

Composición nutritiva y productividad de forrajes alternativos de otoño-invierno en diferentes fechas de siembra del norte de México

Anabel Guadalupe López-Jara¹
David Guadalupe Reta-Sánchez²
Arturo Reyes-González³
Omar Iván Santana⁴
Magali Jeaneth López-Calderón¹
Juan Isidro Sánchez-Duarte^{3§}

¹Universidad Juárez del Estado de Durango-Facultad de Agricultura y Zootecnia. Carretera Gómez Palacio-Tlahualilo km 32, Ej. Venecia, Gómez Palacio, Durango. CP. 35000. (mvzanabellopez@hotmail.com; magali.lopezcalderon@gmail.com). ²Campo Experimental Delicias-INIFAP. Carretera Delicias-Rosales km 2, Centro, Ciudad Delicias, Chihuahua, México. CP. 33000. (reta.david@inifap.gob.mx). ³Campo Experimental La Laguna-INIFAP. Blv. José Santos Valdez, núm. 1200 Pte. Matamoros, Coahuila, México. CP. 27440. (reyes.arturo@inifap.gob.mx). ⁴Campo Experimental Pabellón-INIFAP. Carretera Aguascalientes-Zacatecas km 32.5, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México. CP. 20660. (santana.omar@inifap.gob.mx).

§Autor para correspondencia: sanchez.juan@inifap.com.mx.

Resumen

El objetivo de este estudio fue evaluar la composición nutritiva y la productividad de forrajes alternativos en diferentes fechas de siembra. Los forrajes alternativos fueron canola y cártamo y los tradicionales fueron cebada y triticale. Las cuatro fechas de siembra fueron: 16 de noviembre, 7 de diciembre, 28 de diciembre y 18 de enero, durante dos años. Al comparar con cebada y triticale, la canola y el cártamo tuvieron menor fibra detergente neutro (FDN) y mayor proteína cruda (PC), pero similar energía neta para lactancia (EN_L). La fecha de siembra tuvo poco impacto en la composición nutritiva de estos forrajes, pero el rendimiento de nutrientes fue afectado significativamente. Los rendimientos de materia seca (MS), PC y EN_L decrecieron al retrasar la fecha de siembra en todas las especies. Canola, cártamo y cebada presentaron los mayores rendimientos de nutrientes el 16 de noviembre y 7 de diciembre, mientras que en triticale se presentaron entre el 16 de noviembre y 28 de diciembre. Cebada y triticale produjeron los rendimientos más altos de MS y EN_L en todas las fechas de siembra, ambas especies mostraron el mayor rendimiento de FDN en las tres primeras fechas de siembra durante los dos años. En conclusión, la siembra temprana mejora la composición nutritiva y la productividad en canola y cártamo, por ello, estos cultivos representan una buena opción como forraje alternativo sembrado a finales de noviembre o principios de diciembre en el norte de México.

Palabras clave: canola (*Brassica napus* L.), cártamo (*Carthamus tinctorious* L.), nutrientes, forraje.

Recibido: febrero de 2022

Aceptado: mayo de 2022

Introducción

A medida que aumenta la escasez de agua en la región árida y semi-árida en México (CONAGUA, 2019), se hace necesario estudiar cultivos forrajeros alternativos que demanden menos agua para mantener la producción de forraje en las granjas lecheras del norte de México. La caracterización del ambiente físico para los cultivos forrajeros alternativos ha sido estudiada en la Comarca Lagunera (Santamaría *et al.*, 2006). También se ha evaluado el potencial de cultivos forrajeros alternativos como leguminosas, oleaginosas, cultivos con aprovechamiento de hoja y raíz, cultivos con aprovechamiento de hoja, cultivos con tallo fibroso y pastos tropicales (Reta *et al.*, 2008).

Entre todos estos cultivos evaluados, la canola (*Brassica napus* L.) y el cártamo (*Carthamus tinctorious* L.) presentaron buenos rendimientos y calidad nutritiva, por lo que fueron dos de los cultivos que sobresalieron para sembrarse en el ciclo de producción de otoño-invierno. El forraje de estos cultivos puede llegar a tener 7% más PC y 12% menos FDN que el forraje de cultivos tradicionales como cebada y triticale, pero el contenido de EN_L puede ser ligeramente menor en canola y cártamo ($1.33 \text{ Mcal kg}^{-1} \text{ MS}$) que en cebada y triticale ($1.37 \text{ Mcal kg}^{-1} \text{ MS}$) (Reta *et al.*, 2015). El rendimiento de MS en cebada y triticale puede ser de 10 a 10.5 t ha^{-1} , mientras que para canola y cártamo puede oscilar entre 7 y 7.5 t ha^{-1} (Reta *et al.*, 2015), aunque se han observado rendimientos de MS hasta de 10 t ha^{-1} en algunas variedades de canola (Reta *et al.*, 2017) y cártamo (Reta *et al.*, 2017a). El valor nutritivo del forraje como el rendimiento de MS en canola y cártamo podrían ser afectados por la fecha de siembra. Sin embargo, ha sido poco estudiado.

