



Terra Latinoamericana

ISSN: 2395-8030

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.

Sosa-Yáñez, Lorena Carolina; García-Hernández, José Luis; Rodríguez-Félix, Francisco; Bello-Pérez, Luis Arturo; Tovar, Juscelino; López-Córdova, Juan Pedro; López-Ahumada, Guadalupe Amanda
Influencia de tres regímenes de riego sobre la calidad agronómica de centeno cultivado en la costa de Hermosillo, Sonora, México
Terra Latinoamericana, vol. 40, e1073, 2022, Enero-Diciembre
Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.

DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1073>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57371833010>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

Influencia de tres regímenes de riego sobre la calidad agronómica de centeno cultivado en la costa de Hermosillo, Sonora, México

Influence of three irrigation regimes on the agronomic quality of cultivated rye in the coast of Hermosillo, Sonora, Mexico

Lorena Carolina Sosa-Yáñez¹ , José Luis García-Hernández² , Francisco Rodríguez-Félix¹ , Luis Arturo Bello-Pérez³ , Juscelino Tovar⁴ , Juan Pedro López-Córdova⁵  y Guadalupe Amanda López-Ahumada^{1‡} 

¹ Universidad de Sonora, Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos. Boulevard Luis Encinas y Rosales s/n, Col. Centro. 83000 Hermosillo, Sonora, México.

² Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Agricultura y Zootecnia. Carretera Gómez Palacio-Tlahualilo km 32, Venecia. 35000 Gómez Palacio, Durango, México.

³ Centro de Investigación en Productos Bióticos, Escuela de Ingeniería y Ciencias. Carretera Yautepec-Joxtla km 6, calle CEPROBI No. 8, Col. San Isidro. 62731 Yautepec, Morelos, México.

⁴ Lund University, Department of Food Technology, Engineering and Nutrition. Box 117, 221 00 Lund, Sweden.

⁵ Universidad de Sonora, Departamento de Agricultura y Ganadería. Carretera a Bahía de Kino km 20.5. 83000 Hermosillo, Sonora, México.

‡ Autora para correspondencia (amanda.lopez@unison.mx)

RESUMEN

Siendo los cereales parte fundamental de la alimentación mundial es necesario lograr su adaptación en diferentes entornos debido al cambio climático. Es esencial el estudio de las modificaciones que pueden presentarse durante su desarrollo, así como en la calidad del producto cosechado. El objetivo del trabajo fue analizar el efecto del estrés hídrico sobre el desarrollo, crecimiento, producción y calidad agronómica del cultivo de centeno y el grano cosechado. Para la siembra se utilizó un diseño experimental de una sola vía, donde los tratamientos constaron de tres diferentes regímenes de humedad en el suelo asignados completamente al azar. Las variables evaluadas al momento de la cosecha fueron la altura de la planta y el número de espigas por metro lineal. Posterior a la cosecha se utilizó un diseño completamente al azar donde se evaluó el tamaño de la espiga y cuantos granos contenía, así como el tamaño y color de grano, peso de 1000 granos, peso hectolítico, rendimiento y contenido de cenizas y proteínas. Se realizó un análisis de varianza y pruebas de comparación de medias por Tukey ($P < 0.05$) para el contenido de cenizas y proteína y Duncan ($P < 0.05$

y $P \leq 0.0001$) para el resto de las determinaciones. Los resultados mostraron que la menor lámina de riego no afectó negativamente al cultivo, presentando un apropiado desarrollo agronómico, destacando un incremento en la cantidad y tamaño de espigas, aumento en la cantidad de granos por espiga, así como un alto rendimiento y contenido de proteínas de grano. Estos valores fueron más altos que los reportados en investigaciones previas. Todo esto confirma que a pesar de que el centeno es considerado un cereal invernal, logró aclimatarse a las condiciones del suelo, disminución de agua y altas temperaturas de la zona de la costa de Hermosillo, Sonora.

Palabras clave: adaptación, cambio climático, estrés hídrico en cereales, rendimiento, *Secale cereale*.

SUMMARY

Cereals are a fundamental part of the world diet; therefore, their adaptation in different environments due to climate change should be achieved. Studying the modifications that may occur during plant development is essential, as well as in the quality of the harvested

Cita recomendada:

Sosa-Yáñez, L. C., García-Hernández, J. L., Rodríguez-Félix, F., Bello-Pérez, L. A., Tovar, J., López-Córdova, J. P. y López-Ahumada, G. A. (2022). Influencia de tres regímenes de riego sobre la calidad agronómica de centeno cultivado en la costa de Hermosillo, Sonora, México. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-12. e1073. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1073>

product. Thus the objective of this research is to analyze the effect of water stress on development, growth, production, and agronomic quality of rye crop and harvested grain. For sowing, a completely randomized one-way experimental design was used, where the treatments consisted of three different soil moisture regimes. The variables evaluated at the time of harvest were plant height and number of spikes per linear meter. After harvest, the variables evaluated were spike size and the number of grains it contained, as well as size and color of the grain, weight of 1000 grains, test weight, yield, ash and protein content. An analysis of variance and Tukey's comparison of means test ($P < 0.05$) were performed for ash and protein content, and Duncan ($P < 0.05$ and $P \leq 0.0001$) for the rest of the determinations. The results showed that less irrigation did not negatively affect the crop with an appropriate agronomic development, highlighting an increase in the number and size of spikes, an increase in the number of grains per spike, as well as a high yield and protein content of the grain. These values were higher than those reported in previous research, which confirms that even though rye is considered a winter cereal, it managed to acclimate to soil conditions, decreased water, and high temperatures in the coastal area of Hermosillo, Sonora, México.

Index words: adaptation, climate change, water stress in cereals, yields, *Secale cereale*.

INTRODUCCIÓN

La producción de cultivos enfrenta una severa amenaza por el cambio climático global (Ali *et al.*, 2017). Las afectaciones pueden proceder de diversos factores, entre ellos variaciones en la concentración de CO₂, heladas y temperaturas altas, además de sequías e inundaciones (Zinta *et al.*, 2018). Algunos productores de cereales ya se enfrentan a cambios en los regímenes climáticos (Wenng, Bechmann, Krogstad y Skarbøvik, 2020), afrontando principalmente una menor disponibilidad de agua y deterioro en la calidad y salud del suelo. El deterioro y la amplitud de las áreas desertificadas con limitaciones de humedad constituyen un problema de carácter ambiental (Ruiz y Febles, 2004; Morales y Matallo, 2013) que persiste en la actualidad ante el cambio climático. Ante esta realidad, las regiones desérticas y semidesérticas del

mundo deben buscar alternativas de producción de cultivos apropiados.

En el contexto mencionado, se han desarrollado investigaciones científicas enfocadas al estudio de adaptación de cultivos, teniendo como objetivo la producción de plantas con una mejor eficiencia en rendimiento, resistentes a enfermedades y conservando un alto valor nutritivo en condiciones adversas (Beckles y Thitisaksakul, 2014; Wenng *et al.*, 2020; Willick, Tanino y Gusta, 2020). El crecimiento de los cultivos se ve afectado por algún tipo de estrés ya sea de tipo biótico o abiótico provocando consecuencias en cuanto a su fisiología, biomasa (Argentel-Martínez *et al.*, 2017), crecimiento vegetativo (Riaz *et al.*, 2020), metabolismo, calidad, rendimiento (Gholinezhad, Darvishzadeh, Moghaddam y Popović, 2020) e incluso modificaciones genéticas (Lu *et al.*, 2019) ocasionando un impacto económico y humanitario (Thitisaksakul, Jiménez, Arias y Beckles, 2012).

