

Universidad Autónoma del Estado de
México

Maestría en Ciencias Agropecuarias y Recursos
Naturales

**COMPONENTES FISIOLÓGICOS Y NUMÉRICOS DEL
RENDIMIENTO EN CANOLA AFECTADOS POR LA
DENSIDAD Y SISTEMA DE SIEMBRA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS
NATURALES

P R E S E N T A:

IAF GUSTAVO GARCÍA HERNÁNDEZ

Campus Universitario “El Cerrillo” Toluca, Estado de México. Junio de 2021.

Universidad Autónoma del Estado de
México

Maestría en Ciencias Agropecuarias y Recursos
Naturales

**COMPONENTES FISIOLÓGICOS Y NUMÉRICOS DEL
RENDIMIENTO EN CANOLA AFECTADOS POR LA
DENSIDAD Y SISTEMA DE SIEMBRA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS
NATURALES

P R E S E N T A:

IAF GUSTAVO GARCÍA HERNÁNDEZ

Comité de Tutores:

DR. GASPAR ESTRADA CAMPUZANO (Tutor Académico)

Dr. CARLOS GUSTAVO MARTÍNEZ RUEDA (Tutor Adjunto)

Dr. AURELIO DOMÍNGUEZ LÓPEZ (Tutor Adjunto)

Campus Universitario “El Cerrillo” Toluca, Estado de México. Junio de 2021.

CONTENIDO

RESUMEN.....	5
ABSTRACT	7
I.INTRODUCCIÓN	9
1.1. Origen del cultivo de canola	9
1.2. Morfología de la planta de canola	9
1.3. Ontogenia del cultivo de canola	10
1.4. Importancia del cultivo de canola	12
II. ANTECEDENTES	15
2.1. Rendimiento de semilla y sus principales componentes.....	15
2.1.1. Rendimiento de semilla e índice de cosecha	15
2.1.2. Rendimiento de semilla y producción de biomasa	16
2.2. Cambios que ocurren al modificar la densidad de plantas	17
2.3. Índices de crecimiento.....	19
2.3.1. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC)	19
2.3.2. Tasa de crecimiento relativo (TCR).....	19
2.3.3. Índice de área foliar (IAF).....	19
2.3.4. Tasa de asimilación neta (TAN)	20
2.3.5. Duración de área foliar (DAF)	20
2.4. Densidad de plantas y su efecto sobre el rendimiento.....	20
2.4.1. Densidad de plantas	21
2.4.2. Densidad de plantas y separación entre hileras.....	22
2.4.3. Densidad de plantas, distancia entre hileras y fertilización	24
2.5. Densidad de plantas y su efecto sobre la producción de biomasa	25
III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	27
3.1. Justificación	28
3.2. Hipótesis	29
3.3. Objetivos	29
3.3.1. General	29
3.3.2. Específicos.....	30
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	30

V. RESULTADOS	30
VI. CONCLUSIONES GENERALES	31
VII. BIBLIOGRAFÍA	32

RESUMEN

El cultivo de canola (*Brassica napus* L.) se inició alrededor de 1930. La variedad llamada L.E.A.R (Low Erucic Acid Rapeseed) Canola (Canadian Oil Low Acid) de bajo contenido de ácido erúxico 2% se logró en 1978.

La canola es una planta herbácea del género *Brassica* que presenta un tallo de porte erecto, de altura variable, entre los 0,9 m a los 2 m y su raíz es pivotante. El fruto es una silicua de 3 a 4 mm de ancho y 6 cm de largo con 15 a 40 semillas. Sus hojas son ásperas, color verde azulado y las flores se encuentran dispuestas en una inflorescencia racimosa. En el ciclo ontogénico del cultivo de canola se distinguen tres etapas: Crecimiento vegetativo, reproducción y llenado de grano.

La canola es una oleaginosa de gran importancia mundial por la excelente calidad de su aceite y su alto contenido de grasas esenciales. En México su cultivo se inició en el año 2000 y actualmente se encuentra dentro de los países donde se obtienen los rendimientos más bajos.

En el presente trabajo se evaluaron los componentes fisiológicos y numéricos del rendimiento en canola afectados por la densidad y sistema de siembra. La producción de biomasa se evaluó en primer lugar a través de sus componentes fisiológicos (radiación interceptada y eficiencia en el uso de la radiación) y en segundo lugar a través de los índices de crecimiento durante el periodo crítico del cultivo (tasa de crecimiento del cultivo (TCC), tasa de asimilación neta (TAN), tasa relativa de crecimiento (TCR) y duración del área foliar (DAF).

El mayor rendimiento de semilla (4.9 t ha^{-1}) se observó con el (SCP) sistema de cama plana (hileras separadas a 30cm), el genotipo Bioaureo 2486 y una densidad de 90 plantas por m^2 (D90). Para el (SCDH) sistema de cama doble hilera (hileras separadas a 20cm) los incrementos en el rendimiento de semilla fueron de 22 y 20% al pasar de 50 a 90 plantas por m^2 en Bioaureo 2486 y Hyola 61,

respectivamente. Para el (SCP) los incrementos en el rendimiento de semilla fueron de 23 y 28% al pasar de 50 a 90 plantas por m² para Bioaureo 2486 y Hyola 61, respectivamente. El número de silicuas por m² y el número de semillas por m² fueron los componentes que explicaron en mayor medida el rendimiento de semilla. Sin embargo, el aumento en la densidad de plantas disminuyó el número de ramas a nivel individual.

Para el (SCP) la producción de biomasa se incrementó 20%, respecto al (SCDH). La producción de biomasa se correlacionó de forma positiva con el número de semillas por m², con el peso de 1000 semillas y con el número de silicuas por m², mientras con que el índice de cosecha se observó una asociación negativa. Para el (SCP) el incremento en la producción de biomasa se explicó por la radiación interceptada acumulada, mientras que la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) explicó los cambios en la producción de biomasa para ambos sistemas de siembra. El (SCP) y la densidad de 90 plantas por m² mostraron el mayor índice de área foliar (IAF) a través de una mayor radiación interceptada a los 85 días después de la emergencia dicho periodo corresponde a la etapa de botón floral visible. Para el (SCDH) la máxima expresión de la (TAN) se logró con una densidad de 75 plantas por m² (D75). Los índices de (TCC) (TRC) y (TAN) se afectaron negativamente conforme la densidad de plantas se incrementó. El índice (DAF) se afectó positivamente con el incremento en la densidad de plantas. Para ambos genotipos la máxima expresión en los índices de (TCC) (TRC) y (TAN) se logró con una densidad de 75 plantas por m². En términos de componentes fisiológicos, el rendimiento de semilla fue explicado por cambios en la producción de biomasa a madurez y no por el índice de cosecha. El índice de área foliar (IAF) se modificó de acuerdo al arreglo espacial con una tendencia a incrementar los valores conforme la densidad de plantas se incrementó.

Palabras clave: *Brassica napus* L., rendimiento, biomasa.

ABSTRACT

Canola (*Brassica napus* L.) crop started around 1930. The variety called L.E.A.R (Low Erucic Acid Rapeseed) Canola (Canadian Oil Low Acid) with low erucic acid content 2% was achieved in 1978.

Canola is a herbaceous plant of the genus Brassica that has an erect stem, variable height, between 0.9 m to 2 m and its root is pivoting. The fruit is a silique 3 to 4 mm wide and 6 cm long with 15 to 40 seeds. Its leaves are rough, bluish-green in color and the flowers are arranged in a racemose inflorescence. In the ontogenic cycle of canola cultivation, three stages are distinguished: vegetative growth, reproduction and grain filling.

Canola is an oilseed of great global importance due to the excellent quality of its oil and its high content of essential fats. In México its cultivation began in 2000 and is currently within the countries where the lowest yields are obtained.

In this work, the physiological and numerical components of canola yield affected by density and planting system were evaluated. Biomass production was evaluated firstly through its physiological components (intercepted radiation and efficiency in the use of radiation) and secondly through the growth rates during the critical period of the crop (growth rate of the crop (TCC), net assimilation rate (TAN), relative growth rate (TCR) and duration of leaf area (DAF).