El retraso en la fecha de siembra de mediados de septiembre a inicios de octubre disminuyó la producción de MS y semilla en cuatro variedades de canola sembradas en una región que tradicionalmente es cultivada con cereales en el suroeste de Estados Unidos de América (Begna y Angadi, 2016). En contraste, los rendimientos de MS de tres cultivares de canola para forraje disminuyeron de 18 a 28% cuando se sembraron el 19 de septiembre en una zona semiárida del Norte-Centro de México (Sánchez *et al.*, 2018). Respecto al cultivo de cártamo, se encontró que el retraso de la fecha de siembra redujo la producción de semilla (Samanci y Özkaynac, 2003), pero incrementó significativamente el estado vegetativo del cultivo como altura de planta, número de ramas, peso de las plantas y número de flores por planta (Talji, 2015).

La literatura actual sobre las diferentes fechas de siembra en canola y cártamo se ha centrado principalmente en la producción de semillas (Talji, 2015; Begna y Angadi, 2016). Sin embargo, estos hallazgos no son necesariamente adecuados para la producción de forraje, debido a las diferencias en la etapa de crecimiento al momento de la cosecha y la partición de la MS. El objetivo de este estudio fue evaluar la composición nutritiva y la productividad de forrajes alternativos en comparación con los tradicionales bajo diferentes fechas de siembra durante el otoño-invierno en el norte de México para ofrecer nuevas opciones en los sistemas de producción de forraje.

Materiales y métodos

El estudio se hizo en el Campo Experimental La Laguna del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), localizado en Matamoros, Coahuila, México ($25^\circ, 32'$ latitud norte, $103^\circ 14'$ y $1\ 150 \text{ msnm}$) durante otoño-invierno de los años 2018-2019 y 2019-2020. Los suelos del sitio experimental tienen más de 1.8 m de profundidad, con una disponibilidad de agua de 150 mm m^{-1} , contenido de 0.75% de C orgánico (Santamaría *et al.*, 2008) y un pH de 8.1.

Los datos del clima en cada estación de crecimiento fueron colectados de una estación meteorológica localizada a 200 m del sitio experimental. Se evaluó el efecto de cuatro fechas de siembra: 16 de noviembre, 7 de diciembre, 28 de diciembre y 18 de enero, sobre la composición nutritiva [PC, FDN, fibra detergente acida (FDA) y EN_L] y el rendimiento de nutrientes (MS, PC, FDA, FDN, EN_L) por hectárea de los forrajes de canola Hyola 401, cártamo Gila, cebada San Marcos y triticale Río Nazas. Los experimentos se establecieron bajo un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones utilizando un arreglo de parcelas subdivididas. Las parcelas grandes correspondieron a los ciclos de producción, las sub-parcelas a las fechas de siembra y las sub-sub-parcelas a las especies.

La siembra se realizó manualmente en suelo seco. Se utilizaron las siguientes densidades de siembra: 12 kg ha⁻¹ de semilla de canola, 30 kg ha⁻¹ de semilla de cártamo, 100 kg ha⁻¹ de semilla de cebada y 120 kg ha⁻¹ de semilla de triticale. El día de la siembra se aplicó un riego con una lámina de 150 mm; 13 días después de la siembra (dds) se aplicó un riego de 80 mm para facilitar la emergencia de las plántulas. Se utilizó un sistema de tubos de plástico PVC con compuertas. Los requerimientos de agua de las especies fueron cubiertos aplicando cuatro riegos en cada fecha de siembra con una lámina de 13 cm cada uno en ambos ciclos de producción.

El control de maleza se realizó manualmente con el azadón. La fertilización se realizó a la siembra y posteriormente antes del primer y segundo riego de auxilio utilizando sulfato de amonio como fuente de nitrógeno y MAP como fuente de fósforo. A la siembra se aplicaron 75-60-00 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O, respectivamente. Antes del primer riego de auxilio se aplicaron 100 kg ha⁻¹ de N y antes del segundo riego de auxilio se aplicaron 75 kg ha⁻¹ de N durante los dos años de estudio. La cosecha en canola se realizó en la fase final de la floración mientras que la de cártamo se llevó a cabo en botón floral. La cosecha en cebada y triticale se realizó cuando el grano alcanzó un estado lechoso-masoso.

A la cosecha se determinaron los rendimientos de forraje fresco y MS. El rendimiento forraje de fresco para canola, cebada y triticale se estimó en una superficie de 4.8 m². Para cártamo el rendimiento de forraje fresco se estimó en una superficie de 4.86 m². El contenido de MS se determinó en muestras de 0.4 m² para canola, cebada y triticale y de 0.76 m² para cártamo tomadas al azar de las muestras usadas para las estimaciones de forraje fresco. Esto consideró muestrear 1 m de longitud de dos surcos centrales de cada parcela para todas las especies. Estas muestras fueron secadas a 60 °C en una estufa de aire forzado hasta alcanzar un peso constante.

El rendimiento de MS de cada especie se estimó con el rendimiento de forraje fresco y las concentraciones de MS. Cada muestra fue molida usando una malla de 1 mm. El análisis consideró los contenidos de PC mediante con un equipo Flash 2000 (Thermo Scientific), los porcentajes de FDN y FDA con los procedimientos de Goering y Van Soest (1970) y los cálculos de EN_L de acuerdo con el NRC (2001). Los rendimientos de PC, FDN y EN_L por hectárea se obtuvieron con los contenidos de estos nutrientes en cada especie y los rendimientos de MS por hectárea.