Las zonas áridas son las áreas más rentables en la producción agrícola ya que el 60% de los alimentos de produce en este tipo de superficies, caracterizándose estos sitios por un déficit hídrico, cambios bruscos de temperatura y alta salinidad del suelo (Ayala-Niño *et al.*, 2020). En ambientes adversos se ha estudiado con resultados promisorios el centeno (*Secale cereale*) (López-Córdova *et al.*, 2019). Por otro lado, el centeno es cultivado en diversos lugares del mundo, principalmente en Alemania, Rusia, Ucrania, Turquía y Canadá (Sapirstein y Bushuk, 2016) con el cual se obtienen productos como la harina y el pan de centeno que son altamente apreciados, alcanzando esos productos precios mucho más altos en comparación con aquellos obtenidos de trigo debido a su demanda (Jonsson *et al.*, 2018).

El centeno es reconocido como uno de los cereales más versátiles debido a su alta resistencia a sequías y suelos pobres. Es considerado un cultivo invernal (Linina, Kunkulberga, Kronberga y Locmele, 2019). Su siembra en América Latina es limitada y se destina principalmente a forraje (Wrigley y Bushuk, 2010; Sapirstein y Bushuk, 2016). Tiene una baja demanda en comparación con otros cereales; sin embargo, posee propiedades deseables por su composición química, por lo cual se deben buscar alternativas en el sistema de producción industrial implementando el uso del centeno en los productos alimenticios para darle un papel más importante (Xu *et al.*, 2009; Jonsson *et al.*,

2018). En México, solamente se siembra en el estado de Tlaxcala en superficies muy pequeñas que oscilan de 2 a máximo 25 ha en los últimos años (SIAP, 2020a), por lo que lograr su adaptación y adopción por los agricultores deberá resultar en una oportunidad de desarrollo de gran potencial hasta el momento desaprovechada en el país. Se evitará el exceso de importaciones, consiguiendo un precio más accesible para que una mayor población pueda tener acceso y aprovechar sus beneficios ya que los consumidores están en la búsqueda de alimentos con propiedades favorecedoras a la salud.

La reducción del volumen de agua utilizada en los cultivos es fundamental por lo que se manejó el método de riego por goteo superficial ya que en investigaciones previas en otros cereales se han obtenido mejores resultados en comparación con el riego tradicional (Rao *et al.*, 2017), como lo que presentan Zavala-Borrego *et al.* (2021), que utilizando riego por inundación en cultivo de sorgo el rendimiento disminuye considerablemente. El riego por goteo es muy utilizado en el noroeste mexicano, por lo que esta técnica es recomendada para áreas con poca retención de agua del suelo, falta de agua de lluvias y altas temperaturas (Nieto-Garibay, Murillo, Troyo, Larrinaga y García, 2002; Soto-Mora, 2003). El objetivo de la investigación se centra en estudiar la adaptabilidad del centeno ante el actual cambio climático debido a que los cultivos con tolerancia al estrés ambiental son de las mejores alternativas en la producción de alimentos. La hipótesis de investigación es que el centeno con la menor cantidad de agua de riego presenta un desarrollo, crecimiento, producción agronómica, calidad en la cosecha y características de grano adecuados indicando su capacidad de adaptación al ambiente edafoclímático de la región de la costa de Hermosillo, Sonora, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de Sitio Experimental

La siembra tuvo lugar en el campo agrícola experimental del Departamento de Agricultura y Ganadería de la Universidad de Sonora localizado en el km 21 de la carretera Hermosillo-Bahía de Kino ($29^{\circ} 00' 46.8''$ N, $111^{\circ} 08' 09.9''$ O).

Previo a la siembra, se determinaron las condiciones fisicoquímicas del suelo (Cuadro 1). El contenido

de nitrógeno y fósforo se encontró en nivel medio y bajo respectivamente, por ello se utilizó fosfonitrato (fertilizante proporción 31N:04P:00K, compañía ISAOSA) en una dosis de 150 kg ha^{-1} de nitrógeno (López-Córdova, Rueda, Vargas, Wong y López, 2018), aplicándose un 34% entre las etapas de amacollo-embuche, un 33% en la etapa de llenado de grano y un 33% en etapa de grano maduro. No fue necesaria la aplicación de magnesio, potasio, mejorador químico de suelos o yeso agrícola.

Se utilizó un área de siembra de 336 m^2 ($35 \times 9.6 \text{ m}$) con previo barbecho. La preparación del suelo se realizó mecánicamente con ayuda de una rastra agrícola finalizando con vertederos para la formación de 12 surcos (7 m^2 por surco), los cuales contaron con una separación de 0.8 m consistiendo en dos hileras cada surco.

Siembra

La fecha de siembra fue el 28 de diciembre de 2019 considerándose un cultivo de ciclo invierno-primavera. Se utilizó la semilla de centeno de la variedad denominada Criollo Tlaxcala obtenida del estudio de López-Córdova *et al.* (2018).

Cuadro 1. Propiedades fisicoquímicas del suelo del área experimental.

Table 1. Physicochemical properties of soil in the experimental area.

Variable	Valor obtenido	Nivel adecuado
pH	7.37	7
Conductividad eléctrica (mS cm^{-1})	0.69	1.50
CaCO_3 (mg kg^{-1})	0	<1
% SAT	26.7	20-60
N-NO_3^- (mg kg^{-1})	23.45	30
P-PO_4^{3-} (mg kg^{-1})	10.8	30
Potasio (mg kg^{-1})	541	350
Calcio (mg kg^{-1})	2845	2000
Magnesio (mg kg^{-1})	389	250
Sodio (mg kg^{-1})	340	<200

El suelo presentó una textura franco-arcillo-arenosa con un contenido aproximado de 58% de arena, 22% de limo y 20% de arcilla.

The soil showed loam-clay-sandy texture with an approximate content of 58% sand, 22% silt and 20% clay.

Antes de la siembra, a dicha semilla se le realizó una prueba fisiológica germinativa siguiendo la metodología de ISTA (1996) donde se obtuvo un porcentaje medio de germinación del 86.75% considerándose apto para la siembra. La siembra se realizó de manera manual y a chorillo con una dosis de 120 kg ha⁻¹, depositando la semilla a una profundidad de 5 cm (López-Córdova *et al.*, 2019) con una densidad de siembra de 0.0545 kg por m². Posteriormente los surcos se cubrieron y se nivelaron. Se aplicaron pastillas de rodenticida (Storm®, UK) alrededor del cultivo para evitar la interferencia de roedores de campo durante el desarrollo.