The highest seed yield (4.9 t ha⁻¹) was observed with the (SCP) flat bed system (rows 30 cm apart), the Bioaureo 2486 genotype and a density of 90 plants per m² (D90). For the (SCDH) double row bed system (rows 20cm apart) the increases in seed yield were 22 and 20% when going from 50 to 90 plants per m² in Bioaureo 2486 and Hyola 61, respectively. For the (SCP)

the increases in seed yield were 23 and 28% when going from 50 to 90 plants per m² for Bioaureo 2486 and Hyola 61, respectively. The number of siliques per m² and the number of seeds per m² were the components that explained the seed yield to a greater extent. However, the increase in plant density decreased the number of branches at the individual level.

For the (SCP) the biomass production increased 20%, with respect to the (SCDH). Biomass production was positively correlated with the number of seeds per m², with the weight of 1000 seeds and with the number of siliques per m², while a negative association was observed with the harvest index. For the (SCP) the increase in biomass production was explained by accumulated intercepted radiation, while the efficiency in the use of radiation (EUR) explained the changes in biomass production for both planting systems. The (SCP) and the density of 90 plants per m² showed the highest leaf area index (IAF) through a higher intercepted radiation at 85 days after emergence, said period corresponds to the visible flower bud stage. For the (SCDH) the maximum expression of the (TAN) was achieved with a density of 75 plants per m² (D75). The (TCC) (TRC) and (TAN) indices were negatively affected as plant density increased. The index (DAF) was positively affected with the increase in plant density. For both genotypes, the maximum expression in the (TCC) (TRC) and (TAN) indices was achieved with a density of 75 plants per m². In terms of physiological components, seed yield was explained by changes in biomass production at maturity and not by harvest index. The leaf area index (IAF) was modified according to the spatial arrangement with a tendency to increase the values as the plant density increased.

Key words: *Brassica napus* L., yield, biomass.

I.INTRODUCCIÓN

1.1. Origen del cultivo de canola

El cultivo de canola (*Brassica napus* L.) tiene su origen alrededor de 1930, los primeros cultivares silvestres que se utilizaron contenían altos niveles de ácido erúxico y glucosinolatos entre ellos (*Brassica napus* L.) y (*Brassica campestris* L.) (Gómez *et al.*, 2018). En la segunda guerra mundial, la producción de canola proveniente de Canadá vivió un auge al destinarse como lubricante de barcos norteamericanos, sin embargo, dicha producción fue en decadencia al final de la guerra (Gifford., 2017).

En 1978 los cultivares silvestres de canola se modificaron obteniendo una variedad llamada L.E.A.R (Low Eurcic Acid Rapeseed) Canola (Canadian Oil Low Acid) que contenía menos del 2% de ácido erúxico, y menos de 30 micromoles de glucosinolatos, de esta manera se inició la producción de canola a nivel mundial (García *et al.*, 2013).

1.2. Morfología de la planta de canola

La canola (*Brassica napus* L.) es una planta herbácea anual de la familia de las crucíferas el género *Brassica* pertenece a dicha familia y engloba a otras especies cultivadas tanto para usos hortícolas como forrajeros, por ejemplo: mostazas, coles, coliflores, brócolis y nabos.

La canola presenta un tallo de porte erecto, de altura variable, entre los 0,9 m de las variedades de menor porte, a los 2 m de las variedades de porte alto. La raíz es pivotante, profundizando a niveles considerables y sus raíces secundarias ramifican fácilmente (Syngenta, 2018). El fruto es una silicua (en forma de vaina) de 3 a 4 mm de ancho y aproximadamente 6 cm de largo que alberga de 15 a 40 semillas de forma esférica. (Planeación Agrícola Nacional, 2017-2030). Las silicuas maduras presentan dehiscencia, abriéndose las suturas con golpes o al secarse con el sol, cayendo las semillas al suelo (Syngenta, 2018). Sus hojas son ásperas, color verde azulado las inferiores son dentadas y más grandes que las superiores. Las flores son de color amarillo y se encuentran dispuestas en una inflorescencia racimosa (Planeación Agrícola Nacional, 2017-2030).

1.3. Ontogenia del cultivo de canola

Crecimiento vegetativo: En esta etapa inicia la aparición y expansión de hojas. Al emerger, de 4 a 15 días después de la siembra, la plántula desarrolla un tallo corto de 1,25 a 2,50 cm. Los cotiledones en la parte superior del hipocótilo (punto de crecimiento) se expanden, se vuelven verdes y proporcionan alimento a la planta en crecimiento (Canola Council, 2020). El plastocrono tiene una duración promedio de $30\text{ }^{\circ}\text{Cd.hoja}^{-1}$, con un rango entre 23 y $38\text{ }^{\circ}\text{Cd.hoja}^{-1}$. Por lo que la planta adquiere la apariencia de roseta expandiendo las hojas iniciales. Durante esta etapa de roseta las hojas son pecioladas y tienen un filocrono promedio de $48\text{ }^{\circ}\text{Cd.hoja}^{-1}$, con un rango entre 62 y $84\text{ }^{\circ}\text{Cd.hoja}^{-1}$. (Gómez y Miralles, 2006).

Reproducción: En esta etapa el tallo inicia su elongación con el ápice el botón floral encerrado entre un conjunto de hojas al tiempo que las hojas continúan expandiéndose. Posteriormente cuando el botón floral comienza a separarse las hojas disminuyen su tasa de aparición mostrando

valores de filocronos i.e. entre 24 y 32 °Cd.hoja⁻¹, además de cambios morfológicos en el peciolo (Gómez y Miralles, 2006). Las ramas secundarias surgen de las yemas que se desarrollan en las axilas de las hojas superiores y ocasionalmente de las axilas de algunas hojas inferiores en el tallo principal. Estas ramas secundarias desarrollan de 1 a 4 hojas y un grupo de botones florales. (Canola Council, 2020). La apertura del botón floral principal marca el inicio de la floración abriendo de 4 a 5 flores por día en orden ascendente (Gómez y Miralles, 2006). La floración de la primera rama secundaria comienza 2 o 3 días después de que se abre la primera flor en el tallo principal (Canola Council, 2020).

Durante esta etapa las ramas secundarias continúan elongándose, mientras los botones florales tanto del tallo como de las ramas secundarias se transforman en flores y éstas en silicuas. En la parte media de la floración las primeras silicuas comienzan a elongarse al tiempo que el tallo se convierte en la principal fuente de nutrientes para el crecimiento de la planta, debido al déficit de fotoasimilados que provoca la caída de las hojas. (Gómez y Miralles, 2006). Kirkegaard *et al.* (2018) identificaron el periodo crítico para el cultivo de canola y este se ubica a partir de 100 °Cd después de BBCH60 y continúa hasta 500 °Cd después de BBCH60 (este periodo comprende desde el 50% de plantas con una flor abierta en el tallo principal es decir el inicio de la floración el comienzo de crecimiento de las silicuas). Durante este periodo se establece el número final de silicuas, el número potencial de semillas por unidad de superficie. Sin embargo, estos componentes se ven afectados por una rápida reducción del índice de área foliar que provoca un déficit de asimilados influyendo en la definición del rendimiento. En general la acumulación de biomasa durante este periodo es fundamental ya sea a través de un aumento de la tasa de crecimiento del cultivo y/o una mayor duración de la etapa (Habekotté, 1997).

Llenado de grano: Este período comienza en el tallo principal al mismo tiempo que en las ramas secundarias la floración aún continúa. En esta etapa la mayoría de las hojas ha presentado dehiscencia por lo que el índice de área foliar se ha disminuido. Sin embargo, a pesar de que la canola presenta una falta de fotoasimilados en dicha etapa, esta es similar a la que presentan otros cultivos.

Las primeras semanas de desarrollo de las semillas se caracterizan por la expansión de su epidermis hasta llegar a su tamaño final, el desarrollo embrionario y comienza la acumulación de reservas. Posteriormente las semillas formadas toman una coloración verdosa al mismo tiempo que todas las hojas basales ya cayeron siendo sustituidas por las paredes de las silicuas y el tallo en la producción de fotoasimilados para culminar el llenado de semilla. Posteriormente la coloración de las semillas tendrá cambios en cuanto al color pasando del verde al castaño, rojizo o negro, mientras que las silicuas pasaran de verde a amarillo. En general esta etapa se caracteriza porque en ella se define el peso de la semilla (Gómez y Miralles, 2006).