Los datos fueron sometidos primeramente a un análisis de varianza combinando los ciclos de producción. En el análisis combinado, el ciclo de producción fue utilizado como la parcela principal, las fechas de siembra como la sub-parcela y las especies como las sub-sub-parcela. Posteriormente, la calidad nutritiva y el rendimiento de nutrientes de las especies fue analizado por ciclo de producción mediante un análisis de varianza de clasificación doble para un arreglo factorial

4 x 4 de los tratamientos (fecha de siembra × especie) utilizando el procedimiento Mixed de SAS versión 9.3 (SAS Institute Inc. Cary, NC). Se utilizó la prueba de Tukey-Kramer para separar las medias de los tratamientos ($p \leq 0.05$).

Resultados y discusión

Con excepción del contenido de PC, el análisis de varianza combinado de los datos indicó que existe una interacción altamente significativa entre el ciclo de producción, las especies y la fecha de siembra ($p = 0.01-0.0001$) en las variables evaluadas. Debido a que las interacciones con el ciclo de producción podrían ser explicadas en función de las condiciones climáticas en lugar de un efecto de respuesta de las especies a las fechas de siembra, los datos se analizaron por ciclo de producción separadamente.

Condiciones climáticas

Las condiciones climáticas de los ciclos de producción y los últimos 30 años (1990-2020) se presentan en la Figura 1. Las temperaturas mínima, media y máxima del ciclo de producción 2018-2019 fueron superiores en los meses de noviembre, diciembre y enero en comparación al ciclo de producción 2019-2020 y al promedio de 30 años, aunque la temperatura máxima promedio de los 30 años en enero fue ligeramente superior que la de los dos ciclos de producción en este mes. Las temperaturas mínima, media y máxima de febrero, marzo y abril fueron superiores en el ciclo de producción 2018-2019 que las temperaturas de estos meses en promedio de 30 años, pero con ligeros incrementos en las temperaturas mínima y máxima en marzo durante los 30 años promedio.

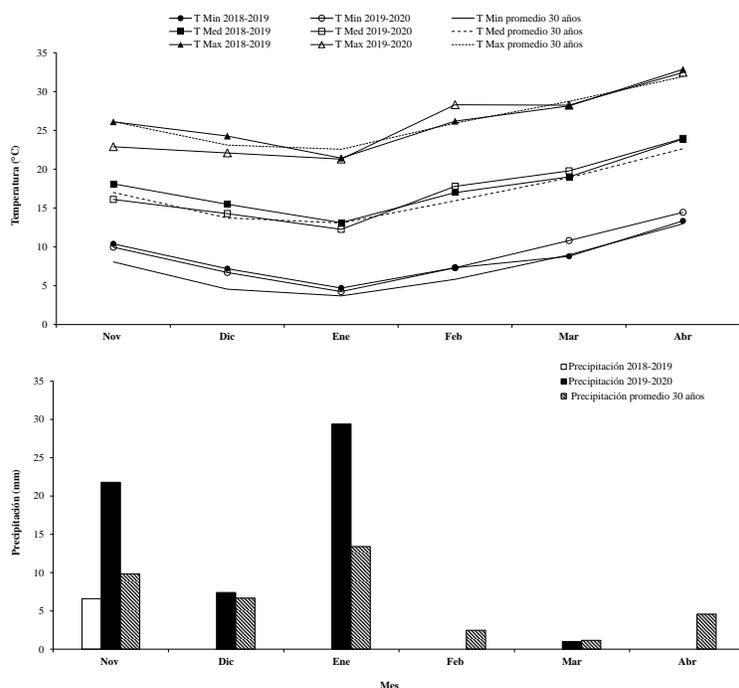


Figura 1. Temperatura y precipitación pluvial mensual durante la estación de crecimiento de los cultivos forrajeros en dos ciclos de producción (2018-2019 y 2019-2020) y los 30 años promedio (1990-2020) en el Campo Experimental La Laguna.

Sin embargo, se presentaron temperaturas mínima, media y máxima mayores durante febrero, marzo y abril en el ciclo de producción 2019-2020 que en el ciclo de producción 2018-2019 y los 30 años promedio, con excepción de un aumento en la temperatura máxima en marzo durante los 30 años promedio al compararla con los dos ciclos de producción. Respecto a la lluvia, se tuvo una mayor precipitación estacional total (noviembre a abril) en el ciclo de producción 2019-2020 (59.6 mm) que en el ciclo de producción 2018-2019 (6.6 mm) y los 30 años promedio (38.2 mm). En general, el clima durante la estación de crecimiento de los cultivos fue más cálido y seco en el ciclo de producción 2018-2019 que durante el ciclo de producción 2019-2020 y los 30 años promedio.

Composición nutritiva y rendimiento de nutrientes en los ciclos de producción 2018-2019 y 2019-2020

La interacción especie \times fecha siembra afectó los rendimientos de MS. Durante el ciclo de producción 2018-2019, la cebada sembrada el 7 de diciembre y el triticale sembrado el 16 de noviembre y 28 de diciembre tuvieron los mayores rendimientos de MS. Sin embargo, el rendimiento de MS del triticale sembrado el 28 de diciembre fue similar a los observados en la cebada sembrada el 16 de noviembre y 28 de diciembre y a la del propio triticale sembrado el 7 de diciembre (Cuadro 1). Durante el ciclo de producción 2019-2020, la cebada sembrada el 16 de noviembre tuvo mayor rendimiento de MS que las demás especies en cualquier fecha de siembra.