Tipo y Frecuencia de Riego

Se utilizó riego por goteo manejando dos tipos de cintas de goteo: una de gasto por gotero de 0.8 L h⁻¹ modelo EA50604134-1000 (Toro Aqua-Traxx®, EUA) y la otra de gasto por gotero de 1.0 L h⁻¹ modelo Streamline X (NETAFIM®, EUA), siendo la distancia entre goteros de 30 cm con una presión de 11 psi (libras por pulgada cuadrada).

Se utilizaron tres diferentes niveles de riego, donde los surcos con el tratamiento de menor agua contenían la cinta de gasto por gotero de 0.8 L h⁻¹, los surcos con el tratamiento control tenían la cinta de gasto por gotero de 1.0 L h⁻¹, mientras que el tratamiento de mayor agua consistió en la combinación de ambas cintas.

Para la frecuencia y duración de riego de todo el ciclo del cultivo se tomaron en cuenta las etapas fenológicas, así como diferentes factores climáticos como temperaturas mínimas y máximas, humedad relativa, precipitaciones y evapotranspiración (ET₀) del cultivo (los coeficientes de cultivo (K_c) se usaron junto con ET₀ para calcular las tasas de evapotranspiración de cada cultivo para estimar el requerimiento hídrico). Estos datos fueron tomados de la aplicación Remas en la estación climática La Bachata del municipio de Hermosillo (CESAVESON-SIAFESON, 2021).

Se realizó un riego de pre-siembra para generar la humedad adecuada con duración de 17 horas ya incluidas en el total de las láminas de riego. Respecto a la calidad de agua utilizada para los riegos, el nivel de pH fue de 7.03 presentando una C.E. × 10⁶ a 25 °C de 645.46 considerándose adecuados, presentando una calidad C2-S1 (salinidad normal-sodio bajo).

Diseño Experimental y Tratamientos Evaluados

Para la siembra se planteó un diseño experimental de una sola vía y para el resto de las determinaciones se manejó un diseño completamente al azar. Los tratamientos constaron de tres distintas láminas de riego asignados completamente al azar (4 surcos por tratamiento): TMELR = tratamiento de menor lámina de riego correspondiente a 39.3 cm; TC = tratamiento control con una lámina de riego de 42.5 cm y TMALR = tratamiento de mayor lámina de riego de 44.8 cm, considerándose riego inferior, óptimo y en exceso respectivamente.

Cosecha

La cosecha se realizó en la etapa de madurez del cultivo de forma manual utilizando una hoz dentada modelo HP-2 (Truper®, México), depositando las muestras en costales previamente etiquetados para cada unidad experimental hasta su posterior uso. El tratamiento de menor agua presentó una duración de ciclo de 143 días, mientras que el tratamiento control y el tratamiento de mayor agua duraron 160 y 161 días respectivamente.

Determinaciones Fisiológicas del Cultivo

Para todas las determinaciones se tomaron muestras completamente al azar solamente de los dos surcos intermedios de cada tratamiento evitando el “efecto orilla”, considerándose como “parcela útil” 14 m² de los 112 m² por tratamiento (sin contar las separaciones de entre los surcos).

Altura de la planta. Cuando la planta alcanzó la fase de madurez fisiológica (antes de su cosecha), se midieron muestras desde el nivel del suelo de cada unidad experimental hasta el último ápice de la espiga, sin tomar en cuenta las aristas, siguiendo la metodología de Mellado (1997) reportando el valor obtenido en centímetros.

Número de espigas por metro lineal. Para determinar esta variable se siguió la metodología de López-Córdova *et al.* (2018) tomando las muestras antes de la cosecha del cultivo. Primeramente, se midió un metro lineal de superficie y a continuación se tomaron las espigas correspondientes a la unidad de muestreo de forma manual, colocándose dentro de bolsas de polipropileno para su posterior conteo.

Tamaño de espiga. Se determinó con ayuda de un vernier digital (Steren®, México). Se midió desde la parte basal de la espiga hasta la última espiguilla, sin tomar en cuenta las aristas, registrando los resultados obtenidos en centímetros.

Número de granos por espiga. Primero se realizó la desgranada de cada espiga y posteriormente se llevó a cabo el conteo de los granos. Ambos se hicieron de manera manual (Mellado, 1997).

Evaluación de las Propiedades Físicas de Grano Cosechado

Posterior a la cosecha, se realizó la separación de el grano de las espigas, de manera manual. Para la limpieza de los granos se utilizó un tamiz de aluminio con perforaciones ovaladas (No. 4½ / 64" × ½") (Seedburo Equipment Company®, EUA) apoyándose con una sopladora eléctrica modelo WD 250-S3 (Koblenz®, EUA) para remover impurezas. Inmediatamente los granos se colocaron en los costales correspondientes y se llevaron a un congelador modelo Frigidaire Gallery GLFC1526FW1 (Electrolux Home Products, Inc.®, EUA) hasta la realización de los respectivos análisis.

Tamaño de grano. Se determinó utilizando un vernier digital (Steren®), midiendo la longitud y el ancho de los granos. Los valores se registraron en milímetros.

Evaluación del color. Para evaluar el color superficial de el grano se utilizó un colorímetro modelo CR-400 (Konica Minolta Sensing Americas, Inc.®, EUA) siguiendo la metodología oficial Cc 13e-92 de la AOCS (2000). Los granos se colocaron en una placa petri llenándose en su totalidad, posteriormente se cubrieron con sus tapaderas correspondientes y se realizaron diez disparos aleatorios a diferentes puntos de cada placa (Matus-Cádiz, Hucl, Perron y Tyler, 2003), obteniéndose los parámetros L, a y b.

Peso de 1000 granos. Se utilizó una balanza analítica digital modelo Adventurer AR2140 (Ohaus Corp.®, EUA), donde se pesaron cuatro réplicas de 100 granos de cada tratamiento, las cuales se promediaron y multiplicaron por diez, siguiendo la metodología de López-Córdova *et al.* (2018). El peso final fue registrado en gramos.

Peso hectolítrico. Se determinó mediante el método oficial 55-10.01 de la AACC (2000) utilizando una balanza/computadora de peso de grano modelo 8350 (Seedburo Equipment Company®, EUA) registrándose directamente en unidades de kg hL⁻¹.

Rendimiento de grano. Se obtuvo siguiendo la metodología de López-Córdova *et al.* (2018), donde el peso de grano cosechado (g) se dividió entre la superficie cosechada (m²). El resultado fue reportado en toneladas por hectárea.

Evaluación de las Propiedades Químicas de Grano Cosechado

Para las siguientes determinaciones se utilizó una muestra de granos procesada en un molino modelo GX4100 (KRUPS®, México).

Contenido de cenizas. Se determinó de acuerdo con el método oficial 08-01 de la AACC (2000) utilizando una mufla modelo 3-550 (Neycraft Vulcan®, EUA) a 550 °C por 5 h. El resultado se expresó en porcentaje.

Contenido de proteínas. Se estableció mediante el método oficial 46-13 de la AACC (2000) (micro-Kielsahl) utilizando un digestor modelo MM2313E (Electrothermal Barnsted®) y un destilador rápido modelo RAPIDSTILL I (Labconco®). Se utilizó un factor de conversión de 6.2 en los cálculos para determinar el porcentaje de proteína de las muestras (Wrigley y Bushuk, 2010).