1.4. Importancia del cultivo de canola

La canola es una oleaginosa de gran importancia a nivel mundial debido al aceite que se extrae de su semilla, esta oleaginosa se ubica solo por debajo del aceite de soya y palma (Khan *et al.*, 2017). La excelente calidad del aceite se debe al contenido de grasas esenciales las cuales pueden prevenir enfermedades del corazón (Kirkegaard *et al.*, 2016). El aceite de canola contiene una baja proporción de grasas saturadas 7%, además de una alta proporción de grasas monoinsaturadas (Ω -9) 62%, ácidos grasos esenciales linoleico (Ω -6) 19% y α -linolénico (Ω -3) 9%, características que lo posicionan como uno de los aceites más saludables (Canola Council, 2020).

La superficie mundial sembrada con este cultivo es de 34030921 ha, con una producción de más de 70510703 millones de toneladas y rendimiento promedio de 2.0 t ha⁻¹ (FAOSTAT, 2019). Los principales productores son: China, Canadá e India, que concentran más del 70% de la superficie cultivada como de la producción. Mientras que los rendimientos promedio más altos se obtienen en Dinamarca y Chile principalmente. México se encuentra dentro de los países donde los rendimientos son más bajos (Figura 1) (FAOSTAT, 2019). En México, el cultivo de canola se inició en el año 2000, desde entonces la superficie sembrada y cosechada de esta oleaginosa exhibió una tendencia ascendente (SIAP, 2017). En el periodo que comprende de 2003 a 2016 se observó un importante incremento en la superficie sembrada de canola que paso de 1200 a 5000 ha, lo que permitió llegar a una producción de 4000 toneladas. Sin embargo, solo se cubrió 7.4% del requerimiento nacional de esta oleaginosa referente a la producción de aceite (SIAP, 2017). En México, durante el 2018 se cosecharon 2 058 ha, con una producción de 1 473 t y un rendimiento promedio de 0.715 t ha⁻¹ (CONASIPRO, 2019). Los estados más sobresalientes en la producción de canola en este año fueron: Tamaulipas, Estado de México, Tlaxcala, Hidalgo y Jalisco, destacando Tamaulipas con 91% de la superficie sembrada y volumen de producción, sin embargo, en esta entidad se han presentado los rendimientos más bajos (0.6 t ha⁻¹), mientras que el Estado de México e Hidalgo obtienen los más altos (2.5 t ha⁻¹) (CONASIPRO, 2019) (Cuadro 1).

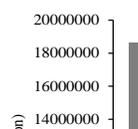
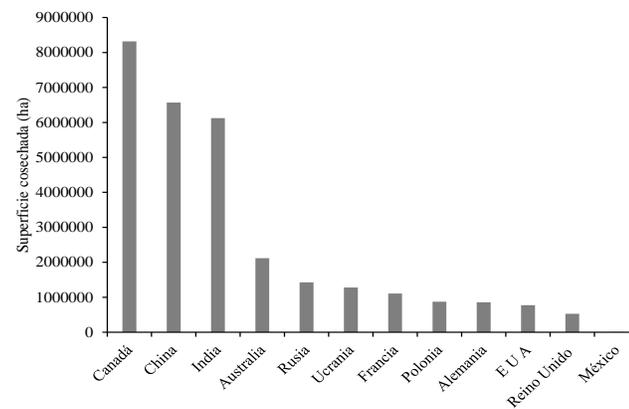


Figura 1. Superficie cosechada, producción y rendimiento promedio de los principales países productores de canola FAOSTAT, 2019.

Cuadro 1. Superficie cosechada, producción y rendimiento promedio de los principales estados productores de canola. Fuente: SIAP, 2018.

Estado	Superficie Cosechada (ha)	Producción (t)	Rendimiento (t ha ⁻¹)
Tamaulipas	1866	1045.4	0.6
Hidalgo	20	44	2.2

México	113	315.9	2.8
Jalisco	12	14.8	1.2
Tlaxcala	47	53.1	1.1

II. ANTECEDENTES

2.1. Rendimiento de semilla y sus principales componentes

2.1.1. Rendimiento de semilla e índice de cosecha

El rendimiento de semilla del cultivo puede explicarse a través de dos modelos, el primero es que el rendimiento es el producto entre la cantidad de materia seca que produce el cultivo a lo largo del ciclo, y la proporción de la misma que es destinada a las semillas, es decir, el índice de cosecha. El otro modelo es a través de los subcomponentes numéricos del rendimiento, de esta manera el rendimiento de semilla resulta del producto entre el número de semillas por unidad de superficie, y el peso unitario de las semillas (Iriarte y Valetti, 2008; Gómez *et al.*, 2013).

En este sentido, Ortegón *et al.* (2009) mencionan que el rendimiento de semilla con bajas densidades de plantas se explica por componentes como: el número de silicuas por planta, la longitud de silicua y el peso de semillas, apoyados algunas ocasiones por el número de ramas por planta. Lo que coincide parcialmente con Angadi *et al.* (2003) quienes atribuyen la respuesta principal de la canola a una menor población de plantas y al aumento de silicuas por planta a través de un mayor número de ramas por planta, sin embargo, no consideran la longitud de silicua como un componente del rendimiento. En general el número de silicuas por planta es decisivo para el rendimiento de semilla; este rasgo está determinado en última instancia por la

supervivencia de ramas, brotes, flores y silicuas jóvenes, más que por el número potencial de flores y silicuas (Diepenbrock, 2000). Por otra parte, una correlación significativa y positiva del peso de la semilla, la duración de la etapa de floración y el rendimiento de la semilla, incrementan en el peso de la semilla dando como resultado un índice de cosecha mayor que, finalmente dará como resultado un alto rendimiento de semilla (Naazar *et al.*, 2003). Otros autores como Canola Council, (2020) incluyen al número de plantas por unidad de área como componente del rendimiento además del número de silicuas por planta y el peso de semilla. Sin embargo, el rendimiento de semilla solo aumenta en promedio 50 kg há⁻¹ cuando el peso de semilla se incrementa 0,1 mg. Mientras, que el rendimiento de semilla se incrementa potencialmente en promedio 370 kg há⁻¹ con 100000 semillas por m² (Peltonen-Sainio y Jauhiainen, 2008).

2.1.2. Rendimiento de semilla y producción de biomasa

Los trabajos experimentales han demostrado que las hojas de la planta de canola influyen en el rendimiento de semillas en la etapa de crecimiento vegetativo. El número exacto de hojas que la planta de canola produce aún se desconoce pero en condiciones óptimas el rango va de 9 a 30 hojas en el tallo principal, dependiendo del cultivar y condiciones ambientales. Se sabe que el área máxima de hojas individuales en condiciones óptimas es aproximadamente de 250 cm⁻² (Canola Council, 2020). Para el cultivo de canola el índice de área foliar (IAF) puede llegar a valores de 4 al comienzo de la floración (Gómez y Miralles, 2006). En este sentido, con un índice de área foliar de 4 el dosel del cultivo intercepta aproximadamente el 90% de la radiación solar incidente (Canola Council, 2020). Sin embargo, hacia la etapa de floración las hojas ya han caído, lo cual disminuye el índice de área foliar logrado hasta esa etapa al tiempo que las silicuas ya están presentes e inician a fotosintetizar, sin embargo, debido a su tamaño estas son

menos eficientes en la creación de fotoasimilados durante esta etapa, influyendo en el rendimiento de semilla (Diepenbrok, 2000). Sin embargo, desde aproximadamente dos semanas después del término de la floración y en adelante, la fijación neta total de CO₂ de las silicuas supera a aquella obtenida por las hojas debido a una mayor exposición radiación solar (Gammelvind, *et al.*, 1996). En investigaciones recientes se ha observado que el índice de área foliar y el índice de área de la silicua se correlacionaron positivamente con el porcentaje de radiación interceptada, mientras que la eficiencia de uso de radiación (EUR) se correlacionó positivamente con la biomasa por unidad de área (Kuai *et al.*, 2016). Resultados similares fueron reportados por Zhang y Flottmann, (2016) quienes observaron que el número de silicuas por m² y el número de semillas por m² se asociaron con la biomasa obtenida en la mayoría de las etapas fenológicas, por lo que un alto rendimiento de semilla se puede atribuir a la biomasa de cada fase fenológica desde la etapa vegetativa hasta la madurez y no así a un índice de cosecha.

