De manera similar a las variables anteriores, para la variable **biomasa vegetativa** (Figura 6) se observó que las poblaciones del macro 2 y campo 1 se distribuyen hacia valores superiores a la media general ($0,44 \text{ kg.pl}^{-1}$, Cuadro

6). A su vez, se distribuyen de manera similar. El campo 3 y macro 1 cuentan con poblaciones parecidas en su distribución pero hacia valores inferiores a la media general.

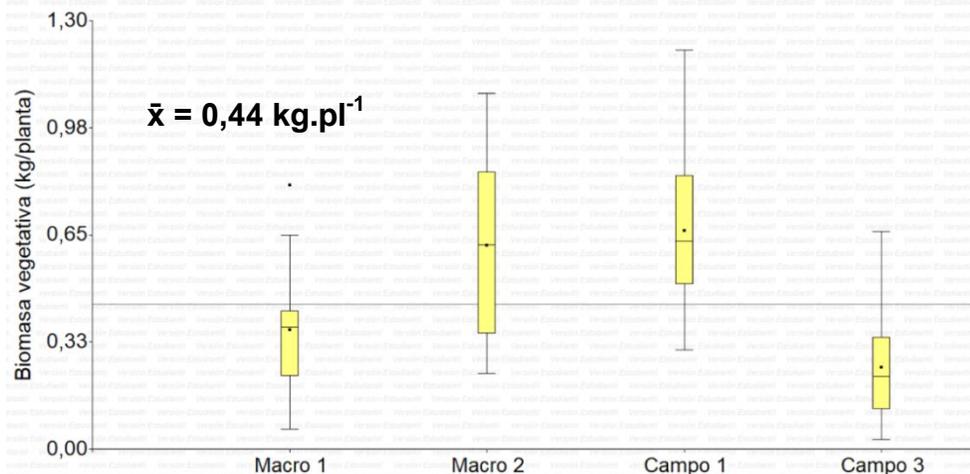


Figura No. 6. Efecto de los tratamientos sobre la biomasa vegetativa (kg.pl⁻¹)

4.2.3. Intervalos de confianza

Se presentan en el Cuadro 8 los intervalos de confianza con una probabilidad del 95% para las variables: índice de cosecha, altura, biomasa vegetativa y peso flor seca, ya que son las variables con resultados más relevantes y de mayor importancia agronómica.

Cuadro No. 8. Intervalos de confianza para las principales

Variable	Macro 2		Macro 1		Campo 1		Campo 3	
	LI (95%)	LS (95%)						
Altura (cm)	56,23	71,52	49,58	60,12	53,63	62,77	45,57	55,94
Peso flor seca (kg.pl ⁻¹)	0,12	0,17	0,11	0,15	0,15	0,20	0,11	0,16
Biomasa vegetativa (kg.pl ⁻¹)	0,47	0,76	0,30	0,43	0,56	0,76	0,19	0,30
Índice de cosecha (%)	48,72	57,44	59,22	62,97	53,03	59,28	69,70	73,31

Altura: ningún tratamiento se diferenció de todos los demás. Sin embargo, sí hubo diferencia entre el campo 3 y el macro 2, donde este último tuvo valores superiores.

Peso flor seca: para esta variable tampoco hubo un tratamiento que se diferenciara de todos los demás, pero sí hubo diferencias entre el campo 1 y el macro 1.

Biomasa vegetativa: en esta variable sí se encontraron diferencias. Siendo el campo 3 el tratamiento de menor peso por planta, seguido por el macro 1. Los tratamientos campo 1 y macro 2 son los de mayor valor en esta variable no encontrándose diferencias entre ellos.

Índice de cosecha: el campo 3 se diferencia del resto de los tratamientos con valores superiores. El macro 1 es el siguiente con valores superiores a los dos restantes los cuales no presentan diferencias entre ellos.

4.2.4. Correlaciones

En cuanto al análisis de las correlaciones a nivel de toda la población (Cuadro 9) las variables asociadas al desarrollo vegetativo se correlacionan entre ellas de manera positiva, a excepción de la correlación entre nudos opuestos y alternos, la cual es negativa. Por lo tanto, a medida que aumenta el largo de tallo se observa un mayor número de nudos en el tallo principal y estos últimos asociados a nudos alternos, provocando un mayor peso de planta. El IAF solo se correlacionó con la altura, dentro de las variables vegetativas, pero con un bajo coeficiente de correlación (0,35). Por otro lado, se observa que las variables vegetativas se correlacionan con el rendimiento en diferente medida, es decir, que aquellas plantas con mayor desarrollo vegetativo presentan una mayor producción de flor. La altura (0,75) y el peso de la biomasa (0,68) presentan una mayor correlación en comparación con los nudos del tallo principal (0,46) y el IAF (0,54). En cuanto al índice de cosecha, este se correlacionó negativamente con todas las variables vegetativas, es decir, plantas con mayor desarrollo vegetativo tienen menor índice de cosecha.

Cuadro No. 9. Correlaciones de todas las variables considerando todos los tratamientos de las plantas sin podar

Variables	NNO	NN A	NN TP	Altura	Peso flor seca	Indice de cosecha	IAF	Biomasa vegetativa
NNO	1	-0,44	-0,12	0,02	0,12	0,02	0,11	0,04
NNA		1	0,94	0,64	0,38	-0,29	0,002	0,44
NNTP			1	0,71	0,46	-0,32	0,04	0,5
Altura				1	0,75	-0,24	0,35	0,68
Peso flor seca					1	0,0017	0,54	0,68
IC (%)						1	0,19	-0,66
IAF							1	0,22
Biomasa veg.								1

En color correlaciones significativas: positivas (rojo); negativas (violeta). Significancia considerando un $p < 0,05$.

NNO= Número de nudos opuestos; NNA= Número de nudos alternos; NNTP= Número de nudos del tallo principal; IC= Índice de cosecha.

Cuando se separan las correlaciones por tratamiento (Cuadros 10, 11, 12, 13) se observan las mismas asociaciones previamente mencionadas pero en mayor magnitud en el campo 3. En este último se observa a su vez una mayor correlación entre el número de nudos del tallo principal con el resto de las variables.

Cuadro No. 10. Correlaciones entre variables para el tratamiento campo 1

Variables	NNO	NNA	NNTP	Altura	Peso flor seca	IC	IAF	Biomasa vegetativa
NNO	1	-0,76	-0,34	-0,10	-0,09	0,13	-0,11	-0,25
NNA		1	0,87	0,46	0,18	-0,17	-0,03	0,34
NNTP			1	0,61	0,19	-0,14	-0,18	0,30
Altura				1	0,66	-0,04	0,38	0,63
Peso flor seca					1	0,4	0,76	0,61
IC						1	0,42	-0,45
IAF							1	0,62
Biomasa veg.								1

En color correlaciones significativas: positivas (rojo); negativas (violeta). Significancia considerando un $p < 0,05$.

NNO= Número de nudos opuestos; NNA= Número de nudos alternos; NNTP= Número de nudos del tallo principal; IC= Índice de cosecha.

Cuadro No. 11. Correlaciones entre variables para el tratamiento campo 3

Variables	NNO	NNA	NNTP	Altura	Peso flor seca	IC	IAF	Biomasa vegetativa
NNO	1	-0,16	0,08	0,11	0,1	-0,17	0,14	0,15
NNA		1	0,97	0,84	0,81	0,17	0,42	0,76
NNTP			1	0,87	0,84	0,14	0,46	0,80
Altura				1	0,92	0,06	0,60	0,88
Peso flor seca					1	0,09	0,68	0,94
IC						1	-0,01	-0,18
IAF							1	0,64
Biomasa veg.								1

En color correlaciones significativas: positivas (rojo); negativas (violeta). Significancia considerando un $p < 0,05$.

NNO= Número de nudos opuestos; NNA= Número de nudos alternos; NNTP= Número de nudos del tallo principal; IC= Índice de cosecha.

Cuadro No. 12. Correlaciones entre variables para el tratamiento macro 1

Variables	NNO	NNA	NNTP	Altura	Peso flor seca	IC	IAF	Biomasa vegetativa
NNO	1	-0,41	-0,07	0,12	0,24	-0,1	0,43	0,28
NNA		1	0,94	0,49	0,25	0,24	-0,16	0,20
NNTP			1	0,58	0,36	0,22	-0,02	0,32
Altura				1	0,64	-0,01	0,50	0,65
Peso flor seca					1	0,21	0,72	0,87
IC						1	-0,20	-0,21
IAF							1	0,78
Biomasa veg.								1

En color correlaciones significativas: positivas (rojo); negativas (violeta). Significancia considerando un $p < 0,05$.

NNO= Número de nudos opuestos; NNA= Número de nudos alternos; NNTP= Número de nudos del tallo principal; IC= Índice de cosecha.