Análisis Estadístico

El análisis de resultados se llevó a cabo con el paquete estadístico Infostat para Windows® versión 2021. Se realizó un análisis de varianza, así como una evaluación de los efectos significativos entre los tratamientos por medio de una prueba de comparación de medias por Tukey ($P < 0.05$) para las determinaciones químicas y para el resto de las determinaciones se utilizó la prueba de Duncan ($P < 0.05$ y $P \leq 0.0001$). Todas las determinaciones se realizaron por triplicado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Determinaciones Fisiológicas del Cultivo

Respecto a la altura de la planta, el tratamiento con menor lámina de riego (TMELR) presentó un aumento de tamaño del 1.7% respecto al tratamiento control (TC). Mientras que el tratamiento con mayor lámina de riego (TMALR) presentó el valor más bajo siendo estadísticamente diferente al TC disminuyendo un 8.29% de altura de la planta (Cuadro 2).

Cuadro 2. Efecto en la fisiología del cultivo de centeno por los diferentes niveles de agua de riego utilizados.**Table 2. Effect on physiology of rye crop by different irrigation levels used.**

Tratamientos	AP cm	NEPML	TE cm	NGPE
TMALR	140.99 ± 14.66 b	253.50 ± 8.80 a [†]	13.75 ± 1.80 a	57.23 ± 9.34 b
TC	153.75 ± 14.73 a	229.67 ± 11.15 b	13.17 ± 1.80 b	54.25 ± 10.56 c
TMELR	156.37 ± 7.77 a	247.67 ± 21.27 ab	13.99 ± 1.79 a	59.81 ± 10.52 a
Significancia	**	*	**	**

[†] Medias con letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Duncan (* = $P < 0.05$ y ** = $P \leq 0.0001$). AP = altura de la planta; NEPML = número de espigas por metro lineal; TE = tamaño de la espiga; NGPE = número de granos por espiga; TMALR = tratamiento con mayor lámina de riego; TC = tratamiento control; TMELR = tratamiento con menor lámina de riego.

[†] Means with different letters in the same column indicate significant differences according to Duncan's test (* = $P < 0.05$ and ** = $P \leq 0.0001$). AP = plant height; NEPML = number of spikes per linear meter; TE = spike size; NGPE = number of grains per spike; TMALR = treatment with higher irrigation; TC = control treatment; TMELR = treatment with less irrigation.

Los valores encontrados en el presente estudio fueron superiores a los reportados por López-Córdova *et al.* (2018), quienes indican valores de 139.09 cm para la altura de la planta del cultivo de centeno sembrado en la costa de Hermosillo, Sonora, así mismo para los valores de 101.93 cm reportados por Murillo, Escobar, Fraga y Pargas (2001) en el cultivo desarrollado en Baja California Sur. Sin embargo, aunque la planta puede superar los 180 cm de altura (Mellado, Matus y Madariaga, 2008), cabe aclarar que una gran altura no es conveniente debido a que la planta puede presentar problema de acame (Murillo *et al.*, 2001), además, la planta puede estar utilizando el agua y los nutrientes solamente para el desarrollo del tallo más no para el desarrollo de los granos.

En relación con el número de espigas por metro lineal, en comparación con el TC, el TMALR presentó un incremento del 10.37% mientras que el TMELR mostró un aumento del 7.83% (Cuadro 2). Se encontraron valores más altos comparándose con las medias de López-Córdova *et al.* (2018) y Kuzminykh, Pashkova y Novoselov (2020). En el cultivo de cebada (*Hordeum vulgare*), el número de espigas por metro lineal se ha visto significativamente afectado por sequía (González-Rodríguez, 2004). Además, esta variable se correlaciona significativamente con el rendimiento, ya que a medida que aumenta el número de espigas, puede resultar en un aumento en el número de granos y por ende se obtendría un mayor rendimiento (Zapata, Silva y Acevedo, 2004).

Respecto al tamaño de la espiga, en comparación con el TC, el TMELR presentó un incremento del 6.22%, mientras que el TMALR presentó un aumento del 4.40%, siendo ambos estadísticamente diferentes al TC (Cuadro 2). Respecto a esta variable también se presentaron valores mayores comparándose con los valores promedio de López-Córdova *et al.* (2018) y Kuzminykh *et al.* (2020). A pesar de lo mencionado anteriormente, se observa en los resultados que no se presentó un efecto sobre el tamaño de la espiga por la altura de la planta ni por el estrés hídrico y altas temperaturas presentadas durante el desarrollo del cultivo. Esto a diferencia de Baeza-Flores, Del Pozo y Méndez (2017¹) quienes señalaron las afectaciones directas y significativas en el tamaño de la espiga del trigo, del triticale y de la cebada por las situaciones adversas de estrés hídrico y alta temperatura.

Al respecto, Hoffman y Viega (2011) mencionan que tanto en déficit como en exceso de agua existen restricciones que interactúan con algunos factores reductores de rendimiento como lo es el contenido de granos por espiga en cereales como el trigo y la cebada; por lo que, en último término en cuanto a las determinaciones fisiológicas del cultivo, se exhibe esta variable, donde se presentan diferencias significativas entre los tres tratamientos provocados por el efecto de la cantidad de agua utilizada. El TMELR presentó un incremento de granos por espiga del 10.24%, seguido del TMALR con un aumento del 5.49% en comparación con el tratamiento control que

¹ Baeza-Flores, J. A., Del Pozo-Lira, A., & Méndez-Espinoza, A. M. (2017). *Efecto del estrés hídrico en cuatro especies de cereales en condiciones semicontroladas (invernadero)*. Tesis Doctoral. Escuela de Agronomía, Universidad de Talca (Chile).

fue el que presentó el menor número de granos por espiga (Cuadro 2).

Asimismo, cabe destacar que el TMELR presentó mayores valores en comparación con lo obtenido por López-Córdova *et al.* (2018) aplicando el mismo nivel de fertilización. Igualmente, se presentaron valores dentro del rango que presenta Mellado *et al.* (2008) en las líneas de centeno mejorado mediante mutación genética.

Evaluación de las Propiedades Físicas de Grano Cosechado

Respecto al tamaño de grano, los tamaños de granos de los tres tratamientos se encontraron dentro de los rangos medios reportados por Mellado *et al.* (2008). Se destaca, que el grano correspondiente al TMELR presenta un incremento de tamaño del 2.5% en general (largo y ancho) en comparación con el tratamiento control (Cuadro 3). Esta variable, junto con el número de granos por espiga, es de gran importancia debido a que son factores limitantes en la determinación del rendimiento final en los cultivos (González-Rodríguez, 2004).

Se conoce que las deficiencias de humedad por sequía en el cultivo durante el llenado de grano pueden disminuir la fotosíntesis y la disponibilidad de carbohidratos para la formación de grano (López-Castañeda, 2011). De modo que al presentarse un estrés hídrico posterior a la fase de antesis se reduce la asimilación del CO₂ por el cierre de estomas reduciendo la disponibilidad de asimilados para el llenado de

los granos (Saeidi y Abdoli, 2015). Ello significa en general una afectación negativa en el tamaño de grano (Ji *et al.*, 2010). A pesar de todo esto se observa en los resultados obtenidos que una reducción de agua de riego durante el desarrollo del cultivo no afectó en gran medida el tamaño de grano (Cuadro 3).