Cuadro 1. Efecto de la especie y la fecha de siembra sobre la composición química y rendimiento de nutrientes durante el ciclo 2018-2019.

Especie	Fecha de siembra	Composición nutritiva (%) MS				Rendimiento (kg ha ⁻¹)			
		PC	FDN	FDA	EN _L (MJ kg ⁻¹)	MS	PC	FDN	EN _L (MJ ha ⁻¹)
Cebada	Noviembre 16	11.9	61.3 ^a	35.2	5.8 ^{ab}	9383 ^{bc}	1122 ^{bcde}	5751 ^{abc}	54106 ^{cd}
	Diciembre 7	9.8	56.2 ^a	33.9	5.9 ^{ab}	11879 ^a	1158 ^{abcde}	6682 ^a	70076 ^a
	Diciembre 28	11.1	62.8 ^a	35.4	5.8 ^{ab}	9184 ^{bc}	1015 ^{defg}	5789 ^{abc}	52759 ^{cd}
	Enero 18	11.9	59.6 ^a	32.7	6.1 ^a	8400 ^{cde}	1005 ^{defg}	5031 ^{bc}	50769 ^{cde}
Canola	Noviembre 16	18.9	42.3 ^b	35.9	5.7 ^{ab}	6435 ^{fg}	1215 ^{abc}	2719 ^{de}	36638 ^{fgh}
	Diciembre 7	17.1	42 ^b	34.4	5.9 ^{ab}	7891 ^{cdef}	1351 ^a	3313 ^d	46184 ^{def}
	Diciembre 28	17.4	41.4 ^b	34	5.9 ^{ab}	5714 ^{gh}	991 ^{efg}	2355 ^{de}	33646 ^{gh}
	Enero 18	19.9	40.2 ^b	32.8	6 ^a	4639 ^h	928 ^{fg}	1863 ^e	27991 ^h
Cártamo	Noviembre 16	17.2	43.2 ^b	36.3	5.7 ^{abc}	7301 ^{defg}	1253 ^{abc}	3159 ^d	41120 ^{efg}
	Diciembre 7	16.4	46.3 ^b	38	5.5 ^{bc}	7161 ^{efg}	1175 ^{abcde}	3323 ^d	38972 ^{fg}
	Diciembre 28	16.7	46.0 ^b	37.8	5.5 ^{bc}	6662 ^{fg}	1109 ^{cdef}	3077 ^{de}	36528 ^{fgh}
	Enero 18	17	45.6 ^b	36.6	5.4 ^{bc}	5955 ^{gh}	1009 ^{defg}	2727 ^{de}	32044 ^{gh}
Triticale	Noviembre 16	11.1	56.3 ^a	36.6	5.6 ^{abc}	11887 ^a	1307 ^{ab}	6707 ^a	66707 ^{ab}
	Diciembre 7	10.1	61.6 ^a	41.1	5.1 ^c	9003 ^{bcd}	905 ^g	5550 ^{abc}	46023 ^{def}
	Diciembre 28	11.1	57.8 ^a	37.5	5.5 ^{abc}	10723 ^{ab}	1186 ^{abcd}	6201 ^{ab}	59103 ^{bc}
	Enero 18	12.1	56.9 ^a	35.7	5.7 ^{ab}	8130 ^{cdef}	982 ^{efg}	4627 ^c	46355 ^{def}

Especie	Fecha de siembra	Composición nutritiva (%) MS				Rendimiento (kg ha ⁻¹)			
		PC	FDN	FDA	EN _L (MJ kg ⁻¹)	MS	PC	FDN	EN _L (MJ ha ⁻¹)
	EE	0.54	1.53	0.97	0.1	339	38	250	2017
	Esp	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.1139	<0.0001	<0.0001
	FS	<0.0001	0.52	0.009	0.05	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	Esp × FS	0.49	0.04	0.08	0.017	<0.0001	<0.0001	0.0032	<0.0001

Proteína cruda (PC); fibra neutro detergente (FDN); fibra ácido detergente (FAD); energía neta para lactancia (EN_L); materia seca (MS); error estandar (EE); especie (Esp); fecha de siembra (FS); interacción especie por fecha de siembra (Esp × FS); ^{abcde} = medias dentro de cada columna con diferentes superíndices difieren estadísticamente al nivel de probabilidad indicado.

Además, la cebada sembrada el 7 de diciembre presentó un rendimiento de MS similar al triticale sembrado el 7 y 28 de diciembre. El rendimiento de MS más bajo lo tuvo la canola y el cártamo sembrados el 28 de diciembre y 18 de enero. La interacción especie × fecha siembra también indicó que los mayores rendimientos de EN_L se presentaron en cebada y triticale sembrados el 16 de noviembre y 7 de diciembre en ambos ciclos de producción ($p < 0.0001$; Cuadros 1 y 2). El triticale sembrado el 16 de noviembre tuvo rendimientos de EN_L similares a los obtenidos por la cebada sembrada el 7 de diciembre, pero en el segundo año, la cebada sembrada el 16 de noviembre fue superior que el triticale sembrado en cualquier fecha de siembra. Este comportamiento podría indicar que el triticale rinde mejor en años cálidos y secos que la cebada (Roohi *et al.*, 2013).