Cuadro No. 13. Correlaciones entre variables para el tratamiento macro 2

Variables	NNO	NNA	NNTP	Altura	Peso flor seca	IC	IAF	Biomasa vegetativa
NNO	1	-0,24	0,15	0,1	0,08	0,03	-4E-03	-0,02
NNA		1	0,92	0,57	0,39	-0,32	0,56	0,51
NNTP			1	0,62	0,43	-0,32	0,47	0,52
Altura				1	0,87	-0,10	0,17	0,71
Peso flor seca					1	0,04	-0,06	0,71
IC						1	-0,77	-0,64
IAF							1	0,47
Biomasa veg.								1

En color correlaciones significativas: positivas (rojo); negativas (violeta). Significancia considerando un $p < 0,05$.

NNO= Número de nudos opuestos; NNA= Número de nudos alternos; NNTP= Número de nudos del tallo principal; IC= Índice de cosecha.

4.2.5. Regresiones

Para las variables registradas durante todo el ciclo, fueron ajustadas regresiones lineales en cada tratamiento siendo las variables independientes: días desde la siembra y tiempo térmico y las dependientes: altura, total no. nudos en brotes, no. nudos tallo principal. Se ajustaron las ecuaciones para

cada población por separado, se consideraron los R^2 , y el p-valor para cada curva.

Respecto a las regresiones, a medida que un cultivo va creciendo (aumentan los días post siembra), las variaciones entre los valores de altura, total no. nudos en brotes y no. nudos en tallo principal son mayores. En la medida que aumenta el promedio, aumenta la variación, a valores más grandes hay dispersiones mayores. Esto podría explicar las distribuciones diferentes a las normales. Se realizaron los análisis de residuos y los QQ-plot para asumir normalidad y homogeneidad de varianza. Los residuos estandarizados de las variables resultaron todas aproximadamente normales. Los puntos que se observan en las gráficas son los residuos que se obtuvieron en las mediciones realizadas. Los que más se salen de la línea recta son pequeñas discrepancias. Si la distribución fuera totalmente normal, los puntos estarían todos sobre la línea recta. También se analizó de forma gráfica los predichos y los residuos de las regresiones (Figuras 7, 8, 9, 10, 11).

Cuadro No. 14. Intervalos de confianza y estimador de las regresiones

Variable	Campo 1			Macro 1			Macro 2		
	Est.	LI (95%)	LS (95%)	Est.	LI (95%)	LS (95%)	Est.	LI (95%)	LS (95%)
Altura - Fecha	1,07	1	1,13	0,95	0,88	1,02	1,17	1,06	1,28
No. nudos en brotes laterales - Fecha	7,55	7,21	7,89	7,29	6,84	7,75	7,66	6,87	8,44
No. nudos tallo principal - Fecha	0,45	0,43	0,47	0,47	0,44	0,49	0,5	0,47	0,53
No. nudos en brotes laterales - TT	0,44	0,41	0,48	0,44	0,39	0,48	0,42	0,33	0,52
No. nudos tallo principal - TT	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Número de nudos en brotes en función de la fecha de medición: analizando los intervalos de confianza de la regresión no se diferencia ninguna población del resto (Cuadro 14). Los R^2 para los 3 tratamientos presentan valores altos (Figura 7).

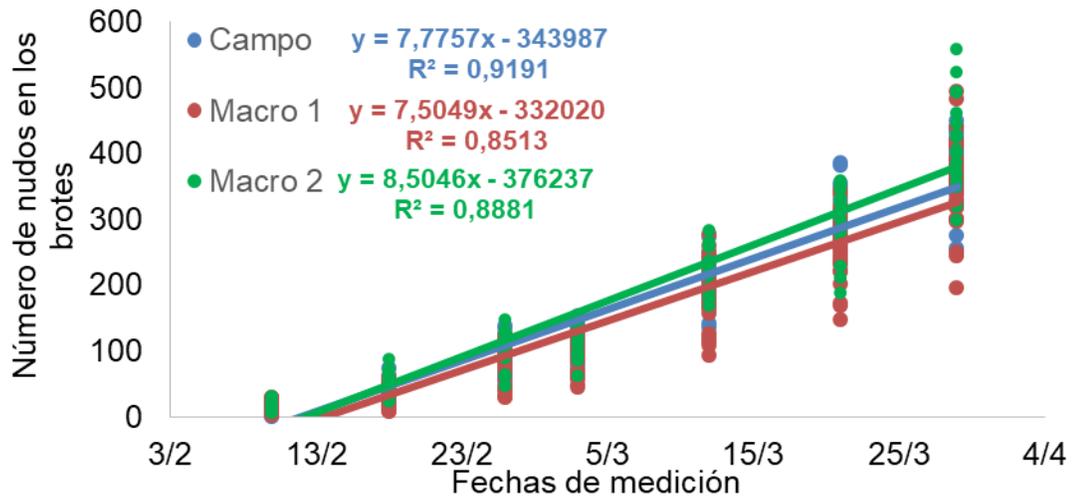


Figura No. 7. Regresión de la variable número de nudos en los brotes y las fechas de medición

Variable altura en función de la fecha: se observa que hay plantas muy chicas y otras muy grandes. En las primeras semanas la probabilidad de encontrar la altura promedio es alta y en las últimas es baja, esto se da porque la confianza es baja (Figura 8). Analizando los intervalos de confianza se observa que el campo 1 se superpone con los dos tratamientos restantes que sí se diferencian entre ellos (Cuadro 14).

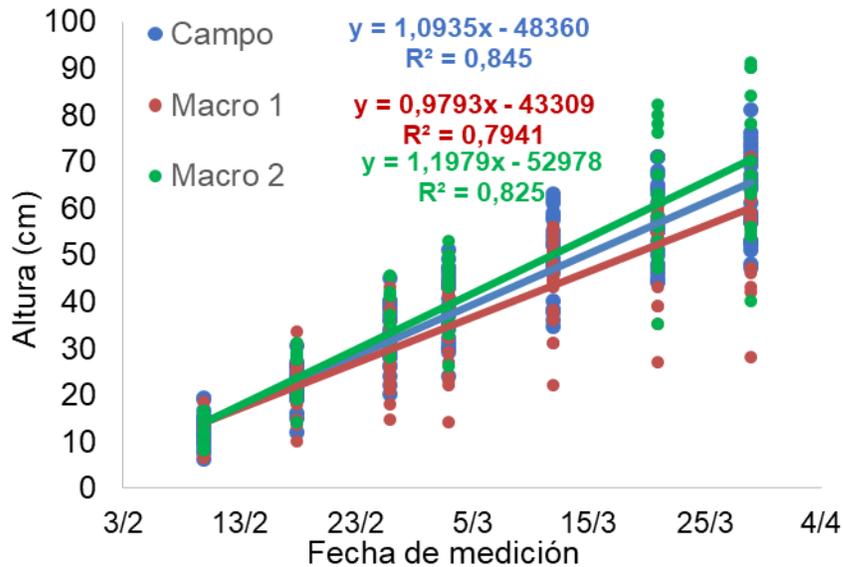


Figura No. 8. Regresión entre la variable altura y las fechas de medición

Número de nudos en tallo principal en función de los días: analizando los intervalos de confianza se observa que el macro 1 se superpone con los demás tratamientos. El macro 2 se diferencia del campo 1 (Cuadro 14).

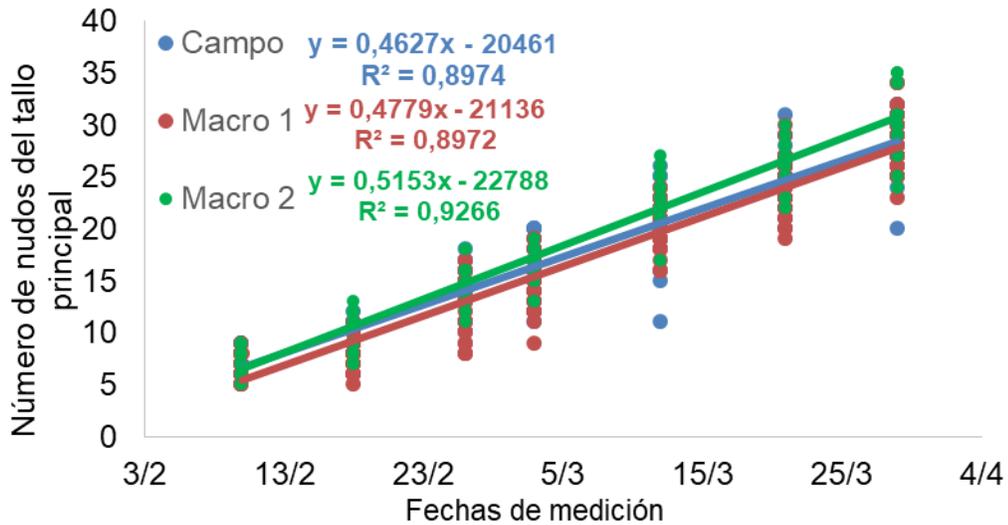


Figura No. 9. Regresión entre la variable número de nudos en el tallo principal y las fechas de medición

Número de nudos en brotes laterales en función del tiempo térmico: no se diferencia ninguna población en lo que respecta a esta variable. El macro 2 es el tratamiento que presenta una mayor distribución (Figura 10, Cuadro 14).