2.2. Cambios que ocurren al modificar la densidad de plantas

La densidad de plantas influye directamente sobre el rendimiento de semilla y los componentes de rendimiento a nivel individual. En el inicio del ciclo esto se debe a que la tecnología para la siembra presenta cierto grado de inexactitud, así como los factores bióticos y abióticos, que conducen a una distribución irregular de las plantas en el dosel (Huehn 1998). Posteriormente, la competencia entre plantas reduce la densidad inicial y al finalizar la temporada de crecimiento vegetativo, las plantas con silicuas son solo un porcentaje de las que se encontraban en la misma unidad de área en el momento de la emergencia (Boiffin *et al.*, 1981; Stoy, 1983). De acuerdo

con el Canola Council, (2020) garantizar una densidad de plantas adecuada que sobrevivan a los efectos ambientales, puede mantener el potencial del rendimiento de semilla. El cual se define en función de la densidad de población la cual influye en algunos componentes como: el número de silicuas por planta, número de semillas por silicua y peso de la semilla. Angadi *et al.* (2003). Diepenbrock, (2000) considera que el número de silicuas por planta es el componente de rendimiento más importante. En el cultivo de canola a medida que el dosel se vuelve más denso (la población de plantas aumenta), cada planta produce menos peso seco, tallos más delgados, menos ramas y menos semillas por planta debido a la competencia de las plantas adyacentes (Canola Council, 2020). Otros autores han reportado aumentos en los rendimientos de semilla al disminuir las densidades de plantas por m². Además de observar que incrementos en este mismo factor disminuyen el rendimiento de semilla y gran parte de sus componentes, como un menor número de ramas con silicuas por planta y reducciones en la materia seca de las ramas por planta de hasta 42%, el número de silicuas fértiles por planta y la materia seca de la silicua por planta de hasta 37% (Leach *et al.*, 1999). Por otra parte, se sabe que el incremento en la densidad de plantas se refleja en menor número de semillas a nivel individual, lo que resulta en un rendimiento de semillas similar por unidad de área en comparación con poblaciones de plantas más bajas (Canola Council, 2020). Incluso algunos autores reportan incrementos en el peso de 1000 semillas por consecuencia de un aumento en la densidad de plantas (Leach *et al.*, 1999). Finalmente, el cultivo de canola puede producir rendimientos similares en densidades que varían de 50 a 200 plantas por m², lo cual se fundamenta en la plasticidad que caracteriza al cultivo, es decir, las plantas individuales pueden ajustar la cantidad y el tamaño de las ramas y las silicuas que se producen en respuesta a factores ambientales (Canola Council, 2020).

2.3. Índices de crecimiento

El método clásico para el análisis de crecimiento está basado en las fórmulas propuestas por Gardner *et al.*, (2017); incluye a los siguientes parámetros:

2.3.1. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC)

Se utiliza para medir la generación de biomasa en el área de superficie que ocupó la planta sin considerar el sistema radical y se realiza en intervalos de tiempo. Con este parámetro es posible conocer el incremento en materia seca producida por la planta a través de los muestreos dentro de un intervalo de tiempo. Se calcula como:

$$TCC = \frac{1}{A_s} \times \frac{(W_2 - W_1)}{(T_2 - T_1)}$$

A_s = área de suelo ocupada por las plantas en dónde se realizó el muestreo.

W_1 y W_2 = peso seco de la biomasa obtenido en el muestreo inicial y en el final del periodo especificado.

$T_2 - T_1$ = periodo de tiempo, registrado en días.

2.3.2. Tasa de crecimiento relativo (TCR)

Se conoce como el producto del incremento en peso por unidad de peso inicial y se expresa como: (g de peso seco)⁻¹ día⁻¹

$$TCR = \frac{(\ln W_2 - \ln W_1)}{(T_2 - T_1)}$$

\ln = Logaritmo natural.

2.3.3. Índice de área foliar (IAF)

Es el resultado de dividir el área foliar de las hojas fotosintéticamente activas entre la superficie de suelo que ocupan las plantas.

Se calcula cómo:

$$IAF = \frac{\frac{(AF2+AF1)}{2}}{\frac{1}{As}}$$

AF= área foliar en cada muestreo.

2.3.4. Tasa de asimilación neta (TAN)

Permite conocer la acumulación de peso seco por unidad de área foliar. Se expresa en g (m² de área foliar)⁻¹ día⁻¹ y es una medida de la eficiencia promedio de las hojas para fijar CO₂.

Se calcula como:

$$TAN = \frac{\frac{(W2-W1)}{(T2-T1)}}{\frac{(LnAF2-LnAF1)}{(AF2-AF1)}}$$

2.3.5. Duración de área foliar (DAF)

Permite identificar los cambios que ocurren en el área foliar a través del tiempo y de este modo tener una aproximación del tiempo que duran hojas (fotosintéticamente activas) y senescentes. Expresado en cm² día⁻¹ o cm² semana⁻¹.

$$DAF = \frac{(AF2+AF1) \times (T2-T1)}{2}$$

2.4. Densidad de plantas y su efecto sobre el rendimiento

En algunos cultivos la densidad de plantas tiene un efecto importante sobre el crecimiento y rendimiento de semilla (López *et al.*, 2005; Dong *et al.*, 2010; Ciampitti y Vyn, 2011; Momoh y Zhou, 2001; Rathke *et al.*, 2006) y este depende fuertemente del arreglo espacial (distancia entre plantas y entre hileras) y del genotipo (poblaciones de polinización libre o híbridos) (Griepentrog, 1994). Algunos autores afirman que el máximo rendimiento de un cultivo por unidad de área responde a la densidad de plantas de forma curvilínea, con un máximo rendimiento que se produce en la densidad óptima y está depende de cada especie de cultivo, además de una combinación entre las condiciones ambientales y factores agronómicos. (Hiltbrunner *et al.*, 2007; Dong *et al.*, 2010; Ciampitti y Vyn, 2011). En este sentido, para el cultivo de canola se conoce un amplio rango de densidades de población evaluadas que van desde 8 hasta 240 plantas por m², donde se ha observado una diferencia amplia en los resultados obtenidos que a su vez se ven influenciados por factores tales como: la distancia entre hileras, distancia entre plantas, condiciones ambientales y dosis de fertilización etc.

2.4.1. Densidad de plantas

Existen investigaciones donde se afirma la posibilidad obtener con una baja densidad rendimientos de semilla similares a aquellos obtenidos con alta densidad. En este sentido, Al-Barzinjy *et al.* (1999) al evaluar dos genotipos de tipo primaveral (Derby y Ciclón) utilizando densidades desde 20 y hasta 140 plantas por m² observaron la máxima expresión del rendimiento de semilla alrededor de las 50 plantas por m², concluyendo que una reducción en la densidad de plantas mejora el rendimiento por unidad de área además de reducir los costos de producción del cultivo. De la misma forma, French *et al.* (2016) al evaluar diferentes densidades de plantas por m⁻² en diferentes cultivares de canola (híbridos y variedades de polinización abierta) incluyendo aquellos cultivares con tolerancia a herbicidas como glifosato y triazina, observaron

que las densidades económicamente óptimas oscilaron entre 7 y 180 plantas por m² con una mediana de 32 plantas por m². Resultados similares fueron obtenidos por Roques y Berry, (2015) al evaluar densidades desde 10 hasta 200 plantas por m² desde el punto de vista económico cultivares (híbridos y polinización abierta), concluyeron que la densidad adecuada para cultivo de canola de invierno es de 30 plantas por m² y 70 plantas por m² para canola de primavera.