Los rendimientos de MS y nutrientes disminuyeron a medida que se retrasó la fecha de siembra en todas las especies, aunque en triticale este efecto no fue tan pronunciado. Esto probablemente se debió a que esta especie obtuvo los rendimientos más altos el 28 de diciembre, y rendimientos similares o superiores a los de la cebada el 18 de enero. En varios estudios se ha encontrado una reducción en el rendimiento de MS a medida que se retrasa la fecha de siembra, ya sea en cebada (Miroslavljević *et al.*, 2018), triticale (Schwarte *et al.*, 2005), canola (Sánchez *et al.*, 2018) y cártamo (Talji, 2015).

Sin embargo, estos efectos se asocian comúnmente con la reducción del número de macollos o ramas productivas en cebada y cártamo (Miroslavljević *et al.* 2018), así como acortar la temporada de crecimiento en canola (Begna y Angadi, 2016) y triticale (Schwarte *et al.*, 2005), lo que restringe el área foliar y la intercepción de la radiación solar al retrasar la fecha de siembra. El crecimiento y desarrollo de las plantas son influenciados directa o indirectamente por variables ambientales como fotoperiodo, temperatura y el contenido de agua en el suelo. En el presente estudio, el fotoperiodo fue el mismo en los dos ciclos de crecimiento ya que se evaluaron las mismas fechas de siembra; por lo tanto, las diferencias en rendimiento de MS entre años se relacionaron principalmente con la temperatura y la precipitación durante el ciclo de crecimiento.

Los efectos del estrés por calor en las plantas son muy complejos, provocando alteraciones del crecimiento y desarrollo con cambios en funciones fisiológicas como la reducción de la capacidad fotosintética y la disminución de la actividad metabólica, que se refleja en la reducción de formación de granos y el rendimiento (Nurunnaher e Islam, 2017). En el presente estudio, el rendimiento de MS fue mayor en el ciclo 2019-2020 (8 547 kg ha⁻¹; Cuadro 2) respecto al observado en 2018-2019 (8 147 kg ha⁻¹; Cuadro 1).

Cuadro 2. Efecto de la especie y la fecha de siembra sobre la composición química y rendimiento de nutrientes durante el ciclo 2019-2020.

Especie	Fecha de siembra	Composición nutritiva (%) MS				Rendimiento (kg ha ⁻¹)			
		PC	FDN	FDA	EN _L (MJ kg ⁻¹)	MS	PC	FDN	EN _L (MJ ha ⁻¹)
Cebada	Noviembre 16	9.7	56.5	34.1	5.89	13842 ^a	1341 ^{ab}	7821 ^a	81493 ^a
	Diciembre 7	9.9	59.5	36.9	5.58	11454 ^{bc}	1135 ^{bcd}	6816 ^{ab}	63903 ^{bc}
	Diciembre 28	9.7	59.4	37.2	5.5	8282 ^{ef}	804 ^{fg}	4923 ^{de}	45955 ^{def}
	Enero 18	10.3	58.8	37.2	5.5	6853 ^{fgh}	706 ^g	4047 ^{ef}	37939 ^{fgh}
Canola	Noviembre 16	18.1	36.8	30.4	6.3	8477 ^e	1523	3141 ^{fg}	53201 ^d
	Diciembre 7	17.4	38.4	32.7	6.1	6678 ^{ghi}	1167 ^{bcd}	2562 ^g	40267 ^{efgh}
	Diciembre 28	17.5	45.7	35.4	5.7	5274 ⁱ	921 ^{defg}	2401 ^g	30250 ^h
	Enero 18	18.5	40.3	31.9	6.1	5685 ^{hi}	1051 ^{cdef}	229 ^g	34867 ^{gh}
Cártamo	Noviembre 16	17.1	41.9	33.2	60	8704 ^{de}	1490 ^a	3653 ^f	52185 ^d
	Diciembre 7	16.2	40.8	34.9	5.8	7736 ^{efg}	1248 ^{abc}	3161 ^{fg}	44753 ^{defg}
	Diciembre 28	17.4	42.7	32.5	6.1	5734 ^{hi}	996 ^{cdef}	2463 ^g	34732 ^{gh}
	Enero 18	17.9	40.2	31.8	6.1	5943 ^{hi}	1068 ^{bcdef}	2399 ^g	36550 ^{fgh}
Triticale	Noviembre 16	9.8	59	37.9	5.5	10089 ^{cd}	987 ^{cdef}	5956 ^{bc}	55087 ^{cd}
	Diciembre 7	9.3	60.2	37.4	5.5	11699 ^b	1091 ^{bcd}	7042 ^a	64710 ^{bc}
	Diciembre 28	10	60	35.5	5.7	11651 ^b	1169 ^{bcd}	6985 ^{ab}	66811 ^b
	Enero 18	9.85	60.5	34.7	5.8	8649 ^{de}	851 ^{efg}	5241 ^{cd}	50354 ^{de}
	EE	0.44	1.39	1.21	0.13	288	55	201	2892
	Esp	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	FS	0.0353	0.01	0.15	0.15	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Esp × FS	0.71	0.09	0.09	0.0905	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	

Proteína cruda (PC); fibra neutro detergente (FDN); fibra ácido detergente (FAD); energía neta para lactancia (EN_L); materia seca (MS); error estandar (EE); especie (Esp); fecha de siembra (FS); interacción especie por fecha de siembra (Esp × FS); ^{abcde fgh}= medias en cada columna con diferentes superíndices difieren estadísticamente al nivel de probabilidad indicado.