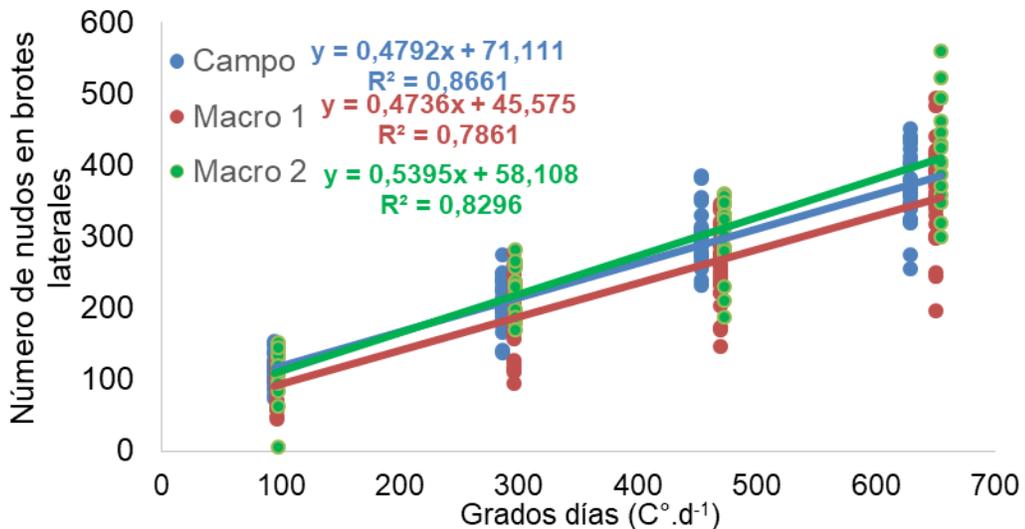


Figura No. 10. Regresión entre la variable número de nudos en los brotes laterales y los grados días

Número de nudos del tallo principal en función del tiempo térmico: analizando los intervalos de confianza no se diferencia ninguna población (Cuadro 14).

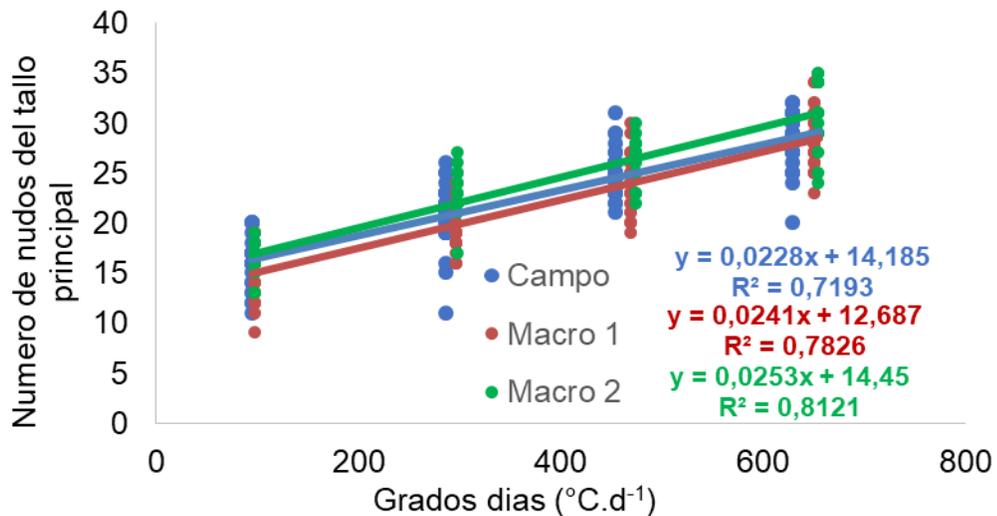


Figura No. 11. Regresión entre la variable número de nudos del tallo principal y los grados días

4.2.6. Componentes principales

Se realizó un estudio de componentes principales de la varianza, el componente 1 y 2 explican el 97% por lo tanto no es necesario incluir el componente 3 (Cuadro 15). Las variables que más explican el componente 1 son: biomasa, índice de cosecha, altura, no. nudos en el tallo principal, no. nudos alternos. Con respecto al componente 2: no. nudos opuestos y peso de flor seca (Cuadro 16).

Observando la gráfica se destaca que la variable más asociada al campo 3 es el índice de cosecha (Figura 12). Por otro lado las plantas con mayor desarrollo vegetativo: mayor altura, mayor cantidad de nudos en el tallo principal y estos del tipo alternos, se asocian al macro 2. El campo 1 es el tratamiento más asociado al peso de flor seca, ya que aquí se obtuvieron los mayores rendimientos. Por otro lado, el macro 1 se encuentra en una situación intermedia entre el campo 3 y el macro 2. En cuanto a los nudos opuestos, estos no se asociaron con ningún tratamiento ni variable en particular.

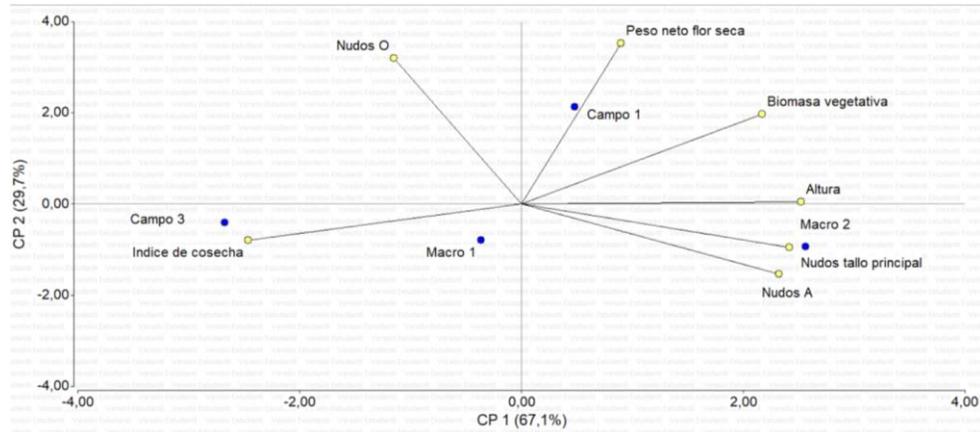


Figura No. 12. Biplot de componentes principales

Cuadro No. 15. Auto valores de componentes principales

Lambda	Valor	Proporción	Prop. acum.
1	4,70	0,67	0,67
2	2,08	0,30	0,97
3	0,22	0,03	1,00
4	0,00	0,00	1,00
5	0,00	0,00	1,00
6	0,00	0,00	1,00
7	0,00	0,00	1,00

Cuadro No. 16. Auto vectores de componentes principales

Variables	e1	e2
No. nudos opuestos	-0,21	0,58
No. nudos alternos	0,42	-0,28
No. nudos totales	0,44	-0,17
Altura	0,46	0,01
Peso neto flor seca	0,16	0,64
Biomasa vegetativa	0,39	0,36
Indice de cosecha	-0,45	-0,14
Correlación cofenética= 0,999		

4.3. TOTAL DE PLANTAS

Si bien no se puede diferenciar el efecto tratamiento del efecto poda se realizó el análisis de intervalos de confianzas para la media (Cuadro 17) y correlaciones (Cuadro 18) para toda la población incluyendo aquellas plantas podadas. Este análisis se debe a la hipótesis de que aquellas plantas que lograron una mayor altura al momento de la poda, eran las de mayor potencial de rendimiento.

4.3.1. Intervalos de confianza

A continuación se presentan los intervalos de confianza para las principales variables considerando el total de la población.

Cuadro No. 17. Intervalos de confianza de las principales variables para el total de plantas

Variables	Campo 1		Campo 3		Macro 1		Macro 2	
	LI (95%)	LS (95%)	LI (95%)	LS (95%)	LI (95%)	LS (95%)	LI (95%)	LS (95%)
Altura antes de poda (cm)	33,6	38,9	sd	sd	31,9	38,0	36,7	43,1
Peso flor seca (kg.pl ⁻¹)	0,18	0,24	0,10	0,16	0,12	0,17	0,16	0,23
Biomasa vegetativa (kg.pl ⁻¹)	0,64	0,85	0,18	0,29	0,34	0,61	0,65	0,93
Índice de cosecha (%)	55,2	60,1	69,1	73,8	55,5	61,8	52,0	57,5

Altura antes de poda: no se diferencian poblaciones entre los 3 tratamientos. El macro 2 es el que presenta valores mayores en ambos límites. Esto explica la proporción similar de plantas podadas en los 3 tratamientos.