Sobre el color de el grano, los tres tratamientos presentaron el mismo comportamiento, aunque el TMELR presentó diferencias significativas en comparación con los otros dos tratamientos en los tres parámetros (Cuadro 3). El TMELR presentó la menor luminosidad con una disminución del 11.25%. Sin embargo, presentó la misma tendencia de presentar los colores: rojo (+a) y amarillo (+b) como el tratamiento control y el de mayor humedad. Además, se encontró una misma tendencia en los valores medio de Zykin, Andreeva, Tsvetkova y Voylokov (2020) (L: 40-49, a: 2-4 y b: 8-16) en diferentes líneas de centeno. Se enfatiza el color de grano con su dependencia a la variedad, la región del cultivo y las condiciones de la cosecha, acentuando el color amarrillo-marrón o amarillo-grisáceo característico (Han *et al.*, 2015; Sapirstein y Bushuk, 2016), donde la amarillez puede estar relacionada a los pigmentos carotenoides presentes en el salvado de grano (Yilmaz, 2004).

Respecto al peso de 1000 granos, el TMELR presentó una disminución del 6.37% en comparación con el tratamiento control. Mientras que los valores de TMALR mantuvieron valores similares al TC (Cuadro 4). Sin embargo, en comparación con otros estudios se obtuvieron valores por debajo de las medias presentadas, como lo reportado por Mellado

Cuadro 3. Efecto en las propiedades físicas del grano de centeno por los diferentes niveles de riego utilizados.

Table 3. Effect on physical properties of rye grain by different irrigation levels used.

Tratamientos	Tamaño		Color		
	LA	AN	L	a	b
----- mm -----					
TMALR	8.40 ± 0.64 b [†]	2.48 ± 0.21 b	45.66 ± 1.50 a	3.02 ± 0.32 a	9.52 ± 0.61 a
TC	8.25 ± 0.51 c	2.53 ± 0.19 a	45.83 ± 1.63 a	3.05 ± 0.38 a	9.63 ± 0.76 a
TMELR	8.55 ± 0.60 a	2.50 ± 0.20 b	40.67 ± 2.38 b	2.50 ± 0.33 b	7.34 ± 1.09 b
Significancia	**	*	**	**	**

[†] Medias con letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Duncan (* = P < 0.05 y ** = P ≤ 0.0001). LA = largo; AN = ancho; L = luminosidad; +a = rojo y -a = verde; b: +b = amarillo y -b = azul. TMALR = tratamiento con mayor lámina de riego; TC = tratamiento control; TMELR = tratamiento con menor lámina de riego.

[†] Means with distinct letters in the same column indicate significant differences according to Duncan's test (* = P < 0.05 and ** = P ≤ 0.0001). LA = length, AN = width; L = lightness; a: +a = red and -a = green; b: +b = yellow and -b = blue; TMALR = treatment with higher irrigation; TC = control treatment; TMELR = treatment with less irrigation.

et al. (2008), Tupits (2008), Kunkulberga, Linina, Kronberga, Kokare y Lenenkova (2017), López-Córdova *et al.* (2018) y Kuzminykh *et al.* (2020). Todo esto parece confirmar lo mencionado por Chmielewski y Köhn (2000), que esta variable específicamente en centeno se ve influenciada negativamente por la presencia de altas temperaturas y sequía durante la etapa de maduración. Así mismo, González-Rodríguez (2004) en un estudio en cebada señala que la sequía y las altas temperaturas durante la iniciación floral y floración puede afectar esta variable debido a que dificultan la conversión de sacarosa a almidón en el endospermo afectando directamente el peso de grano.

Respecto al peso hectolítico, en el análisis de varianza no se encontró diferencia significativa, por lo que no se infiere un efecto debido al tratamiento de riego en esta variable. Aun así, los valores de los tres tratamientos fueron estadísticamente similares entre ellos (Cuadro 4).

Comparándose con otras investigaciones se tienen valores cercanos a ellos que van del rango de 63 a 74.40 kg hL⁻¹ como Mellado *et al.* (2008), Wrigley y Bushuk (2010), Peratoner *et al.* (2016) y López-Córdova *et al.* (2019). Cabe destacar que el peso hectolítico está relacionado con el tamaño y el peso de grano, además, entre mayor sea el peso de grano mayor será el rendimiento (De la O-Olán *et al.*, 2012).

Cuadro 4. Efecto sobre el peso de 1000 granos, el peso hectolítico y el rendimiento del cultivo de centeno por los diferentes niveles de riego utilizados.

Table 4. Effect on weight of 1000 grains, the hectolitic weight, and the yield of rye crop by different irrigation levels used.

Tratamientos	PMG	PH	REND
	g	kg hL ⁻¹	Mg ha ⁻¹
TMALR	32.31 ± 1.76 a [†]	66.80 ± 1.01	3.43 ± 0.15 a
TC	32.65 ± 0.93 a	66.53 ± 1.00	2.70 ± 0.23 c
TMELR	30.57 ± 1.62 b	66.01 ± 0.68	2.99 ± 0.25 b
Significancia	**	NS	**

[†] Medias con letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Duncan ($P \leq 0.0001$) y NS = no significativo. PMG = peso de 1000 granos; PH = peso hectolítico; REND = rendimiento; TMALR = tratamiento con mayor lámina de riego; TC = tratamiento control; TMELR = tratamiento con menor lámina de riego.

[†] Means with distinct letters in the same column indicate significant differences according to Duncan's test ($P \leq 0.0001$) and NS = non-significant. PMG = 1000-kernel weight; PH = hectolitre weight; REND = yield; TMALR = treatment with higher irrigation; TC = control treatment; TMELR = treatment with less irrigation.

Con respecto a la variable de rendimiento, se observaron efectos significativos entre los tratamientos evaluados. El TMALR presentó el valor más alto con un aumento del 26.56% seguido del TMELR con un incremento del 10.33% en comparación con el TC (Cuadro 4). Estos resultados confirman la relación de esta variable con el número de granos por espiga ya que se siguió el mismo comportamiento de los tratamientos, lo cual significa que a mayor número de granos se obtiene un mayor rendimiento (Dolferus, Ji y Richards, 2011). Al respecto, los rendimientos obtenidos en los tres tratamientos estudiados fueron superiores a las medias reportadas por Murillo *et al.* (2001), López-Córdova *et al.* (2018), Kornecki y Balkcom *et al.* (2020), Kuzminykh *et al.* (2020) y a las estadísticas de producción agrícola SIAP (2020b).

Evaluación de las Propiedades Químicas de Grano Cosechado

Referente al contenido de cenizas de el grano, se observó una relación de que, a mayor agua de riego utilizada, mayor es el contenido de cenizas de grano. Por lo tanto, el TMELR mostró una disminución del 4.54% del contenido de cenizas (Cuadro 5). Sin embargo, no se presenta una diferencia estadística en comparación con el tratamiento control.