Este comportamiento se asoció a la menor temperatura máxima y mínima ocurrida en 2019-2020, principalmente en los meses de noviembre, diciembre y enero (Figura 1), lo cual propició un ciclo de crecimiento más largo (5 días) respecto al ciclo 2018-2019. Además, en 2019-2020, se presentó una mayor precipitación, que ocurrió en los meses de noviembre, diciembre y enero (Figura 1), la cual fue un complemento al riego aplicado a los cultivos, principalmente durante el período vegetativo de las dos primeras fechas de siembra. En este estudio, también las diferencias en rendimiento de MS entre fechas de siembra están relacionadas con las variaciones en fotoperiodo y la temperatura ambiental durante el periodo de desarrollo de los cultivos.

La diferencia en fotoperiodo entre fechas de siembra fue hasta de 0.5 h, mientras que, en la temperatura máxima promedio durante el ciclo, el incremento fue de 3.9 °C entre la fecha de siembra de 16 de noviembre y el 18 de enero (Figura 1). Ambos factores influyeron en la duración

del ciclo de crecimiento, con un aceleramiento del ciclo en todos los cultivos de 17 a 29 días cuando la siembra se retrasó de 16 de noviembre al 18 de enero. La disminución del rendimiento de MS conforme se retrasó la fecha de siembra fue producto de una menor absorción de radiación solar y su menor acumulación de MS resultante. Además, el nivel de la temperatura prevaleciente durante el ciclo afectó el crecimiento de los cultivos.

Las temperaturas óptimas para el crecimiento de canola, cártamo y cebada son de 20 a 23 °C y de 25.6 °C para triticale; mientras que las temperaturas máximas son de 30 °C para canola, 37 °C para cebada y de 40 °C para triticale y cártamo (Robertson *et al.*, 2002; Gol *et al.*, 2017; Munyon *et al.*, 2020; Torabi *et al.*, 2020). Los mayores rendimientos de MS en las fechas de siembra tempranas del 16 de noviembre y 7 de diciembre coinciden con las temperaturas máximas promedio más cercanas (24.8 a 25.05 °C) a las temperaturas óptimas; mientras que, en las tardías del 28 de diciembre y 18 de enero, las temperaturas aumentaron a 26.3 y 27.9 °C, respectivamente (Figura 1), las cuales están más cerca de las temperaturas máximas, especialmente en la canola.

Los rendimientos de PC y FDN también fueron afectados por la interacción especie × fecha siembra en ambos ciclos de producción. Durante 2018-2019, la canola mostró el mayor rendimiento de PC sembrado el 16 de noviembre y el 7 de diciembre. Estos rendimientos fueron iguales a los obtenidos en cebada el 7 de diciembre, cártamo el 16 de noviembre y 7 de diciembre y el triticale sembrado el 16 de noviembre y el 28 de diciembre. Los menores rendimientos de PC se presentaron en triticale sembrado el 7 de diciembre y 18 de enero, cártamo el 18 de enero y cebada y canola en siembras del 28 de diciembre y 18 de enero ($p < 0.0001$).

Respecto al rendimiento de FDN, los mayores valores se observaron en cebada sembrada el 7 de diciembre y triticale el 16 de noviembre. Estos rendimientos fueron igualados por los rendimientos que presentó la cebada sembrada el 16 de noviembre y el 28 de diciembre y el triticale el 7 y 28 de diciembre. El menor rendimiento de FDN fue observado en canola sembrada el 16 de noviembre, 28 de diciembre y 18 de enero y al de cártamo sembrado el 28 de diciembre y 18 de enero ($p = 0.003$). Durante el 2019-2020, el mayor rendimiento de PC se obtuvo en canola y cártamo sembrados el 16 de noviembre y este fue similar al obtenido con cebada el 16 de noviembre y cártamo el 7 de diciembre.

El rendimiento de FDN fue superior en cebada y triticale sembrados el 16 de noviembre y el 7 de diciembre, respectivamente. Este fue similar al encontrado en cebada el 7 de diciembre y triticale el 28 de diciembre. El menor rendimiento de FDN se observó en canola y cártamo sembrados en diciembre y enero ($p < 0.0001$). Debido a la mínima variación en la composición nutritiva por la fecha de siembra, esto sugiere que los mejores rendimientos de estos nutrientes se observaron al sembrar entre el 16 de noviembre y el 7 de diciembre. Una respuesta similar fue observada en un estudio en el que se determinó la producción de nutrientes de seis cultivares de canola sembrados en cuatro fechas de siembra (Sánchez *et al.*, 2018). Los resultados indicaron que los rendimientos de PC producidos en la fecha de siembra del 19 de octubre fueron superiores a los producidos el 2 y 19 de septiembre.

Al igual que en nuestro estudio, estos resultados se atribuyeron a los mayores rendimientos de MS obtenidos en la fecha de siembra tardía, cuando las temperaturas ambientales más bajas y el fotoperiodo corto prolongaron el ciclo de crecimiento de la canola. Los porcentajes de PC, FDA y FDN de los forrajes fueron afectados por la especie y fecha de siembra en los dos ciclos de

producción. En 2018-2019, la canola fue superior a todas las especies en PC, seguida por cártamo, cebada y triticale. Para la fecha de siembra, las mayor PC se observó en siembras del 18 de enero. El triticale y la cebada tuvieron las mayores concentraciones de FDA y en las fechas de siembra del 7 y 28 de diciembre se observaron la FDA más alta (Cuadro 1).