Peso neto de flor seca: el campo 1 se diferencia del campo 3. Si bien el macro 2 no se diferencia, presenta ambos límites con valores considerablemente superiores al tratamiento sin luz.

Biomasa vegetativa: los tres tratamientos bajo luz se diferencian del campo 3. Se observa un comportamiento similar entre macro 2 y campo 1, que conforman una misma población con los valores más altos. El macro 1 corresponde a una tercera población intermedia entre el campo 3 y el par de tratamientos campo 1 y macro 2.

Índice de cosecha: el campo 3 presenta valores superiores y se diferencia de los 3 tratamientos bajo efecto de la luz. En estos últimos, el comportamiento para esta variable es muy similar.

4.3.2. Correlaciones

La altura antes de poda correlaciona de manera positiva y considerablemente con el rendimiento y la biomasa vegetativa. No presenta correlación con el índice de cosecha. La biomasa vegetativa presenta una correlación alta y positiva con el rendimiento y alta y negativa con el índice de cosecha.

Cuadro No. 18. Correlaciones entre variables para el total de plantas

Variables	Altura antes de poda	Peso neto flor seca	Biomasa vegetativa	Índice de cosecha
Altura antes de poda	1	0,66	0,58	-0,11
Peso neto flor seca		1	0,80	-0,13
Biomasa vegetativa			1	-0,62
Índice de cosecha				1

En color correlaciones significativas: positivas (rojo); negativas (violeta). Significancia considerando un $p < 0.05$.

5. DISCUSIÓN

5.1. PLANTAS SIN PODAR

5.1.1. Interrupción nocturna y duración de los ciclos

La interrupción nocturna con luz artificial genera en la planta un estímulo correspondiente a condiciones de días largos y por lo tanto se prolonga el periodo vegetativo, tal como fue reportado para cannabis por Whipker et al. (2020). En el presente trabajo la interrupción nocturna, mediante las luces suplementarias, se inició con el cultivo en un ambiente inductivo de floración (fotoperiodo corto) y por lo tanto las plantas respondieron revegetando (promoviendo su desarrollo vegetativo) y enlenteciendo el desarrollo de órganos reproductivos ya inducidos. Este proceso ya fue reportado por Cervantes (2006). El aumento del periodo vegetativo impactó en el largo del ciclo de las plantas en los distintos tratamientos, donde las plantas que estaban bajo interrupción nocturna: tratamientos macro 1, macro 2 y campo 1, tuvieron un ciclo 45 días más largo respecto a las plantas que no tenían influencia de la luz, el tratamiento campo 3, en el que la floración continuó su desarrollo. Este aumento en el largo del ciclo provocó una fecha de cosecha más tardía.

Considerando que la relación R/RL es el factor que incide en la eficiencia de la interrupción nocturna como estrategia para el control de la floración, la misma se midió en los distintos tratamientos. El tratamiento M1 presentó una relación R/RL de 2,1 similar a la del M2 de 1,9. Por el contrario, en el C1 esta relación fue menor, con un valor de 0,37. En los 2 primeros casos la relaciones registradas fueron satisfactorias para el objetivo de acuerdo a lo planteado por Craig y Runkle (2012, 2013) quienes afirman que a partir de un valor de 0,66 de R/RL se estaría en una situación eficiente para el control de floración. En el caso del C1, la relación R/RL es intermedia para lograr interrumpir la noche eficientemente, según los mismos autores. De acuerdo a los resultados, se puede afirmar que la luz artificial para control de floración en ese tratamiento fue eficiente. Sin embargo, se observó a nivel de campo un desarrollo floral mayor en ese tratamiento en comparación a los restantes bajo luz. Esto último está evidenciado por la presencia de flores terminales en el ápice de los brotes laterales de las plantas correspondientes al campo 1 y no en los macro túneles, durante el periodo de mediciones. En este sentido, se observó a nivel de campo que a medida que las plantas se encontraban dispuestas más lejos de los focos de luz presentaban un grado de desarrollo floral mayor. De esta manera, se estableció así un gradiente en la respuesta a la interrupción siendo las plantas del campo 3, las más alejadas de los focos, las de mayor desarrollo reproductivo, ya sin observarse incidencia de la

interrupción nocturna. Este gradiente de respuesta se vio reflejado también en la duración de los ciclos de las plantas, asociado al efecto de la interrupción nocturna, donde las plantas más alejadas de la luz fueron las de menor duración total del ciclo.

Respecto a la posibilidad de un doble ciclo de cultivo en la estación de crecimiento, los rendimientos y la respuesta observada por parte del cultivo asociada a la estrategia de control floral son promisorios. Esto haciendo referencia al segundo ciclo del doble cultivo, correspondiente a fechas de siembra tardías. En cuanto a la realización del primer ciclo, se deben considerar las tecnologías necesarias para que el mismo se lleve a cabo, teniendo en cuenta aspectos vinculados al desarrollo y fenología del cultivo.

5.1.2. VARIABLES ANALIZADAS

El aumento del periodo vegetativo determinó diferencias entre los tratamientos con y sin influencia de la luz, en variables asociadas al desarrollo vegetativo y reproductivo de las plantas.

Las plantas bajo efecto de la luz suplementaria tuvieron una tendencia a presentar una mayor **altura** en comparación con las plantas sin luz durante la noche. Esta respuesta a la interrupción del día corto durante el mes de febrero es similar a lo reportado por Whipker et al. (2020). De acuerdo a estos autores, plantas bajo interrupción nocturna presentan mayor altura (48,4 cm) en comparación con aquellas que se desarrollan en condiciones de día corto (30,5 cm). Estos autores afirman que la interrupción de la noche (condiciones de día largo) retiene a la planta en su fase vegetativa prolongando el crecimiento en altura. Esto mismo fue lo sucedido en el presente trabajo donde las plantas más altas se obtuvieron en el macro 2 con un promedio de 64 cm y las plantas más bajas en el campo 3 con un promedio de 51 cm. Estos rangos de alturas son similares a trabajos indoor sembrados a alta densidad con diferentes cultivares (Cervantes 2006, Magagnini et al. 2018) lo que demuestra el bajo desarrollo vegetativo de las plantas en general, sobre todo teniendo en cuenta que la densidad de siembra en el presente trabajo no representaba una limitante para el crecimiento. Se asocia este comportamiento a la fecha de siembra extremadamente tardía. Cuando las siembras son tempranas y los ciclos son más largos (5-6 meses), se registran alturas considerablemente superiores en cultivos a campo de hasta 2,60 m (Yoshimatsu et al., 2004).

Las plantas más altas a su vez son las que presentan mayor **biomasa vegetativa**. Ambas variables están asociadas y presentan un comportamiento similar en los diferentes análisis estadísticos abordados. Los tratamientos del presente trabajo se agrupan en 3 poblaciones para esta variable. Los valores

del macro 2 (620 g.pl^{-1}) y campo 1 (660 g.pl^{-1}) son superiores a los registrados por Garcia-Tejero et al. (2014) para condiciones de campo (448 g.pl^{-1}) y densidad de siembra similar (1 pl.m^{-2}). Los del campo 3 son inferiores (250 g.pl^{-1}). A su vez, el macro 1 también presenta valores inferiores (360 g.pl^{-1}) a los de dicho trabajo. Si bien el macro 1 arroja mayores valores respecto al campo 3, se observa que su performance fue considerablemente menor en comparación con los dos tratamientos bajo luz restantes. El mayor rendimiento en biomasa en aquellas plantas con interrupción nocturna fue reportado previamente en cannabis por Whipker et al. (2020) quienes registraron valores de 69 y 33 g.pl^{-1} aproximadamente para plantas con interrupción nocturna y aquellas desarrolladas en condiciones inductivas (día corto), respectivamente. Este trabajo contó con un ciclo total del cultivo de 2 meses en promedio. García-Tejero et al. (2020) con densidades de siembra similares y menores, de 0,97, 0,73 y $0,58 \text{ pl.m}^{-2}$, registraron en condiciones de macro túnel valores promedios de biomasa vegetativa para dos variedades de 1,06, 0,91 y $1,2 \text{ kg.pl}^{-1}$ respectivamente, siendo estos superiores a los del presente trabajo. Dicho trabajo en comparación con el presente, se llevó a cabo con el cultivo instalado en fechas tempranas lo que permitió el crecimiento de las plantas en condiciones ambientales (temperatura y radiación) favorables resultando en mayor biomasa vegetativa producida. En condiciones indoor los valores registrados fueron considerablemente menores para esta variable. Magagnini et al. (2018) reportan valores máximos de 135 g.pl^{-1} asumiendo que perdieron 2/3 de su peso en el proceso de secado (Scholten, citado por Legget, 2006).