A nivel experimental algunos autores han observado altos rendimientos al disminuir la densidad de plantas atribuyendo dichos rendimientos a condiciones hídricas y ambientales, por ejemplo: Gan *et al.* (2016) al evaluar el cultivar híbrido In Vigor® 5440 (resistente al glufosinato) con densidades de plantas que van desde 20 y hasta 100 plantas por m², observaron que el rendimiento de semilla no presentó grandes cambios al aumentar o disminuir la densidad de plantas por unidad de superficie. Lo cual coincide parcialmente con los resultados obtenidos por Rodanini *et al.* (2017), quienes al evaluar cinco genotipos comerciales de canola de primavera, incluyendo 3 híbridos (Hyola 61, Hyola 830 y Solar CL) y dos variedades de polinización abierta (Bioaureo 2486 y SRM 2836) con densidades desde 15 hasta 240 plantas por m², observaron que bajo condiciones hídricas y de fertilización óptimas el cultivo de canola presentó un fuerte crecimiento vegetativo y plasticidad reproductiva por planta al reducir la densidad de plantas por m².

2.4.2. Densidad de plantas y separación entre hileras

Es necesario mencionar que además de las condiciones ambientales, el distanciamiento entre hileras de plantas es de gran importancia a la hora de definir el rendimiento de semilla. En este sentido, Angadi *et al.* (2003) evaluaron densidades desde 20 hasta 80 plantas por m² utilizando el cultivar primaveral de polinización abierta "Arrow" (tolerante al glifosato), y observaron que los niveles de precipitación influyeron de tal manera que los rendimientos de semilla fueron

similares para dicho rango de densidades debido a la plasticidad del cultivo en bajas densidades, así mismo, observaron que densidades de 40 plantas m^2 y una distribución espacial adecuada (distancia entre hileras de plantas), el rendimiento de semilla no presentó limitaciones, sin embargo, cuando la población no se distribuyó uniformemente el rendimiento de semilla disminuyó. Resultados similares fueron reportados por Yang *et al.* (2014) al evaluar zonas geográficas con diferente potencial en cuanto al rendimiento de canola, utilizando el híbrido In Vigor® 5440 (resistente al glufosinato) con densidades desde 20 hasta 100 plantas por m^2 , observaron que las hileras espacialmente uniformes aumentaron el rendimiento de semilla hasta en un 32% en zonas de bajo rendimiento y hasta en un 20% en zonas de alto rendimiento en comparación con las hileras de plantas no uniformes con un efecto marcado en aquellas densidades menores a 60 plantas por m^2 , concluyendo que el rendimiento de canola puede incrementarse mejorando la distribución espacial independientemente de las condiciones ambientales. Dicha distribución espacial fue específicamente estudiada por Wang *et al.* (2015) al comparar seis niveles de arreglos de siembra, concluyendo que alternar hileras anchas y estrechas incrementa el número de semillas por m^2 hasta en un (28%) y un (43%) al pasar de 15 plantas por m^2 a 45 plantas por m^2 . En cuanto a la distancia entre hileras estrechas Shain *et al.* (2009) mostraron que el rendimiento de semilla presentó una relación negativa conforme el espaciado entre hileras se incrementó. En este sentido, Bandeira *et al.* (2013) evaluaron el comportamiento agronómico de la canola, utilizando el híbrido Hyola 61 utilizando espaciamientos entre líneas (17, 34, 51 y 68 cm), estos autores observaron que el máximo rendimiento de semilla por unidad de área se obtiene con hileras separadas a 17 cm y una densidad de 45 plantas por m^2 . Sin embargo, Shain *et al.* (2009) evaluaron los efectos del espaciamiento entre hileras de tres genotipos de canola de primavera Hyola 401, Hyola 60 y RGS-003 con hileras distanciadas a (12, 18 y 24 cm), observando el mayor rendimiento de

semilla con 12cm entre hileras. Por último, Uzun *et al.* (2012) evaluaron el efecto del espaciamiento entre hileras y entre plantas en el cultivar de canola Licrown® comparando distancias entre hileras de 10, 20, 30 y 40 cm y plantas distanciadas a 5, 10, 15 y 20 cm. observaron el mayor rendimiento de semilla en hileras de 10 cm y un espacio entre plantas de 5-10 cm. es decir (200 plantas por m²).

2.4.3. Densidad de plantas, distancia entre hileras y fertilización

Por otra parte, la fertilización es una pieza clave a la hora de definir el rendimiento de semilla, en este sentido existen investigaciones en las cuales se ha demostrado dicha relación, por ejemplo, Cheema *et al.* (2001) observaron una reducción significativa en el número de silicuas por m² como respuesta al incremento del espaciamiento entre hileras, registrando el mayor rendimiento de grano con hileras espaciadas a 30 cm., mientras que el mayor número de semillas por unidad de superficie se observó con una fertilización de 135 kg N ha⁻¹. Por otra parte, Mobasser *et al.* (2008) observaron el mayor rendimiento de semilla con una densidad de 80 plantas por m² y 138kg N ha⁻¹, concluyendo que incrementos en la densidad de plantas disminuyen algunos componentes como altura de planta, diámetro del tallo, número de silicuas por planta, longitud de silicuas y rendimiento de semilla. Resultados similares fueron reportados por, Kazemeini *et al.* (2010) quienes concluyeron que la densidad de 90 plantas por m², asociada a una fertilización de 150kg N ha⁻¹ influye positivamente en algunos componentes como el peso de semilla de las silicuas secundarias contribuyendo a mejorar el rendimiento de semilla y la producción de biomasa. De la misma manera, Li *et al.* (2014) evaluaron tres densidades de población combinadas con un arreglo de siembra que consistió en hileras separadas de 30-35 cm, observando que el aumento en la densidad de plantas incrementó significativamente el rendimiento de grano por unidad de superficie, a través de un mayor número de racimos

principales, número de ramas primarias y número de silicuas del racimo principal, concluyendo que una densidad de 90 plantas m² y una dosis de fertilización de 150 kg N ha⁻¹ contribuyen a maximizar el rendimiento de semilla como a mejorar la estructura del cultivo.

2.5. Densidad de plantas y su efecto sobre la producción de biomasa

Se sabe que la densidad de plantas influye de manera directa sobre el rendimiento de semillas y los componentes de rendimiento a nivel individual (Diepenbrock, 2000). En este sentido, en algunos cultivos se ha observado que una reducción del espacio entre hileras e incrementos en la densidad de población aumentan diferentes componentes como: la intercepción de la luz, el índice de área foliar e índice de cosecha, por ejemplo: en girasol (*Helianthus annuus* L.) (Angele, *et al* 2007) y maíz (*Zea mays*) (Begna, *et al* 2001; Shakarami and Rafiee, 2009). De la misma manera, en trigo (*Triticum aestivum*) se tienen reportes de que un arreglo de siembra uniforme e incrementos en la densidad de plantación mejoran la intercepción de radiación y el área foliar por planta (Tao, *et al* 2018). Sin embargo, en otros cultivos oleaginosos como soya (*Glycine max* L.) se ha observado que una reducción en la densidad de plantas incrementa los parámetros de nodulación (número y masa) y el contenido de aceite, sin embargo, el contenido de proteína se afecta negativamente (De luca *et al.*, 2014). De la misma manera, en cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) la baja densidad de plantas incrementó el número de capítulos por planta y semillas por planta en comparación con densidades medias y altas (Elfadl *et al.*, 2009).

En el cultivo de canola la radiación solar se asocia directamente con la producción de biomasa a madurez (Rodanini *et al.*, 2017). En este sentido, Kuai *et al.* (2016) mencionan que el aumento de la densidad de plantas incrementa significativamente el índice de área foliar por unidad de área, así como la tasa de intercepción de luz, el uso y eficiencia de la radiación (EUR) a través de un mayor número de silicuas incrementando la acumulación biomasa por unidad de área. Lo cual coincide

con Momoh y Zhou, (2001) quienes observaron una disminución en el área foliar por planta, número de ramas y número de silicuas por rama disminuyeron en respuesta al aumento de la densidad de plantas, sin embargo, el área foliar por m^2 se incrementó conforme la densidad de población aumentó. Resultados similares fueron observados por Hosseini *et al.* (2006) quienes afirmaron que incrementos en la densidad de plantas disminuyen significativamente la longitud de la inflorescencia del tallo principal, el número total de silicuas por planta, pero incrementan la altura de planta limitando la capacidad competitiva de las malezas.