En 2019-2020, la canola y el cártamo tuvieron la mayor concentración de PC y la fecha óptima de siembra para obtener la mayor concentración de PC en canola, cártamo y cebada fue el 18 de enero. Con respecto al contenido de fibra, la cebada y el triticale tuvieron una mayor concentración de FDN que la canola y el cártamo. La mayor concentración de FDN se observó cuando los forrajes se sembraron del 7 de diciembre al 18 de enero (Cuadro 2).

El porcentaje de FDA y la concentración de EN_L en los forrajes fueron afectados por la especie durante el 2019-2020 (Cuadro 2). La cebada y el triticale tuvieron una mayor concentración de FDA que canola y cártamo. Sin embargo, la cebada y el triticale tuvieron concentraciones de EN_L más bajos que la canola y el cártamo ($p < 0.0001$). Los resultados indican que el mayor efecto significativo se debió a la especie; aunque la composición nutritiva del forraje mostró variaciones por la fecha de siembra, por la especie o por la interacción entre ambas.

El contenido de PC fue en promedio 7 unidades porcentuales más alto en canola y cártamo que en cebada y triticale en ambos ciclos de producción. Resultados similares a los del presente estudio fueron encontrados al comparar forrajes alternativos de otoño-invierno con forrajes tradicionales (Reta *et al.*, 2017b). Además, una mayor concentración de PC y un menor rendimiento de MS obtenidos en todas las especies de forraje cultivadas en la fecha de siembra tardía sugieren que las plantas adquirieron nitrógeno en exceso, mientras que la acumulación de MS se limitó probablemente a los días más cálidos durante el desarrollo de la planta. Esto último ha sido descrito en estudios con especies de ryegrass cultivado en verano (Santiago *et al.*, 2012).

En cuanto al porcentaje de fibra, la FDN fue menor en canola y cártamo en comparación con cebada y triticale. Reta *et al.* (2017b) reportaron un 11% más de FDN en forrajes de cebada y triticale que en canola y cártamo. En el presente estudio, la concentración de EN_L de canola y cártamo obtenida en el segundo año fue mayor que la observada para cebada y triticale; sin embargo, este resultado no se observó en el primer año, lo que probablemente estuvo asociado con temperaturas ambientales más altas. Esta respuesta de la planta generalmente se asocia con un aumento del grosor de la pared celular en respuesta a las altas temperaturas (Li, 2021).

En nuestro estudio, las temperaturas más cálidas aumentaron el contenido de FDN y FDA mientras reducían la concentración de EN_L en el forraje de canola y cártamo. Resultados similares han sido encontrados en canola, en la cual las altas temperaturas ambientales redujeron la concentración de PC y aumentaron los contenidos de FDN y FDA (Wiedenhoeft y Barton, 1994). Reta *et al.* (2016) también indicaron contenidos más bajos de EN_L y concentraciones más altas de FDN y FDA en canola cultivada bajo altas temperaturas ambientales.

En este estudio se ha encontrado la mejor fecha de siembra en canola y cártamo forrajero considerando su composición nutritiva y rendimiento de nutrientes. Sin embargo, es necesario realizar investigaciones posteriores que consideren la digestibilidad de la fibra y su producción por hectárea, así como el mejor método de conservación para estos forrajes alternativos.

Conclusiones

El forraje de canola y cártamo resultó con mayor contenido de proteína y menor fibra, pero similar contenido de energía, que el forraje de cebada y triticale, mientras que la fecha de siembra tuvo un impacto mínimo en la composición nutritiva. La canola y el cártamo obtuvieron rendimientos de PC similares en comparación con la cebada y el triticale; sin embargo, estos forrajes pueden producir más MS, fibra y energía por hectárea que la canola y el cártamo, con mayor producción al sembrar del 16 de noviembre al 7 de diciembre para la cebada, y entre el 16 de noviembre y el 28 de diciembre para el triticale. El mejor momento de siembra para la producción de nutrientes por hectárea en canola y cártamo es entre el 16 de noviembre y el 7 de diciembre. Por lo tanto, la canola y el cártamo representan una buena fuente de forraje cuando se siembran en noviembre y diciembre en el norte de México.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias en el Campo Experimental La Laguna de Matamoros, Coahuila, México.