Los **rendimientos** (peso seco) individuales de cada planta en el presente trabajo expresados en kg.pl^{-1} son similares entre tratamientos con valores mínimos y máximos de 0,13 y 0,17, respectivamente. Los mismos son similares a los registrados en condiciones de campo por Garcia-Tejero et al. (2014) de 0,15, 0,12, $0,09 \text{ kg.pl}^{-1}$ para densidades de 1, 2 y 4 pl.m^{-2} , respectivamente. En un trabajo posterior, se registraron rendimientos también superiores a los del presente trabajo de 0,20 y $0,24 \text{ kg.pl}^{-1}$ en condiciones de macro túnel con densidades de 0,97 y $0,58 \text{ pl.m}^{-2}$, respectivamente (García-Tejero et al., 2020). Una posible explicación para esta diferencia en rendimiento entre los trabajos es que ambos contaron con cultivos instalados en fechas tempranas (mayo-junio, hemisferio Norte) lo que lleva a rendimientos potenciales mayores. A su vez, en el presente trabajo no se toman en cuenta las plantas podadas siendo estas las de mayor altura previo a la poda y por lo tanto las de mayor potencial como se observa en las correlaciones. No se incluyen en este análisis ya que no es posible diferenciar el efecto poda del efecto tratamiento. Comparados con cultivos en condiciones indoor, donde se utilizan densidades de siembra altas (10 a 20 pl.m^{-2}), se registran rendimientos aproximados de 0,020 a $0,030 \text{ kg.pl}^{-1}$ (Magagnini et al., 2018) siendo estos inferiores a los del presente trabajo. Sin embargo, cuando se considera el

rendimiento por superficie hay registros de rendimientos superiores que van desde 250 a 500 g.m⁻² (Small, 2016a).

Para la variable **índice de cosecha** se identifican dos poblaciones. Los tratamientos campo 1, macro 1 y macro 2 presentaron un promedio de 57%. Estos valores son superiores a los reportados por García-Tejero et al. (2014) en condiciones de campo, y García-Tejero et al. (2020) en macrotúnel. A su vez son similares a los de Magagnini et al. (2018) en condiciones indoor. El campo 3, que se diferencia de los demás tratamientos presenta un valor promedio de 71%, no encontrándose bibliografía que presente un valor similar para esta variable. Era fácilmente observable esta diferencia en el índice de cosecha a nivel de campo, siendo las plantas del campo 3 unas plantas pequeñas con inflorescencias grandes y bien desarrolladas. Lo contrario ocurrió en las plantas de los tratamientos con luz. Debe tenerse en cuenta que la madurez floral de estos tratamientos se vio afectada por condiciones ambientales poco favorables e interrumpida finalmente por la cosecha. Esto provocó que las inflorescencias cosechadas fueran inmaduras y de bajo calibre en comparación con el campo 3.

5.1.3. Variables integradas

La interrupción nocturna provoca una mayor duración del periodo vegetativo y por lo tanto del largo del ciclo total. Esto determinó que en los tratamientos bajo luz ese periodo corresponda a la mitad del ciclo total de la planta. Esta mayor duración permitió a las plantas un mayor desarrollo en altura y en número de brotes laterales resultando en una producción total de biomasa mayor, respecto a las plantas sin influencia de luz, en las que además de presentar un menor largo del ciclo, gran parte de este corresponde al desarrollo reproductivo. La biomasa vegetativa producida presenta una correlación alta y positiva con el rendimiento de flor, es decir, las plantas más pesadas fueron las que más rindieron. Si bien no se observan grandes diferencias en el rendimiento entre los tratamientos, se debe tener en cuenta que las plantas con luz no tuvieron tiempo suficiente para completar el desarrollo de las flores debido a que en ese punto las condiciones ambientales eran desfavorables para el cultivo (bajas temperaturas y alta humedad relativa). La falta de madurez en las inflorescencias se refleja en el % de CBD obtenido, el cual es máximo cuando al menos el 75% de los estigmas cambian su coloración de blanco a marrón/anaranjado y por lo tanto representa que se está en el momento óptimo de cosecha (Small, 2016a). En las condiciones con luz se observan menores valores respecto al campo 3 (Cuadro 19). A su vez, el calibre de las inflorescencias de algunas plantas bajo efecto de la luz fue considerablemente menor respecto al campo 3. Esto determinó que fueran rechazadas en el mercado de acuerdo a la empresa.

Cuadro No. 19. Contenido de CBD y THC de las plantas cosechadas en las distintas condiciones

Condición	CBD (%)	THC (%)
Con influencia de luz	9,22	0,38
Sin influencia de luz	11,5	0,51

Si bien las plantas del campo 3 fueron cosechadas en el momento óptimo teniendo en cuenta la madurez floral, el rendimiento fue relativamente bajo comparado con cultivos sembrados en fechas normales. Esto se puede deber al bajo desarrollo de órganos vegetativos encargados de la producción de fotoasimilados necesarios para el crecimiento de las inflorescencias.

5.1.4. Densidad y fecha de siembra

La densidad de siembra (1 pl.m⁻² de cantero) es la que habitualmente se utiliza en la producción nacional para fechas de siembra óptimas.¹ Sin embargo, la fecha de siembra del cultivo fue excesivamente tardía condicionando el desempeño del cultivo y por lo tanto el rendimiento potencial al encontrarse al final del periodo óptimo de condiciones ambientales (temperatura y radiación) para el crecimiento vegetal y en condiciones inductivas para el desarrollo reproductivo. Esto provocó un menor desarrollo vegetativo en comparación con fechas de siembra óptima, resultando en un menor IAF y por lo tanto en una baja eficiencia de intercepción de la radiación. Ante esta situación es recomendable aumentar la densidad de siembra con el objetivo de aumentar el área de intercepción de la radiación. Distintos autores registran densidades de plantación superiores a las del presente trabajo (Legget 2006, García-Tejero et al. 2014, Magagnini et al. 2018). Este factor de manejo tiene un gran impacto en el rendimiento final expresado tanto por planta como por superficie (DEA 1992, BOOM, citado por Potter y Duncombe 2012). Se observa que a densidades bajas la planta compensa al aumentar el rendimiento individual (DEA, 1992). Sin embargo, esto puede no ser suficiente para alcanzar el rendimiento potencial del cultivo por unidad de superficie. Por el contrario, densidades de siembra elevadas provocan una producción de flores muy baja por planta no permitiendo alcanzar el rendimiento potencial.

5.2. TOTAL DE PLANTAS

Tomando en consideración las plantas que fueron podadas, el rendimiento de los tratamientos bajo influencia de la luz es mayor al campo 3. Esto se debe a que el criterio de poda fue la altura de la planta siendo esta una variable que correlaciona positivamente (0.66, Cuadro 18) con el rendimiento. A su vez, considerando el total de plantas se observa una importante correlación

entre la altura antes de la poda, y el rendimiento final. Esto puede deberse a la asociación de la variable altura con la biomasa vegetativa, siendo esta última uno de los factores de mayor influencia en el rendimiento final.

6. CONCLUSIONES

6.1. DE LOS RESULTADOS

- La interrupción nocturna aumentó 45 días el periodo vegetativo del cultivar CW2a.
- En siembras de enero, la prolongación del periodo vegetativo registrada no permitió completar el desarrollo de la flor.
- Se verificó una relación inversa entre índice de cosecha y desarrollo vegetativo.
- Las diferencias en rendimiento de flor (kg.pl^{-1}) dependen de que población se analiza. En la población de plantas no podadas no se observaron diferencias entre tratamientos. Considerando el total de plantas se observaron diferencias a favor de los tratamientos con luz.

6.2. OBSERVACIONES AGRONÓMICAS A EVALUAR EN FUTUROS ENSAYOS

- En base a los resultados obtenidos se sugiere evaluar el rendimiento del cultivar CW2a en fechas de siembra tempranas y compararlos con fechas tardías de días corto para evaluar la viabilidad de doble cultivo anual.
- Evaluar la poda como medida de manejo para analizar el rendimiento asociado al momento de siembra.
- Los factores anteriores deberán evaluarse en función de las distintas densidades de siembra.

7. RESUMEN

La ley de regulación y control de cannabis 19.172 del año 2013 dio lugar a la utilización de *Cannabis sativa* L. para distintos fines productivos. La producción de cannabis medicinal e industrial se presenta como la de mayor relevancia en el país. Debido al carácter ilegal de la planta durante décadas existe una deficiencia en la información científica disponible tanto a nivel mundial como nacional. El presente trabajo tiene como objetivo la generación de conocimiento a través de un abordaje exploratorio para la producción de flores en fechas de siembra tardías. Para ello, se analizó el comportamiento de la variedad CW2a en distintas condiciones de producción: a campo sin influencia de luz, a campo bajo luz indirecta, macrotúnel bajo luz indirecta y macrotúnel bajo luz directa. La utilización de la luz suplementaria tuvo como objetivo evaluar su eficiencia como estrategia de interrupción nocturna y determinar su efecto en el comportamiento fenológico del cultivo. La influencia de la luz suplementaria provocó una prolongación del periodo vegetativo y por lo tanto del ciclo total del cultivo. Esto derivó en plantas con mayor desarrollo vegetativo expresado en las variables altura y peso de biomasa. Asociado a esta respuesta, las plantas bajo luz presentaron en general mayor producción de flores a pesar de que las condiciones ambientales para la maduración de las mismas hayan sido limitantes. También se registra un posible efecto de la poda apical en las principales variables vinculadas al rendimiento final obtenido. Los resultados registrados son promisorios para la implementación de más de un ciclo de cultivo por año.