Cuadro 5. Efecto en las propiedades químicas del grano de centeno por los diferentes niveles de riego utilizados.

Table 5. Effect on chemical properties of rye grain by different irrigation levels used.

Tratamientos	CEN	PROT
	- - - - - % - - - - -	
TMALR	2.00 ± 0.01 a [†]	20.13 ± 0.49
TC	1.98 ± 0.03 ab	19.52 ± 0.09
TMELR	1.89 ± 0.07 b	20.23 ± 0.70
Significancia	*	NS

[†] Medias con letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ($P < 0.05$) y NS = no significativo. CEN = contenido de cenizas; PROT = contenido de proteína; TMALR = tratamiento con mayor lámina de riego; TC = tratamiento control; TMELR = tratamiento con menor lámina de riego.

[†] Means with distinct letters in the same column indicate significant differences according to Tukey's test ($P < 0.05$) and NS = non-significant. CEN = ashes content; PROT = protein content; TMALR = treatment with higher irrigation; TC = control treatment; TMELR = treatment with less irrigation.

Este valor es importante a destacar, ya que comúnmente se utiliza el grano completo de centeno para la elaboración de la harina debido a que la separación de las partes periféricas de grano como el salvado y el germen durante la molienda es muy complicado (FAO, 2018). Esto nos lleva a obtener mayores beneficios por ser una harina 100% integral (Hussain, Iqbal, Khan y Shah, 2020). De esta forma aporta mayor contenido de fibra dietética, pudiendo tener implicaciones positivas para la salud como reducción del riesgo de algunos tipos de cáncer, así como el nivel de colesterol en sangre, previniendo enfermedades cardiovasculares, diabetes tipo 2 y sobrepeso (Hansen, Møller, Andersen, Jørgensen y Hansen, 2004; Jonsson *et al.*, 2018; Hussain *et al.*, 2020).

Los compuestos proteicos de los cereales pueden localizarse en todo el grano. Sin embargo, la mayor cantidad se encuentra en el germen y la capa aleurona (Serna-Saldívar, 2013). A pesar de que entre los tres tratamientos utilizados en este estudio no se presentaron diferencias significativas, el TMALR presentó un aumento de un 3.12% en comparación con el TC, mientras que el TMELR presentó un incremento mayor del 3.63% (Cuadro 5).

Además del incremento entre los tratamientos, en comparación con el estudio de López-Córdova *et al.* (2019), se presentaron mayores valores utilizando el mismo nivel de fertilización y la misma variedad de semilla. De igual modo, se obtuvieron valores mayores en comparación con otros estudios donde utilizan diferentes variedades de centeno, incluidos cultivos híbridos y populares como Hansen *et al.* (2004) (8.6-11.3%, con la misma dosis de fertilizante de 150 kg ha⁻¹), Laidig *et al.* (2017) (medias entre 9.7 y 10.9%) y Linina *et al.* (2019) (medias entre 7.7 y 13.1%). Igualmente, comparados con Nordlund *et al.* (2013) (12.9%) y Kunkulberga *et al.* (2017) (8-12.3%), se tienen mayores valores en los tres tratamientos. Todo esto reafirma lo mencionado por Elbasyoni, Morsy, Ramamurthy y Nassar (2018), quienes señalan que, en trigo, por ejemplo, un déficit de agua afecta positivamente el contenido de proteínas. De la misma manera Serna-Saldívar (2013) confirma este efecto ya que a pesar de que se generen bajos rendimientos de grano debido a sequías aumenta la proporción de proteínas y secalinas en el grano.

CONCLUSIONES

La disminución de la cantidad de agua de riego no presentó afectaciones negativas mayores al cultivo. Se obtuvieron valores positivos respecto a la fisiología de la planta destacando un aumento en la cantidad y tamaño de las espigas, así como mayor número de granos por espiga. Además, las propiedades físicas de grano presentaron un incremento de tamaño conservando el color amarillo/rojizo/grisáceo característico. A pesar de que se presentó una disminución en el peso de los granos no se afectó el rendimiento de grano ya que respecto al tratamiento control se presentó un incremento de esta variable. El centeno es un cereal versátil y se ha logrado aclimatar a las condiciones de disminución de agua y a las temperaturas características de la zona de siembra. Se recomienda realizar determinaciones fisicoquímicas y nutricionales al grano para corroborar la aclimatación del cultivo al ambiente edafo-climático del territorio y que la implementación de la siembra en la región de Sonora presente mayores beneficios al consumidor.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: L.C.S.Y., G.A.L.A. y J.P.L.C.
Metodología: L.C.S.Y. y J.P.L.C. Software: L.C.S.Y.
Validación: G.A.L.A., J.L.G.H. Análisis formal:

L.C.S.Y., G.A.L.A y J.L.G.H. Investigación: L.C.S.Y., G.A.L.A., J.P.L.C. y J.L.G.H. Recursos: L.C.S.Y. y G.A.L.A. Curación de datos: L.C.S.Y. Escritura: preparación del borrador original: LCSY. Escritura: revisión y edición: J.L.G.H., G.A.L.A., F.R.F., L.A.B.P. y J.T. Visualización: L.C.S.Y. y G.A.L.A. Supervisión: G.A.L.A. y J.L.G.H. Administración del proyecto: L.C.S.Y., G.A.L.A. y J.P.L.C.; Adquisición de fondos: G.A.L.A.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al M.C. Ramón Dolores Valdez Domínguez por el apoyo del cuidado y mantenimiento del cultivo. A la M.C. Cindy Verónica Padilla Torres, I.Q. Carlos Armando García Puebla, M.C. Oscar David Silgado Vega y al Ing. Marco Antonio Carretas García por su apoyo en la siembra, cosecha y limpieza del cultivo.