Por otra parte, algunos autores como Rodanini *et al.* (2017) mencionan que es posible disminuir la densidad de plantas por unidad de área al evaluar cultivares primaverales de canola, los cuales expresaron una gran plasticidad vegetativa a través de un incremento en el área foliar de las hojas que conforman la roseta, y una mayor ramificación floral a nivel individual siempre y cuando el cultivo no se vea limitado por condiciones hídricas y nutricionales. De la misma manera Zhang *et al.* (2016) al evaluar en condiciones óptimas cultivares de canola con tolerancia a diferentes herbicidas, con una densidad de 40 plantas por m^2 , observaron que la canola híbrida tolerante a la imidazolinona presentó una mayor tasa de crecimiento en cada una de las etapas fenológicas a través de una mayor cantidad de biomasa en las hojas, la cual se asoció con el número de silicuas por m^2 y el número de semillas por m^2 , lo que explicó la superioridad en el índice de área foliar, radiación fotosintética activa y eficiencia en el uso de radiación comparada con la canola híbrida tolerante a la triazina.

Por último, la distribución espacial es otro de los factores a tomar en cuenta para la generación de la biomasa. En este sentido, Wang *et al.* (2015) al evaluar dos densidades de plantas (15 y 45 plantas por m^2), combinados con seis arreglos de siembra (tres espaciamientos uniformes de hileras y tres espaciamientos de hileras anchos y estrechos), observaron un mayor número silicuas por

planta (17%) con arreglos de hileras anchas y estrechas en comparación con espaciamientos uniformes, a través de un índice de área foliar más alto y una mayor eficiencia en el uso de la radiación. Concluyendo que un sistema de siembra adecuado mejora la intercepción de radiación fotosintéticamente activa incrementando la biomasa aérea hasta en un (22% - 33%).

III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La región de Valles Altos está formada por los estados de México, Puebla, Hidalgo y Tlaxcala. En esta zona geográfica los principales cultivos de grano son: el maíz, trigo, cebada y avena principalmente en el ciclo primavera-verano. Sin embargo, cultivos como maíz y trigo son poco rentables, debido a que los altos costos de manejo superan el valor de venta del grano. En el ciclo otoño-invierno el cultivo más predominante es la avena con el fin de obtener forraje para el consumo animal.

El cultivo de canola se adapta bien a las condiciones edafoclimáticas de los valles altos y representa una buena alternativa para cultivarla ya sea en verano o en invierno. En comparación con los cultivos de grano tradicionales, la canola tiene un bajo requerimiento hídrico debido a que su sistema radical es pivotante, además de ser un cultivo de mayor rentabilidad, ya que se obtiene mayor utilidad de su producción que cuenta con una gran apertura de mercado. Sin embargo, en los valles altos aún es muy poca la superficie destinada a este cultivo.

Los cambios en los componentes fisiológicos y numéricos del rendimiento en canola que se ven influenciados por la densidad de plantas, la distancia entre hileras y la distancia entre plantas y su relación con la producción de biomasa a través sus determinantes fisiológicos o índices de

crecimiento, han sido pobremente abordados en investigaciones previas además de presentar gran variabilidad en sus resultados, por lo que no pueden extrapolarse a otras regiones.

En la región de valles altos de México no se tiene registro de trabajos donde se comparen estos factores, por lo que resulta importante elucidar su efecto sobre los componentes fisiológicos y numéricos del rendimiento, que permitan optimizar las prácticas de manejo tendientes a incrementar los niveles de producción de este cultivo y ampliar su adopción en zonas agrícolas potenciales.

3.1. Justificación

Entre los países que encabezan la mayor producción a nivel mundial la siembra de canola, se realiza sin el uso de camas o surcos además de que en la mayoría de estos países utilizan altas densidades de plantas.

Por otro lado, el periodo de tiempo con el que se cuenta para que el cultivo de canola se desarrolle en los países que se ubican geográficamente cercanos a los polos es muy limitado debido a las bajas temperaturas, y esto impide que la canola exprese al máximo su rendimiento comparado con otras regiones del mundo donde las condiciones climáticas si lo permiten.

En México el cultivo de canola se introdujo hace 21 años aproximadamente, adaptando su siembra al sistema que ya existía para la siembra de otros granos como el maíz, principalmente en zonas como el noreste del país donde los rendimientos de semillas son bajos.

Bajo este sistema la densidad de plantas por hectárea es baja, comparada con aquellas densidades utilizadas por los principales países productores de esta oleaginosa. Por otra parte, en México existen zonas geográficas alternativas a las del noreste donde las condiciones ambientales son idóneas para que el cultivo de canola pueda desarrollarse ampliamente, como la zona de los Valles altos donde su cultivo está poco difundido, sin embargo, presenta los más altos rendimientos.

Tanto la densidad de plantas, como el sistema de siembra utilizados en México contrastan con las prácticas usadas en otros países, lo que deja abierta la posibilidad de mejorar los rendimientos de semilla actuales principalmente en nuestra región.

Por otra parte, la variabilidad en los resultados obtenidos en investigaciones previas, demuestra que existe la necesidad de entender los efectos del genotipo, densidad de plantas y el sistema de siembra sobre el rendimiento, a fin de canalizar mejor las estrategias del manejo agronómico tendientes a incrementar la productividad del cultivo.

3.2. Hipótesis

El distanciamiento entre hileras y entre plantas, modifica la radiación interceptada y la eficiencia de uso de la radiación en ambos cultivares de canola.

El rendimiento de semilla y sus componentes numéricos se afectan de manera diferencial en función del sistema de siembra, la densidad y el genotipo.

Cambios en la producción de biomasa derivados del arreglo espacial, pueden ser explicados por cambios en los índices de crecimiento durante el periodo crítico.

El distanciamiento entre hileras y entre plantas modifica la radiación interceptada y la eficiencia de uso de la radiación en ambos cultivares.

3.3. Objetivos

3.3.1. General

Evaluar el efecto de dos sistemas de siembra, tres densidades y dos genotipos sobre los componentes fisiológicos y numéricos del rendimiento de canola.

3.3.2. Específicos

Evaluar el efecto de la distancia entre hileras, densidad y genotipo, sobre el índice de cosecha y la producción de biomasa y sus componentes fisiológicos (Radiación interceptada y Eficiencia en el uso de la radiación).

Evaluar el efecto de la distancia entre hileras, densidad y genotipo, sobre el rendimiento de semilla y sus componentes numéricos.

Analizar los índices de crecimiento durante el periodo crítico (Tasa de crecimiento del cultivo, tasa de asimilación neta, tasa relativa de crecimiento y duración del área foliar).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

De acuerdo con los objetivos del estudio, el presente trabajo de investigación se dividió en dos etapas: Evaluar el efecto de dos sistemas de siembra, tres densidades y dos genotipos sobre los componentes fisiológicos y numéricos del rendimiento de canola. (1) y (2) Evaluar el efecto del sistema de siembra, densidad y genotipo, sobre la producción de biomasa y sus componentes fisiológicos (Radiación interceptada y eficiencia en el uso de la radiación).

En ambas etapas se utilizaron dos genotipos primaverales de canola Hyola 61 híbrido de ciclo intermedio y Bioaureo 2486 polinización abierta de ciclo tardío.

V. RESULTADOS

Los resultados de la primera etapa del trabajo experimental fueron enviados para su eventual publicación a la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, durante el mes de junio de 2021. A continuación se presenta su cita bibliográfica preliminar:

García, H.G; Araujo, D.R; Estrada, C.G; Martínez, R.C.G and Domínguez, L.A. 2021. Componentes fisiológicos y numéricos del rendimiento en canola afectados por la densidad y sistema de siembra. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. (num) (vol) (doi).