Palabras clave: *Cannabis sativa*; Cannabis medicinal; Cáñamo; Luz suplementaria; Macrotúnel; Interrupción nocturna.

8. SUMMARY

Cannabis regulation and control law 19.172 of 2013 led to the use of *Cannabis sativa* for different productive purposes. The production of medicinal and industrial cannabis arises as the most relevant in the country. Due to the plant being illegal for decades, there is a deficiency in scientific information available both globally and nationally. The present work aims to generate knowledge through an exploratory approach for the production of flowers in late planting dates. For this, the behavior of the CW2a variety was analyzed in different production conditions: outdoors without light influence, outdoors under indirect light, macro-tunnel under indirect light and macro-tunnel under direct light. The objective of using supplementary light was to evaluate its efficiency as a night-time interruption strategy and to determine its effect on the phenological behavior of the crop. The influence of the supplementary light caused a prolongation of the vegetative period and therefore of the total cycle of the crop. This resulted in plants with higher vegetative development expressed in variables such as height and biomass weight. Associated with this response, plants under light influence presented higher flower production in general despite the fact that environmental conditions limited their maturation. A possible effect of apical pruning is also recorded on the main variables related yield determination. The results recorded are promising for the implementation of more than one crop cycle per year.

Keywords: *Cannabis sativa*; Medical cannabis; Hemp; Supplementary light; Macro-tunnel; Night interruption.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. Aizpurua-Olaizola, O.; Soydaner, U.; Öztürk, E.; Schibano, D.; Simsir, Y.; Navarro, P.; Etxebarria, N.; Usobiaga, A. 2016. Evolution of the cannabinoid and terpene content during the growth of *Cannabis sativa* plants from different chemotypes. *Journal of Natural Products*. 79(2):324-331.
2. Amaducci, S.; Colauzzi, M.; Bellocchi, G.; Venturi, G. 2008. Modelling post-emergent hemp phenology (*Cannabis sativa* L.): theory and evaluation. (en línea). *European Journal of Agronomy*. 28(2):90-102. Consultado 15 mar. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.05.006>
3. _____; Scordia, D.; Liu, F. H.; Zhang, Q.; Guo, H.; Testa, G.; Cosentino, S. L. 2015. Key cultivation techniques for hemp in Europe and China. *Industrial Crops and Products*. 68:2-16.
4. Azcón-Bieto, J. A.; Talón, M. 2008. *Fundamentos de fisiología vegetal*. 2^a ed. Madrid, McGraw-Hill Interamericana. 669 p.
5. Ballaré, C. L. 2014. Light regulation of plant defense. *Annual Review of Plant Biology*. 65:335-363.
6. Balzarini, M. G.; González, L.; Tablada, M.; Casanoves, F.; Di Rienzo, J. A.; Robledo, C. W. 2008. *Manual del usuario*. Córdoba, Editorial Brujas. 336 p.
7. Bazzaz, F. A.; Dusek, D.; Seigler, D. S.; Haney, A. W. 1975. Photosynthesis and cannabinoid content of temperate and tropical populations of *Cannabis sativa*. *Biochemical Systematics and Ecology*. 3(1):15-18.
8. Blanchard, M. G.; Runkle, E. S. 2010. Intermittent light from a rotating high-pressure sodium lamp promotes flowering of long-day plants. *HortScience*. 45(2):236-241.
9. Caplan, D.; Dixon, M.; Zheng, Y. 2019. Increasing inflorescence dry weight and cannabinoid content in medical cannabis using controlled drought stress. (en línea). *HortScience*. 54(5):964-969. Consultado 6 abr. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13510-18>.

10. Ceretta, S.; Fassio, A.; Rodríguez, M. 2013. CÁÑAMO (*Cannabis sativa* L.). Montevideo, INIA. 88 p. (Boletín de Divulgación no. 103).
11. Cervantes, J. 2006. Marijuana horticulture: the indoor/outdoor medical grower's bible. s.l., Van Patten. 1020 p.
12. Chandra, S.; Lata, H.; ElSohly, M. A.; Khan, I. A. 2008. Photosynthetic response of *Cannabis sativa* L. to variations in photosynthetic photon flux densities, temperature and CO₂ conditions. (en línea). *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 14(4):299-306. Consultado 6 abr. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s12298-008-0027-x>.
13. _____.; _____.; _____.; _____. 2011a. Photosynthetic response of *Cannabis sativa* L., an important medicinal plant, to elevated levels of CO₂. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 17(3):291-295.
14. _____.; _____.; _____.; _____. 2011b. Temperature response of photosynthesis in different drug and fiber varieties of *Cannabis sativa* L. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 17(3):297-303.
15. _____.; _____.; _____.; _____.; Mehmedic, Z. 2015. Light dependence of photosynthesis and water vapor exchange characteristics in different high Δ^9 -THC yielding varieties of *Cannabis sativa* L. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*. 2(2):39-47.
16. _____.; _____.; _____.2017. *Cannabis sativa* L.: botany and biotechnology. s.l., Springer. 479 p.
17. Clarke, R. C. 1981. Marijuana botany: an advanced study: the propagation and breeding of distinctive cannabis. s.l., Ronin. s.p.
18. _____.; Merlin, M. D. 2013. Cannabis: evolution and ethnobotany. Berkeley, University of California. 452 p.
19. Craig, D. S.; Runkle, E. S. 2012. Using LEDs to quantify the effect of the red to far-red ratio of night-interruption lighting on flowering of photoperiodic crops. *Acta Horticulturae*. no. 956:179-186.

20. _____.;_____. 2013. A moderate to high red to far-red light ratio from light-emitting diodes controls flowering of short-day plants. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 138(3):167-172.
21. Dayanandan, P.; Kaufman, P. B. 1976. Trichomes of *Cannabis sativa* L.(Cannabaceae). *American Journal of Botany*. 63(5):578-591.
22. de Meijer, E. P. M.; Bagatta, M.; Carboni, A.; Crucitti, P.; Moliterni, V. M. C.; Ranalli, P.; Mandolino, G. 2003. The inheritance of chemical phenotype in *Cannabis sativa* L. (en línea). *Genetics*. 163(1):335-346. Consultado 1 mar. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.1093/genetics/163.1.335>.
23. _____.; Hammond, K. M. 2005. The inheritance of chemical phenotype in *Cannabis sativa* L.(II): cannabigerol predominant plants. *Euphytica*. 145(1):189-198.
24. _____.; _____.; Sutton, A. 2009. The inheritance of chemical phenotype in *Cannabis sativa* L.(IV): cannabinoid-free plants. *Euphytica*. 168(1):95-112.
25. DEA (Drug Enforcement Administration, US). 1992. Cannabis yields. Springfield, Virginia. 12 p.
26. Dei Cas, M.; Casagni, E.; Saccardo, A.; Arnoldi, S.; Young, C.; Scotti, S.; Vieira de Manicor, E.; Gambaro, V.; Roda, G. 2020. The italian panorama of cannabis light preparation: determination of cannabinoids by LC-UV. (en línea). *Forensic Science International*. 307:110-113. Consultado 1 mar. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2019.110113>
27. Eichhorn Bilodeau, S.; Wu, B. S.; Ruffykiri, A. S.; MacPherson, S.; Lefsrud, M. 2019. An update on plant photobiology and implications for cannabis production. *Frontiers in Plant Science*. 10:61-75.
28. Flemming, M. P.; Clarke, R. C. 1998. Physical evidence for the antiquity of *Cannabis sativa* L.(cannabaceae). *Journal of the International Hemp Association*. 5:80-92.
29. García-Tejero, I. F.; Duran Zuazo, V. H.; Pérez-Álvarez, R.; Hernández, A.; Casano, S.; Moron, M.; Muriel-Fernández, J. L. 2014. Impact of

plant density and irrigation on yield of hemp (*Cannabis sativa* L.) in a mediterranean semi-arid environment. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 16(4):887-895.