LITERATURA CITADA

- AACC (American Association of Cereal Chemists). (2000). *Approved Methods of the AACC*. 10th Edition. St. Paul, MI, USA: American Association of Cereal Chemists.
- Ali, S., Liu, Y., Ishaq, M., Shah, T., Abdullah, Ilyas, A., & Din, I. U. (2017). Climate change and its impact on the yield of major food crops: Evidence from Pakistan. *Foods*, 6(6), 39. <https://doi.org/10.3390/foods6060039>
- AOCS (American Oil Chemists Society). (2000). *Official Methods and Recommended Practices of the AOCS*. Method Cc 13e-92. Urbana, IL, USA: AOCS.
- Argentel-Martínez, L., Garatuza-Payán, J., Armendáriz-Ontiveros, M. M., Yépez-González, E. A., Arredondo-Moreno, J. T., & González-Aguilera, J. (2017). Estrés térmico en cultivo del trigo. Implicaciones fisiológicas, bioquímicas y agronómicas. *Cultivos Tropicales*, 38(1), 57-67.
- Ayala-Niño, F., Maya-Delgado, Y., García-Calderón, N. E., Olmedo, G., Guevara, M., & Troyo-Diéz, E. (2020). Spatial distribution of soil carbon storage in desert shrubland ecosystems of northwest Mexico. *Journal of Arid Environments*, 183, 104251. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104251>
- Beckles, D. M., & Thitisaksakul, M. (2014). How environmental stress affects starch composition and functionality in cereal endosperm. *Starch-Stärke*, 66(1-2), 58-71. <https://doi.org/10.1002/star.201300212>
- CESAVESON-SIAFESON (Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Sonora- Sistema de Alerta Fitosanitaria del Estado de Sonora). (2021). *REMAS-Red de estaciones meteorológicas automáticas de sonora. estación meteorológica de la costa de Hermosillo: LA BACHATA*. Consultado el 09 de enero, 2021, desde <https://www.siafeson.com/remas/index.php/estacionglobal?rid=94>
- Chmielewski, F. M., & Köhn, W. (2000). Impact of weather on yield components of winter rye over 30 years. *Agricultural and Forest Meteorology*, 102(4), 253-261. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00125-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00125-8)
- De la O-Olán, M., Espitia-Rangel, E., López-Sánchez, H., Villaseñor-Mir, H. E., Peña-Bautista, R. J., & Herrera-Hernández, J. (2012). Calidad física de grano de trigos harineros (*Triticum aestivum* L.) mexicanos de temporal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(2), 271-283.
- Dolferus, R., Ji, X., & Richards, R. A. (2011). Abiotic stress and control of grain number in cereals. *Plant Science*, 181(4), 331-341. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.05.015>
- Elbasyni, I. S., Morsy, S. M., Ramamurthy, R. K., & Nassar, A. M. (2018). Identification of genomic regions contributing to protein accumulation in wheat under well-watered and water deficit growth conditions. *Plants*, 7(3), 56. <https://doi.org/10.3390/plants7030056>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2018). *Consejo. Propuesta para un año internacional del centeno*. Consultado el 09 de enero, 2021, desde <http://www.fao.org/3/my363es/MY363ES.pdf>
- Gholinezhad, E., Darvishzadeh, R., Moghaddam, S. S., & Popović-Djordjević, J. (2020). Effect of mycorrhizal inoculation in reducing water stress in sesame (*Sesamum indicum* L.): The assessment of agrobiochemical traits and enzymatic antioxidant activity. *Agricultural Water Management*, 238, 106234. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106234>
- González-Rodríguez, Á. (2004). *Estudio de caracteres fenológicos, agronómicos, morfológicos y fisiológicos en relación con la tolerancia al estrés hídrico en cebada*. Tesis para optar al Grado de Doctor en Ciencias Biológicas. Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Biológicas. Madrid, España: Servicio de Publicaciones. ISBN: 84-669-1696-2.
- Han, O. -K., Hwang, J. -J., Park, H. -H., Kim, D. -W., Oh, Y. -J., Park, T. -I., ... Park, K. -G. (2015). A New High Grain Yielding Forage Rye Cultivar. *Journal of the Korean Society of Grassland and Forage Science*, 35(2), 105-111. <https://doi.org/10.5333/kgfs.2015.35.2.105>
- Hansen, H. B., Møller, B., Andersen, S. B., Jørgensen, J. R., & Hansen, Å. (2004). Grain characteristics, chemical composition, and functional properties of rye (*Secale cereale* L.) as influenced by genotype and harvest year. *Journal of agricultural and food chemistry*, 52(8), 2282-2291. <https://doi.org/10.1021/jf0307191>
- Hoffman, E., & Viega, L. (2011). Caracterización preliminar de cultivares de trigo y cebada por su comportamiento al estrés hídrico. En A. Castro, E. Hoffman, & L. Viega (Eds.). *Limitaciones para la productividad de trigo y cebada* (pp. 53-57). Montevideo, Uruguay: CYTED.
- Hussain, A., Iqbal, A., Khan, Z. H., & Shah, F. (2020). Introductory Chapter: Recent advances in grain crops research. In F. Shah, Z. Khan, A. Iqbal, M. Turan, & M. Olgun (Eds.). *Recent advances in grain crops research* (pp. 1). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90701>
- ISTA (International Seed Testing Association). (1996). *International rules for seed testing 1996*. Seed Science and Technology 27(Suppl.). Zürich, Switzerland: ISTA.