Literatura citada

- Begna, S. H. and Angadi, S. V. 2016. Effects of planting date on winter canola growth and yield in the Southwestern USA. *J. Plant Sci.* 1(7):201-217. Doi: 10.4236/ajps.2016.71021.
- CONAGUA. 2019. Comisión Nacional del Agua. Estadísticas del agua en México. Gobierno de México. 17-55 pp. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php?publicaciones>.
- Geoering, H. K. and Van Soest, P. J. 1970. Forage fiber analysis. Apparatus, reagents, procedures, and some applications. *Agric. Handbook 379*. ARS. USDA. Washington DC. 8-9.
- Gol, L.; Tomé, F. and Von, K. M. 2017. Floral transitions in wheat and barley: interactions between photoperiod, abiotic stresses, and nutrient status. *J. Exp. Bot.* 7(68):1399-1410. doi.org/10.1093/jxb/erx055.
- Li, X. 2021. Plant cell wall chemistry: implications for ruminant's utilisation. *J. Appl. Anim. Nutr.* 9(1):31-56. <https://doi.org/10.3920/JAAN2020.0017>.
- Mirosavljević, M.; Momčilović, V.; Novo, P.; Maksimović, I. and Putnik-D, M. 2018. Dry matter accumulation of winter wheat and barley at different sowing dates. *Rat. I Povrta.* 2(55):87-94.
- Munyon, J. W.; Bheemanahalli, R.; Hunt, W. C. and Raja, R. K. 2020. Developing functional relationships between temperature and cover crop species vegetative growth and development. *Agron. J.* 2(113):1333-1348. doi:10.1002/agj2.20537.
- Nurunnaher, A. and Islam, M. R. 2017. Heat stress effects and management in wheat. A review. *Agron. Sust. Dev.* 5(37):1-37.
- Reta, S. D. G.; Quiroga, G. H. M. y Serrato, C. J. S. 2015. Patrones de cultivos forrajeros alternativos con mejor adaptación al cambio climático en la Comarca Lagunera. Desplegable para productores núm. 20. 2 p. INIFAP-CIRNOC-CELALA.
- Reta, S. D. G.; Sánchez, D. J. I.; Torres, H. D.; Reyes, G. A. y Ochoa, M. E. 2017a. El cártamo forrajero como alternativa para siembras tardías en otoño-invierno. Desplegable para productores núm. 26. 2 p. INIFAP-CIRNOC-CELALA.

- Reta, S. D. G.; Serrato, C. J. S.; Figueroa, V. R.; Cueto, W. J. A.; Berumen, P. S. y Santamaría, C. J. 2008. Cultivos alternativos con potencial de uso forrajero en la Comarca Lagunera. Libro técnico núm. 3. 268 p. INIFAP-CIRNOC-CELALA.
- Reta, S. D. G.; Serrato, C. J. S.; Quiroga, G. H. M.; Gaytán, M. G. y Figueroa, V. U. 2017b. Secuencia de cultivo alternativas para incrementar el potencial forrajero y productividad del agua. *Rev. Mex. Cienc. Pec.* 4(8):397-406. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v8i4.4645>.
- Reta, S. D. G.; Serrato, C. J. S.; Quiroga, G. H. M.; Figueroa, V. U. y Gaytán, M. A. 2017. Potencial forrajero de cultivares de canola primaverales e invernales en la Comarca Lagunera, México. *Rev. Fitotec. Mex.* 2(40):227-233. <https://doi.org/10.35196/rfm.2017.2.227-233>.
- Robertson, M. J.; Asseng, S.; Kirkegaard, J. A.; Wratten, N.; Holland, J. F.; Watkinson, A. R.; Potter, T. D.; Burton, W. A.; Walton, G. H. and Moot, D. J. I. 2002. Environmental and genotypic control of time to flowering in canola and Indian mustard. *Aust. J. Agric. Res.* 53(7):793-809. doi.org/10.1071/AR01182.
- Roohi, E.; Tahmasebi, S. Z.; Modarres, S. S. A. M. and Siosemardeh, A. 2013. Comparative study on the effect of soil water stress on photosynthetic function of triticale, bread wheat, and barley. *J. Agric. Sci. Technol.* 2(15):215-228.
- Sánchez, M. H.; Reta, S. D. G.; Serrato, C. J. S.; Figueroa, V. U.; Cueto, W. J. A. y Castellanos, P. E. 2018. Efecto de la fecha de siembra sobre el potencial forrajero de cultivares primaverales de canola en la comarca lagunera, México. *ITEA.* 3(114):223-242.
- Santamaría, J. C.; Reta, S. D. G.; Chávez, G. J. F.; Cueto, W. J. A. y Romero, P. R. J. I. 2006. Caracterización del medio físico con relación a cultivos forrajeros alternativos para la comarca lagunera. Libro técnico núm. 2. 240 p. INIFAP-CIRNOC-CELALA.
- Santiago, R. B.; Costa, A. V.; Lemaire, G.; Borges, R. de M.; Saibro, J. C.; Nabinger, C.; Villamil, F. B. and Justin, I. C. 2012. Forage yield and nitrogen nutrition dynamics of warm-season native forage genotypes under two shading levels and in full sunlight. *Rev. Bras. Zootec.* 7(41):1589-1597. <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-35982012000700006>.
- Schwarte, A. J.; Gibson, L. R.; Karlen, D. L.; Liebman, M. and Jannink, J. L. 2005. Planting date effects on winter triticale dry matter and nitrogen accumulation. *Agron. J.* 5(97):1333-1341. [Doi:10.2134/agronj2005.0010](https://doi.org/10.2134/agronj2005.0010).
- Talji, D. T. 2015. Effect of planting date on yield performance and some agronomical traits in safflower (*Carthamus tinctorious L.*) under rainfed and irrigation conditions in Jordan. *Adv. Environ. Biol.* 9(24):367-370.
- Torabi, B.; Adibnya, M.; Rahimi, A. and Azari, A. 2020. Modeling flowering response to temperature and photoperiod in safflower. *Ind. Crops Prod.* 1(151):112474. [Doi: 10.1016/j.indcrop.2020.112474](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112474).
- Wiedenhoeft, M. H. and Barton, B. A. 1994. Management and environment effects on brassica forage quality. *Agron. J.* 2(86):227-232. [doi:10.2134/agronj1994.00021962008600020003x](https://doi.org/10.2134/agronj1994.00021962008600020003x).