Al momento de la presentación de esta tesis, este trabajo se encontraba bajo revisión por los encargados de la revista como se observa en la Figura 1:

Los resultados de la segunda etapa del trabajo experimental, se pretenden enviar para su eventual publicación a la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, durante el mes de ¿? de 2021. A continuación se presenta su cita bibliográfica preliminar:

García, H.G; Araujo, D.R; Estrada, C.G; Martínez, R.C.G and Domínguez, L.A. 2021. Efecto del sistema de siembra, densidad y genotipo, sobre la producción de biomasa y sus componentes fisiológicos (radiación interceptada y eficiencia en el uso de la radiación) en el cultivo de canola. Revista mexicana de ciencias agrícolas. (núm) (vol) (doi).

VI. CONCLUSIONES GENERALES

El rendimiento de semilla se explicó principalmente por los cambios observados en la producción de biomasa a madurez y no así por el índice de cosecha.

Para el (SCDH) (hileras separadas a 20cm) los incrementos en el rendimiento de semilla fueron de 22 y 20% al pasar de 50 a 90 plantas por m² en Bioaureo 2486 y Hyola 61, respectivamente.

Para el (SCP) (hileras separadas a 30cm) los incrementos en el rendimiento de semilla fueron de 23 y 28%, al pasar de 50 a 90 plantas por m² para Bioaureo 2486 y Hyola 61, respectivamente.

Para el (SCP) la producción de biomasa se incrementó 20% en hileras a 30cm, respecto al (SCDH).

Para el (SCP) el incremento en la producción de biomasa se explicó por la radiación interceptada acumulada, mientras que la eficiencia en el uso de la radiación explicó los cambios en la producción de biomasa para ambos sistemas.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Agele, S.O.; Maraiyesa, I.O. y Adeniji, I.A. 2007. Effects of variety and row spacing on radiation interception, partitioning of dry matter and seed set efficiency in late season sunflower (*Helianthus annuus* L.) in a humid zone of Nigeria. — Afr. J. Agr. Res. 2: 80–88.
- Al-Barzinjy, M.; Stolen, O.; Christiansen, J.L. y Jensen J.E. 1999. Relationship between plant density and yield for two spring cultivars of oilseed rape (*Brassica napus* L.). Acta Agr. Scand. Sect. B, Soil Plant Sci. 49(3):129-133. <https://doi.org/10.1080/09064719909362508>.
- Angadi, S. V.; Cutforth, H. W.; Mc Conkey, B. G. y Gan, Y. 2003. Yield Adjustment by Canola Grown at Different Plant Populations under Semiarid Conditions. Crop Science. 43(4), 1358. doi:10.2135/cropsci2003.1358
- Bandeira, T. P.; Chavarria, G. y Tomm, G. O. 2013. Desempenho agrônômico de canola em diferentes espaçamentos entre linhas e densidades de plantas. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 48(10), 1332–1341. doi:10.1590/s0100-204x2013001000004
- Begna, S. H.; Hamilton, R. I.; Dwyer, L. M.; Stewart, D. W.; Cloutier, D.; Assemat, L. y Smith, D. L. 2001. Weed Biomass Production Response to Plant Spacing and Corn (*Zea mays* L.) Hybrids Differing in Canopy Architecture. Weed Technology, 15(4), 647–653. doi:10.1614/0890-037x(2001)015[0647:wbprtp]2.0.co;2

- Boiffin, J.; Fabre, B.; Gautronneau, Y. y Sebillotte, M., 1981. Observation sur l'évolution de la densité de peuplement du colza d'hiver après la levée. Inf. Techn. CETIOM 74, 31-36.
- Canola Council of Canadá. 2020. Propiedades nutricionales del aceite de canola. Disponible en forma electrónica. <https://www.canolacouncil.org/about-canola/oil/>
- Canola Council of Canadá. 2020. Etapas de crecimiento de la canola. Disponible en forma electrónica: <https://www.canolacouncil.org/canola-encyclopedia/growth-stages/>
- Canola Council of Canada. 2020. Poblaciones de plantas. Disponible en forma electrónica: <https://www.canolacouncil.org/canola-encyclopedia/plant-establishment/plant-populations/>
- Cheema, M. A.; Saleem, M. y Malik, M. A. 2001. Effect of row spacing and nitrogen management of agronomic traits and oil quality of canola (*Brassica napus* L.). Pak. J. Agri. Sci, 38:3-4.
- Ciampitti, I.A. y Vyn, T.J. 2011. A comprehensive study of plant density consequences. Crop Res. 102: 163–171.
- CONASIPRO. 2019. Bases de datos oleaginosas mundial y nacional 1980-2018. <http://www.oleaginosas.org/cat-69.shtml#51>.
- Diepenbrock, W. 2000. Yield analysis of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): a review. Field Crops Research. 67(1), 35–49. doi:10.1016/s0378-4290(00)00082-4
- Dong, H.Z.; Kong, Q.; Li, J.; Tang, W. y Zhang, M. 2010. Effects of plant density and nitrogen and potassium fertilization on cotton yield and uptake of major nutrients in two fields with varying fertility. Field Crop Res. 119: 106–113.
- Elfadl, E.; Reinbrecht, C.; Frick, C. y Claupein, W. 2009. Optimization of nitrogen rate and seed density for safflower (*Carthamus tinctorius* L.) production under low-input farming conditions in temperate climate. Field Crops Research, 114(1), 2–13. doi:10.1016/j.fcr.2009.06.012

- FAOSTAT. 2019. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Base de datos estadísticos. Disponible en forma electrónica: <http://www.fao.org>.
- French, R.J.; Seymour, M. y Malik, R.S. 2016. Plant density response and optimum crop densities for canola (*Brassica napus* L.) in Western Australia. *Crop Pasture Sci.* 67(4):397-408. <https://doi.org/10.1071/CP15373>.
- Gammelvind, L. H.; Schjoerring, J. K.; Mogensen, V. O.; Jensen, C. R. y Bock, J. G. H. 1996. Photosynthesis in leaves and siliques of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Plant and Soil.* 186(2), 227–236. doi:10.1007/bf02415518
- Gan, Y.T.; Harker, K.N.; Kutcher, H.R.; Gulden, R.H.; Irvine, B.; May, W.E. y O'Donovan, J.T. 2016. Canola seed yield and phenological responses to plant density. *Can. J. Plant Sci.* 96(1):151-159. doi.org/10.1139/cjps-2015-0093.
- García, M. K. P., González, A. A. y Castillo, T. N. 2013. Tecnología para producir canola de temporal en las sierras de Tapalpa y el Tigre en Jalisco. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México: Talleres Gráficos de Prometeo Editores, S.A. de C.V.
- Gardner, F.P.; Pearce, R.B. y Mitchell, R.L. 2017. *Physiology of crop plants*. Second edition. Iowa State Press, Ames. 327 p.
- Gifford, D. 2017. The inconvenient truth about canola oil. Agosto 3, 2021, de Small footprint family
Sitio web: <https://www.smallfootprintfamily.com/the-inconvenient-truth-about-canola-oil>
- Gómez, N.V.; Miralles, D.J.; Mantese, A.I.; Menéndez, Y.C. y Rondanini, D.P. 2018. Colza un cultivo con historia en la FAUBA. *Revista de la Facultad de Agronomía UBA*, 38: 23 -36.
- Gómez, N.V.; Agosti, M.B. y Miralles, D.J. 2006. Fenología y generación del rendimiento del cultivo de colza-canola. Congreso de la AAPRESID. (15°, 2007, ARGENTINA).