- Ji, X., Shiran, B., Wan, J., Lewis, D. C., Jenkins, C. L. D., Condon, A. G., Richards, R. A., & Dolferus, R. (2010). Importance of pre-anthesis anther sink strength for maintenance of grain number during reproductive stage water stress in wheat. *Plant, Cell y Environment*, 33(6), 926-942. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2010.02130.x>
- Jonsson, K., Andersson, R., Knudsen, K. E. B., Hallmans, G., Hanhineva, K., Katina, K., ... Landberg, R. (2018). Rye and health-Where do we stand and where do we go? *Trends in Food Science & Technology*, 79, 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.06.018>
- Kornecki, T. S., & Balkcom, K. S. (2020). Organic kale and cereal rye grain production following a sunn hemp cover crop. *Agronomy*, 10(12), 1913. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121913>
- Kunkulberga, D., Linina, A., Kronberga, A., Kokare, A., & Lenenkova, I. (2017). Grain quality of winter rye cultivars grown in Latvia. In E. Straumite, & R. Galoburda (Eds.). *The 11th Baltic Conference on Food Science and Technology: "Food science and technology in a changing world", Foodbalt-2017. Conference Proceedings* (pp. 121-125). Jelgava, Latvia: Latvia University of Agriculture. <https://doi.org/10.22616/foodbalt.2017.015>
- Kuzminykh, A. N., Pashkova, G. I., & Novoselov, S. I. (2020). Influence of processing of crops of a winter rye by growth factors on crop productivity and grain quality. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 421(2), 022070. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/421/2/022070>
- Laidig, F., Piepho, H. P., Rentel, D., Drobek, T., Meyer, U., & Huesken, A. (2017). Breeding progress, variation, and correlation of grain and quality traits in winter rye hybrid and population varieties and national on-farm progress in Germany over 26 years. *Theoretical and Applied Genetics*, 130(5), 981-998. <https://doi.org/10.1007/s00122-017-2865-9>
- Linina, A., Kunkulberga, D., Kronberga, A., & Locmele, I. (2019). Winter rye grain quality of hybrid and population cultivars. *Agronomy Research*, 17(S2), 1380-1389. <https://doi.org/10.15159/AR.19.058>
- López-Castañeda, C. (2011). Variación en rendimiento de grano, biomasa y número de granos en cebada bajo tres condiciones de humedad del suelo. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(3), 907-918.
- López-Córdova, J. P., Rodríguez-Félix, F., Wong-Corral, F. J., Ramírez-Reyes, F., Rueda-Puente, E. O., & López-Ahumada, G. A. (2019). Influence of fertilization on yield and quality of rye grain in the arid zone of Sonora, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(6), 1219-1230. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i6.787>
- López-Córdova, J. P., Rueda-Puente, E. O., Vargas-López, J. M., Wong-Corral, F. J., & López-Ahumada, G. A. (2018). Rendimiento y calidad de grano en centeno (*Secale cereale L.*) bajo diferentes condiciones de fertilización en el estado de Sonora, México. *Biotecnia*, 20(3), 76-82. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v20i3.716>
- Lu, H., Hu, Y., Wang, C., Liu, W., Ma, G., Han, Q., & Ma, D. (2019). Effects of high temperature and drought stress on the expression of gene encoding enzymes and the activity of key enzymes involved in starch biosynthesis in wheat grains. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1414. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01414>
- Matus-Cádiz, M. A., Hucl, P., Perron, C. E., & Tyler, R. T. (2003). Genotype × environment interaction for grain color in hard white spring wheat. *Crop Science*, 43(1), 219-226. <https://doi.org/10.2135/cropsci2003.2190>
- Mellado Z., M. (1997). Rendimiento de grano y paja e índice de cosecha de trigos hermanos (*Triticum aestivum L.*) de diferente altura. *Agricultura Técnica (Chile)*, 57(2), 96-101.
- Mellado Z., M., Matus T., I., & Madariaga B., R. (2008). *Antecedentes sobre el centeno en Chile y otros países*. Boletín INIA no. 182. Chillán, Ñuble, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Morales, C., & Matallo, H. (2013). Dos métodos para estimar los costos de la desertificación en América Latina. *Zonas Áridas*, 15(2), 390-401. <https://doi.org/10.21704/za.v15i2.127>
- Murillo, B., Escobar, A., Fraga, H., & Pargas, R. (2001). Rendimiento de grano y forraje de líneas de triticale y centeno en Baja California Sur, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 24(2), 145-153.
- Nieto-Garibay, A., Murillo-Amador, B., Troyo-Diéguez, E., Larrinaga-Mayoral, J. Á., & García-Hernández, J. L. (2002). El uso de compostas como alternativa ecológica para la producción sostenible del chile (*Capsicum annuum L.*) en zonas áridas. *Interciencia*, 27(8), 417-421.
- Nordlund, E., Heinio, R. L., Viljanen, K., Pihlava, J. M., Lehtinen, P., & Poutanen, K. (2013). Flavour and stability of rye grain fractions in relation to their chemical composition. *Food Research International*, 54(1), 48-56. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.05.034>
- Peratoner, G., Seling, S., Klotz, C., Florian, C., Figl, U., & Schmitt, A. O. (2016). Variation of agronomic and qualitative traits and local adaptation of mountain landraces of winter rye (*Secale cereale L.*) from Val Venosta/Vinschgau (South Tyrol). *Genetic Resources and Crop Evolution*, 63(2), 261-273. <https://doi.org/10.1007/s10722-015-0245-3>
- Rao, K. V. R., Gangwar, S., Keshri, R., Chourasia, L., Bajpai, A., & Soni, K. (2017). Effects of drip irrigation system for enhancing rice (*Oryza sativa L.*) yield under system of rice intensification management. *Applied Ecology Environmental Research*, 15(4); 487-495. https://doi.org/10.15666/aeer/1504_487495
- Riaz, S., Kirn, A., Rehman, A. U., Kaukab, S., Rafique, M., Tahir, A., Saleem, U., & Ijaz, S. (2020). Evaluating the morphological and yield traits of Lentil (*Lens culinaris L.*) advance lines under water stress condition. *Life Science Journal*, 17(5). <https://doi.org/10.7537/marslsj170520.01>
- Ruiz, T., & Febles, G. (2004). La desertificación y la sequía en el mundo. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 8(2), 1-12.
- Saeidi, M., & Abdoli, M. (2015). Effect of drought stress during grain filling on yield and its components, gas exchange variables, and some physiological traits of wheat cultivars. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 17(4), 885-898.
- Sapirstein, H. D., & Bushuk, W. (2016). Rye grain: Its genetics, production, and utilization. *Encyclopedia of Food Grains*, 1, 159-167. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-394437-5.00017-6>
- Serna-Saldívar, S. R. O. (2013). *Química, almacenamiento e industrialización de los cereales*. México D.F.: Agt Editor.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2020a). *Datos abiertos. Estadística de producción agrícola*. Consultado el 09 de enero, 2021, desde <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>

- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2020b). *Producción agrícola*. Consultado el 14 de septiembre, 2021, desde <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agradera-33119>
- Soto-Mora, C. (2003). La agricultura comercial de los distritos de riego en México y su impacto en el desarrollo agrícola. *Investigaciones Geográficas*, 50, 173-195.
- Thitisaksakul, M., Jiménez, R. C., Arias, M. C., & Beckles, D. M. (2012). Effects of environmental factors on cereal starch biosynthesis and composition. *Journal of Cereal Science*, 56(1), 67-80. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.04.002>
- Tupits, I. (2008). Yield and quality of winter rye in trials at the Jõgeva PBI. *Latvian Journal of Agronomy*, 11, 165-171.
- Wennng, H., Bechmann, M., Krogstad, T., & Skarbøvik, E. (2020). Climate effects on land management and stream nitrogen concentrations in small agricultural catchments in Norway. *Ambio*, 49(11), 1747-1758. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01359-z>
- Willick, I. R., Tanino, K. K., & Gusta, L. V. (2021). The impact of global climate change on the freezing tolerance of winter cereals in Western Canada. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 207(1), 88-99. <https://doi.org/10.1111/jac.12447>
- Wrigley, C. W., & Bushuk, W. (2010). Rye and triticale: characteristics and quality requirements. In C. W. Wrigley, & I. L. Batey (Eds.). *Cereal grains* (pp. 112-140). Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845699529.2.112>
- Xu, J., Frick, M., Laroche, A., Ni, Z. F., Li, B. Y., & Lu, Z. X. (2009). Isolation and characterization of the rye Waxy gene. *Genome*, 52(7), 658-664. <https://doi.org/10.1139/G09-036>
- Yilmaz, I. (2004). Effects of rye bran addition on fatty acid composition and quality characteristics of low-fat meatballs. *Meat Science*, 67(2), 245-249. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2003.10.012>
- Zapata, C., Silva, P., & Acevedo, E. (2004). Comportamiento de isolíneas de altura en relación con el rendimiento y distribución de asimilados en trigo. *Agricultura Técnica*, 64(2), 139-155. <https://doi.org/10.4067/S0365-28072004000200003>
- Zavala-Borrego, F., Reyes-González, A., Álvarez-Reyna, V. de P., García-Carrillo, M., Rodríguez-Moreno, V. M., & Preciado-Rangel, P. (2021). Efecto de diferentes niveles de evapotranspiración sobre área foliar, temperatura superficial, potencial hídrico y rendimiento en sorgo forrajero. *Terra Latinoamericana*, 39, 1-14. e954. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.954>
- Zinta, G., AbdElgawad, H., Peshev, D., Weedon, J. T., Van den Ende, W., Nijls, I., ... Asard, H. (2018). Dynamics of metabolic responses to periods of combined heat and drought in *Arabidopsis thaliana* under ambient and elevated atmospheric CO₂. *Journal of Experimental Botany*, 69(8), 2159-2170. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery055>
- Zykin, P. A., Andreeva, E. A., Tsvetkova, N. V., & Voylokov, A. V. (2020). Anatomical and image analysis of grain coloration in rye. *Preprints*, 2020110530. <https://doi.org/10.20944/preprints202011.0530.v1>