30. _____.; Hernández, A.; Ferreiro-Vera, C.; Zuazo, V. H. D.; García, J. H.; Sánchez-Carnerero, C.; Casano, S. 2020. Yield of new hemp varieties for medical purposes under semi-arid Mediterranean environment conditions. (en línea). *Comunicata Scientiae*. 11:e3264. Consultado 25 may. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.14295/cs.v11i0.3264>.
31. Gupta, S. D.; Agarwal, A. 2017. Artificial lighting system for plant growth and development: chronological advancement, working principles, and comparative assessment. In: Gupta, S. D. ed. *Light Emitting Diodes for Agriculture*. Singapur, Springer. pp. 1-25.
32. Hammond, C. T.; Mahlberg, P. G. 1973. Morphology of glandular hairs of *Cannabis sativa* from scanning electron microscopy. *American Journal of Botany*. 60(6):524-528.
33. Hillig, K. W. 2005. *A systematic investigation of Cannabis*. Bloomington, Indiana, Indiana University. 178 p.
34. IMPO (Dirección Nacional de Impresiones y Publicaciones Oficiales, UY). 2020. *Guía normativa: ley 19.172*. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 15 may. 2021. Disponible en <https://www.impo.com.uy/regulacioncannabis/>
35. INASE (Instituto Nacional de Semillas, UY). 2021. *Registro nacional de cultivares*. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 15 jun. 2021. Disponible en <https://www.inase.uy/EvaluacionRegistro/RNC-RPC.aspx?v=y>
36. Jin, J. J.; Yang, M. Q.; Fritsch, P. W.; van Velzen, R.; Li, D. Z.; Yi, T. S. 2020. Born migrators: historical biogeography of the cosmopolitan family cannabaceae. *Journal of Systematics and Evolution*. 58(4):461-473.
37. Kim, E. S.; Mahlberg, P. G. 1991. Secretory cavity development in glandular trichomes of *Cannabis sativa* L. (cannabaceae). *American Journal of Botany*. 78(2):220-229.

38. de Lamarck, J. B. 1783. Encyclopédie méthodique: botanique. s.l., Chez Panckoucke. s.p.
39. Leggett, T. 2006. Examen de la situación mundial del cannabis. (en línea). Viena, Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito. 169 p. (Boletín de Estupefacientes v. 58, no. 1-2). Consultado 15 mar. 2021. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/revista/6258/A/2006>
40. Leme, F. M.; Schönenberger, J.; Staedler, Y. M.; Teixeira, S. P. 2020. Comparative floral development reveals novel aspects of structure and diversity of flowers in cannabaceae. (en línea). Botanical Journal of the Linnean Society. 193(1):64-83. Consultado 21 feb. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.1093/botlinnean/boaa004>.
41. Li, H. L. 1974. The origin and use of cannabis in eastern Asia linguistic-cultural implications. Economic Botany. 28(3):293-301.
42. Linnaeus, C. 1753. Species plantarum. 3rd. ed. s.l., Impensis GC Nauk. s.p.
43. Lisson, S. N.; Mendham, N. J.; Carberry, P. S. 2000. Development of a hemp (*Cannabis sativa* L.) simulation model 2: The flowering response of two hemp cultivars to photoperiod. Australian Journal of Experimental Agriculture. 40(3):413-417.
44. Livingston, S. J.; Quilichini, T. D.; Booth, J. K.; Wong, D. C.; Rensing, K. H.; Laflamme-Yonkman, J.; Castellarin, S. D.; Bohlmann, J.; Page, J. E.; Samuels, A. L. 2020. Cannabis glandular trichomes alter morphology and metabolite content during flower maturation. The Plant Journal. 101(1):37-56.
45. Lydon, J.; Teramura, A. H.; Coffman, C. B. 1987. UV-B radiation effects on photosynthesis, growth and cannabinoid production of two *Cannabis sativa* chemotypes. Photochemistry and Photobiology. 46(2):201-206.
46. Lynch, R. C.; Vergara, D.; Tittes, S.; White, K.; Schwartz, C. J.; Gibbs, M. J.; Ruthenburg, T. C.; de Cesare, K.; Land, D. P.; Kane, N. C. 2016. Genomic and chemical diversity in cannabis. (en línea). Critical Reviews in Plant Sciences. 35(5-6):349-363. Consultado

11 feb. 2021. Disponible en
<https://doi.org/10.1080/07352689.2016.1265363>.

47. McPartland, J. M.; Guy, G. W. 2017. Models of cannabis taxonomy, cultural bias, and conflicts between scientific and vernacular names. (en línea). *The Botanical Review*. 83(4):327-381. Consultado 15 feb. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s12229-017-9187-0>.
48. _____. 2018. Cannabis systematics at the levels of family, genus, and species. (en línea). *Cannabis and Cannabinoid Research*. 3(1):203-212. Consultado 15 feb. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.1089/can.2018.0039>.
49. Magagnini, G.; Grassi, G.; Kotiranta, S. 2018. The effect of light spectrum on the morphology and cannabinoid content of *Cannabis sativa* L. (en línea). *Medical Cannabis and Cannabinoids*. 1(1):19-27. Consultado 1 abr. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.1159/000489030>.
50. MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, UY). s.f. Cáñamo en Uruguay. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 15 may. 2021. Disponible en https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/noticias/ppt_canamo_en_uruguay_exposicion_cannabis_mariela_ibarra_mgap.pdf
51. Mishchenko, S.; Mokher, J.; Laiko, I.; Burbulis, N.; Kyrychenko, H.; Dudukova, S. 2017. Phenological growth stages of hemp (*Cannabis sativa* L.): codification and description according to the BBCH scale. *Žemės ūkio mokslai*. 24(2):31-36.
52. Nelson, J. A.; Bugbee, B. 2014. Economic analysis of greenhouse lighting: light emitting diodes vs. high intensity discharge fixtures. *PloS ONE*. 9(6):e99010.
53. Pacifico, D.; Miselli, F.; Carboni, A.; Moschella, A.; Mandolino, G. 2008. Time course of cannabinoid accumulation and chemotype development during the growth of *Cannabis sativa* L. (en línea). *Euphytica*. 160(2):231-240. Consultado 5 feb. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s10681-007-9543-y>.

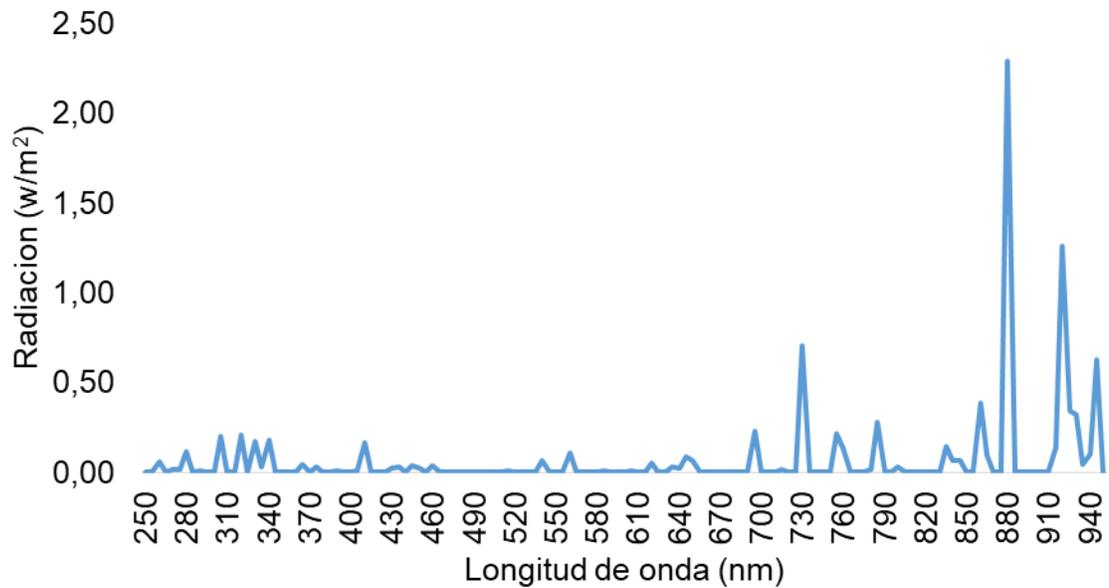
54. Pertwee, R. G. 2014. Handbook of cannabis. Oxford, Oxford University. 781 p.
55. PL (Poder Legislativo, UY). 2013. Ley de regulación y control de cannabis no. 19.172. (en línea). Montevideo, s.e. s.p. Consultado 10 feb. 2021. Disponible en <http://www.impo.com.uy/bases/leyes/19172-2013>
56. Potter, D. J.; Duncombe, P. 2012. The effect of electrical lighting power and irradiance on indoor-grown cannabis potency and yield. *Journal of Forensic Sciences*. 57(3):618-622.
57. _____. 2014. A review of the cultivation and processing of cannabis (*Cannabis sativa* L.) for production of prescription medicines in the UK. *Drug Testing and Analysis*. 6(1-2):31-38.
58. Ramírez, J. M. 2019. La industria del cannabis medicinal en Colombia. (en línea). Bogotá, s.e. 61 p. Consultado 13 abr. 2021. Disponible en <https://www.repository.fedesarrollo.org.co/handle/11445/3823>
59. Richins, R. D.; Rodriguez-Uribe, L.; Lowe, K.; Ferral, R.; O'Connell, M. A. 2018. Accumulation of bioactive metabolites in cultivated medical cannabis. *PLoS ONE*. 13(7):1-20.
60. Rodríguez, N. 2021. Una decena de empresas produce cannabis en el departamento de Colonia. (en línea). *La Diaria*, Montevideo, UY, abr. 2:s.p. Consultado 15 abr. 2021. Disponible en <https://ladiaria.com.uy/colonia/articulo/2021/4/una-decena-de-empresas-produce-cannabis-en-el-departamento-de-colonia/>
61. Salentijn, E. M.; Petit, J.; Trindade, L. M. 2019. The complex interactions between flowering behavior and fiber quality in hemp. *Frontiers in Plant Science*. 10:114-128.
62. Schilling, S.; Dowling, C. A.; Shi, J.; Ryan, L.; Hunt, D.; O'Reilly, E.; Perry, A. S.; Kinnane, O.; McCabe, P. F.; Melzer, R. 2020. The cream of the crop: biology, breeding and applications of *Cannabis sativa*. (en línea). *Authorea Preprints*. Oct. 2020:1- 46. Consultado 1 mar. 2021. Disponible en [10.22541/au.160139712.25104053/v2](https://doi.org/10.22541/au.160139712.25104053/v2)