- Gómez, N.V.; Vilariño, M.P. y Miralles, D.J. 2013. Colza. En Cultivos Industriales. E. de la Fuente, A. Gil, A. Kantolic, M. López Pereira, E. Ploschuk, P. Gimenez, N.V. Gómez, A. Lenardis, D. Sorlino, M. P Vilariño, D. Wassner y L. Windauer. Editorial Facultad de Agronomía. 3ra Ed-. Buenos Aires. 835 p.
- Griepentrog, H.W. 1994. Saatgutzuteilung von Raps. Doctoral Thesis, Univ. Kiel.
- Habekotte', B., 1997. Option for increasing seed yield of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): a simulation study. Field Crops Res. 54, 109-126.
- Hiltbrunner, J; Streit, B. y Liedgens, M. 2007. Are seeding densities an opportunity to increase grain yield of winter wheat in a living mulch of white clover? FieldCrop Res. 102: 163–171.
- Hosseini, N.; Alizadeh, H. y Ahmadi, H. 2006. Effects of Plant Density and Nitrogen Rates on the Competitive Ability of Canola (*Brassica napus* L.) against Weeds J. Agric. Sci. Technol. 8: 281-291.
- Huehn, M. 1998. A general approach to determine the effect of accuracy of sowing technique on yield per area. J. Agron. Crop Sci. 181, 249-255.
- Iriarte L y O.Valetti. 2008. Cultivo de colza. Editorial INTA-MAAP. BsAs.19 p.
- Javier de Luca, M.; Nogueira, M. A. y Hungria, M. 2014. Feasibility of Lowering Soybean Planting Density without Compromising Nitrogen Fixation and Yield. Agronomy Journal, 106(6), 2118. doi:10.2134/agronj14.0234
- Kazemeini, A.; Edalat, M.; Shekoofa, A. y Hamidi, R. 2010. Effects of nitrogen and plant density on rapeseed (*Brassica napus* L.) yield and yield components in Southern Iran. Revista de Ciencias Aplicadas. 10(14):1461-1465. doi:10.3923/jas.2010.1461.1465.

- Khan, S., Anwar, S., Kuai, J., Ullah, S., Fahad, S. y Zhou, G. 2017. Optimization of Nitrogen Rate and Planting Density for Improving Yield, Nitrogen Use Efficiency, and Lodging Resistance in Oilseed Rape. *Front. Plant Sci.* 8:532.
- Kirkegaard, A. J.; Lilley, M. J.; Brill, D. R.; Ware, H. A. y Walela, K. C. 2018. The critical period for yield and quality determination in canola (*Brassica napus* L.). *Field crops research.* 222, 180-188.
- Kirkegaard, A. J.; Lilley, M. J. y Morrison, M. J. 2016. Drivers of trends in Australian canola productivity and future prospects. *Crop Pasture Sci.* 67(4): i-ix. https://doi.org/10.1071/CPv67n4_FO.
- Kuai, J.; Sun, Y.; Zhou, M.; Zhang, P.; Zuo, Q.; Wu, J. y Zhou, G. 2016. The effect of nitrogen application and planting density on the radiation use efficiency and the stem lignin metabolism in rapeseed (*Brassica napus* L.). *Field Crops Research*, 199, 89–98. doi:10.1016/j.fcr.2016.09.025
- Leach, J. E.; Stevenson, H. J.; Rainbow, A. J. y Mullen, L. A. 1999. Effects of high plant populations on the growth and yield of winter oilseed rape (*Brassica napus*). *The Journal of Agricultural Science*, 132(2), 173–180. doi:10.1017/s0021859698006091
- Li, S. Y.; Yu, C. B.; Zhu, S.; Xie, L. H.; Hu, X. J.; Liao, X.; Liao, S. X. y Che, Z. 2014. High planting density benefits to mechanized harvest and nitrogen application rates of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Soil Sci. Plant Nutr*, 60(3):384-392. doi: 10.1080/00380768.2014.895417.
- López, F.J; López, L. y López, R.J. 2005. Competition, growth and yield of faba bean (*Vicia faba* L.). *Eur. J. Agron.* 23: 359–378.
- Mobasser, H.R.; Shojaee-Ghadikolaee, M.; Nasiri, M.; Daneshian, J.; BarariTari, D. y Pourkalhor, H. 2008. Effect of Nitrogen Rates and Plant Density on the Agronomic Traits of Canola

(*Brassica napus* L.) in Paddy Field. Asian J. Plant Sci, 7(2):233- 236.
doi:10.3923/ajps.2008.233.236.

Momoh, E. y Zhou, W. 2001. Growth and yield responses to plant density and stage of transplanting in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). J. Agron. Crop Sci. 186(4):253-259.
<https://doi.org/10.1046/j.1439-037x.2001.00476.x>.

Naazar, A.; Javidfar, F.; Jafarieh, E. y Mirza, M. 2003. Relationship Among Yield Components and Selection Criteria for Yield Improvement in Winter Rapeseed (*Brassica napus* L.). Pak. J. Bot. 35(2): 167-174.

Ortegón, A.S.; González, J.; Díaz, A. y Castillo, N. 2009. Componentes de rendimiento de canola (*Brassica napus* L.) en siembra a baja densidad de población. Universidad y ciencia. 25: 267-2.

Peltonen-Sainio, P. y Jauhiainen, L. 2008. Association of growth dynamics, yield components and seed quality in long-term trials covering rapeseed cultivation history at high latitudes. Field Crops Research. 108(1), 101–108. doi:10.1016/j.fcr.2008.04.006

Planeación Agrícola Nacional, 2017-2030. Julio 1, 2021 Sitio web:
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256431/B_sico-Oleaginosasparte_una.pdf

Rathke, G.W.; Behrens, T. y Diepenbrock, W. 2006. Integrated management strategies to improve seed yield; oil content and nitrogen efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): a review. Agriculture Ecosystems and Environment. 117(2-3):80-108.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.04.006>.

Rondanini, D.R.; Menéndez, Y.C.; Gómez, N.V.; Miralles, D.J. y Botto, J.F. 2017. Vegetative plasticity and floral branching compensate low plant density in modern spring rapeseed. Field Crop Research. 210:104-113. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.05.021>.

- Roques, S. E. y Berry, P. M. 2015. The yield response of oilseed rape to plant population density. *The Journal of Agricultural Science*. 154(02), 305–320. doi:10.1017/s0021859614001373
- Shahin, Y. y Valiollah, R. 2009. Effects of row spacing and seeding rates on some agronomical traits of spring canola (*Brassica napus* L.) cultivars. *J. Cent. Eur. Agric.* 10(1):115-212.
- Shakarami, G. y Rafiee, M. 2009. Response of corn (*Zea mays* L.) to planting pattern and density in Iran. *Am-Euras J Agric & Environ Sci*, 5(1):69-73.
- SIAP. 2017. Anuario estadístico de la producción agrícola. Agosto 3, 2021, de SIAP Sitio web: http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/identidad/index.jsp
- SIAP. 2018. Anuario estadístico de la producción agrícola. Agosto 3, 2021, de SIAP Sitio web: http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/identidad/index.jsp
- Stoy, A. 1983. Untersuchungen zur Konkurrenz bei Winterraps (*Brassica napus* var. *napus* L.) vor und nach dem UÈberwintern und deren Bedeutung für das Ertragspotential des Bestandes. Ph.D. Thesis. Christian-Albrechts-University, Faculty of Agriculture, Kiel.
- Syngenta. 2018. El cultivo de la colza. Syngenta, España. 23 p.
- Tao, Z.; Wang, D.; Ma, S.; Yang, Y.; Zhao, G. y Chang, X. 2018. Light interception and radiation use efficiency response to tridimensional uniform sowing in winter wheat. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(3), 566–578. doi:10.1016/s2095-3119(17)61715-5
- Uzun, B.; Yol, E. y Furat, S. 2012. The influence of row and intra-row spacing to seed yield and its components of winter sowing canola in the true Mediterranean type environment. *Bulg J Agric Sci*, 18(1):83-91.
- Wang, R.; Cheng, T. y Hu, L. 2015. Effect of wide-narrow row arrangement and plant density on yield and radiation use efficiency of mechanized direct-seeded canola in Central China. *Field Crops Res.* 172:42-52. doi:10.1016/j.fcr. 2014.12.005.

Yang, C.; Gan, Y.; Harker, K. N.; Kutcher, H. R.; Gulden, R.; Irvine, B. y May, W.E. 2014. Up to 32 % yield increase with optimized spatial patterns of canola plant establishment in western Canada. *Agron. Sustain. Dev.* 34:793-801. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0218-5>.

Zhang, H. y Flottmann, S. 2016. Seed yield of canola (*Brassica napus* L.) is determined primarily by biomass in a high-yielding environment. *Crop & Pasture Science.* 67(4):369-380. <https://doi.org/10.1071/CP15236>.