63. Shinomura, T.; Uchida, K.; Furuya, M. 2000. Elementary processes of photoperception by phytochrome A for high-irradiance response of hypocotyl elongation in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*. 122(1):147-156.
64. Singh, I. D.; Stoskopf, N. C. 1971. Harvest index in cereals 1. *Agronomy Journal*. 63(2):224-226.
65. Small, E.; Beckstead, H. D. 1973. Cannabinoid phenotypes in *Cannabis sativa*. *Nature*. 245(5421):147-148.
66. _____; Cronquist, A. 1976. A practical and natural taxonomy for cannabis. *Taxon*. 25(4):405-435.
67. _____. 2016a. Cannabis: a complete guide. Boca Raton, FL, CRC. 504 p.
68. _____.; Naraine, S. G. 2016b. Size matters: evolution of large drug-secreting resin glands in elite pharmaceutical strains of *Cannabis sativa* (marijuana). *Genetic Resources and Crop Evolution*. 63(2):349-359.
69. Spitzer-Rimon, B.; Duchin, S.; Bernstein, N.; Kamenetsky, R. 2019. Architecture and florogenesis in female *Cannabis sativa* plants. (en línea). *Frontiers in Plant Science*. 10(350):76-86. Consultado 22 feb. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00350>
70. Taiz, L.; Zeiger, E.; Møller, I. M.; Murphy, A. 2015. Plant physiology and development. (en línea). 6th. ed. Santa Cruz, California, Sinauer. 761 p. Consultado 24 may. 2021. Disponible en <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20173165866>
71. Tang, K. 2018. Agronomy and photosynthesis physiology of hemp (*Cannabis sativa* L.). (en línea). Wageningen, Wageningen University. 186 p. Consultado 17 abr. 2020. Disponible en <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/535717>
72. Toth, J. A.; Stack, G. M.; Cala, A. R.; Carlson, C. H.; Wilk, R. L.; Crawford, J. L.; Viands, D. R.; Philippe, G.; Smart, C. D.; Rose, J. K. C.; Smart, L. B. 2020. Development and validation of genetic markers for sex and cannabinoid chemotype in *Cannabis sativa* L. (en línea). *GCB Bioenergy*. 12(3):213-222. Consultado 15 mar. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.1111/gcbb.12667>

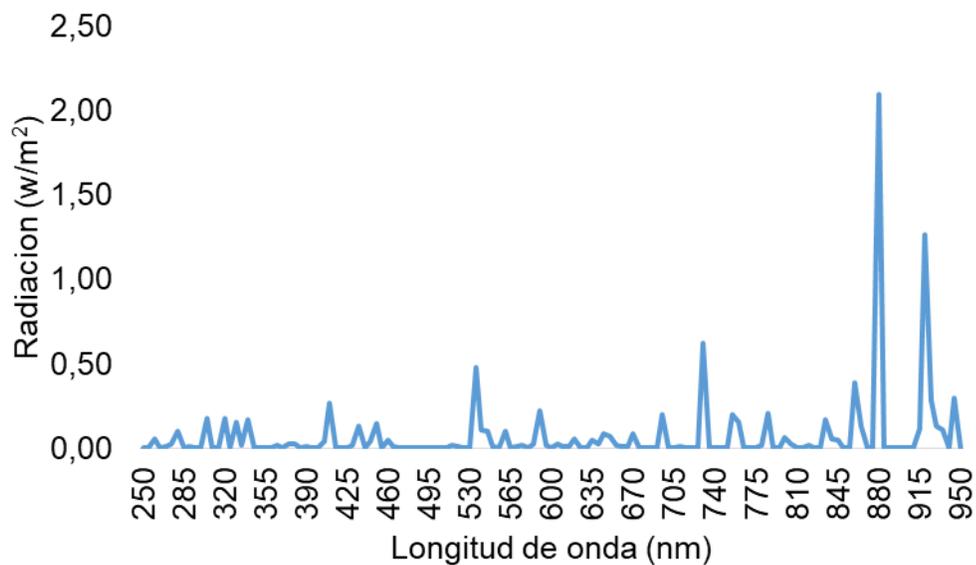
73. Turner, J. C.; Hemphill, J. K.; Mahlberg, P. G. 1978. Quantitative determination of cannabinoids in individual glandular trichomes of *Cannabis Sativa* L. (cannabaceae). (en línea). American Journal of Botany. 65(10):1103-1106. Consultado 25 feb. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1978.tb06177.x>.
74. Uruguay XXI. 2020. Cannabis: oportunidades de inversión. (en línea) Montevideo. 32 p. Consultado 3 mar. 2021. Disponible en <https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/37fbeded8d4e83cb31bf340aee41d1958ee6e3f9.pdf>
75. Whipker, B. E.; Cockson, P.; Smith, J. T. 2020. Night interruption lighting equally effective as daylength extension in retaining the vegetative state of cannabis mother plants. Crop, Forage & Turfgrass Management. 6(1):e20001.
76. Yang, M. Q.; van Velzen, R.; Bakker, F. T.; Sattarian, A.; Li, D. Z.; Yi, T. S. 2013. Molecular phylogenetics and character evolution of cannabaceae. Taxon. 62(3):473-485.
77. Yoshimatsu, K.; Iida, O.; Kitazawa, T.; Sekine, T.; Kojoma, M.; Makino, Y.; Kiuchi, F. 2004. Growth characteristics of *Cannabis sativa* L. cultivated in a phytotron and in the field. Bulletin on Natural Instruction of Health Science. 122:16-20.

10. ANEXOS

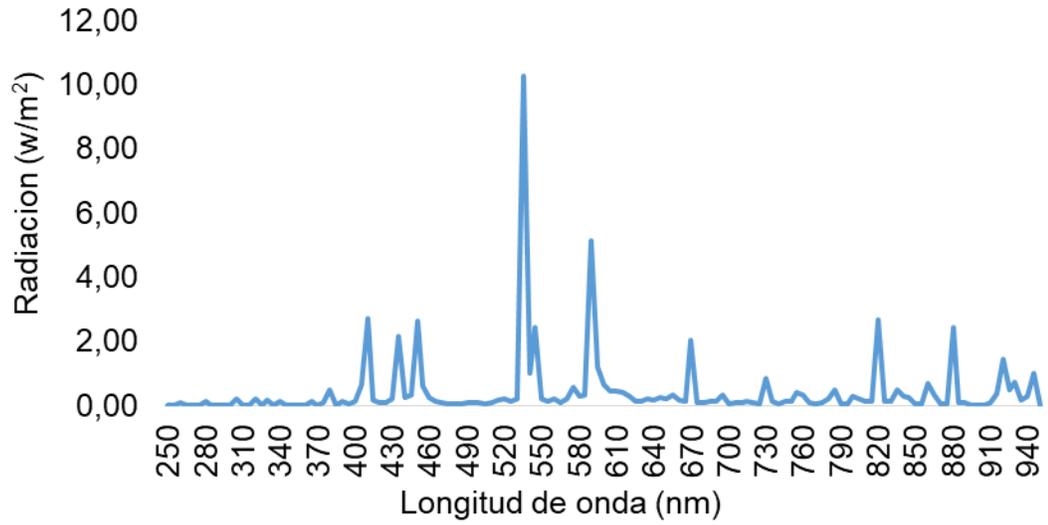
Anexo No. 1. Promedio de radiación de acuerdo a la longitud de onda para el campo 1



Anexo No. 2. Promedio de radiación de acuerdo a la longitud de onda para el campo 3



Anexo No. 3. Promedio de radiación de acuerdo a la longitud de onda para el macro 2



Anexo No. 4. Promedio de radiación de acuerdo a la longitud de onda para el macro 1

