

Gradiente de humedad en el comportamiento agronómico del centeno cultivado en ambiente de zonas áridas

Moisture gradient on the agronomic performance of rye cropped in arid land environment

Lorena Carolina Sosa-Yañez¹ , Guadalupe Amanda López-Ahumada¹ ,
José Luis García-Hernández^{2*} 

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

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

*Autor de correspondencia: luis_garher@ujed.mx

Artículo científico

Recibido: 11 de marzo 2024

Aceptado: 02 de mayo 2024

RESUMEN. En zonas de clima árido y semiárido, la disponibilidad y la calidad del agua son factores críticos para el desarrollo de la agronomía. Para enfrentar el desafío, una alternativa para el aprovechamiento de este recurso es la implementación de técnicas eficientes y sostenibles como el uso de riego por goteo. El objetivo del trabajo fue analizar el comportamiento agronómico del centeno en condiciones desfavorables de agua y temperatura para determinar la efectividad de la estabilidad fenotípica en la Costa de Hermosillo, Sonora, México. Se sembraron dos genotipos de centeno bajo un diseño experimental de parcelas divididas (parcela grande: tres niveles de agua y parcela chica: dos genotipos de semillas obtenidas en ciclos diferentes). Se evaluaron las características agronómicas de la planta, las características fisicoquímicas del grano; y se determinó la significancia entre las distintas variables con un análisis de correlación. El análisis de varianza reveló efectos sobre la altura de la planta, el número de espigas y de granos, tamaño de grano, el peso de mil granos, rendimiento y contenido de proteína del centeno debido a los diferentes regímenes hídricos utilizados. Se obtuvieron entre 219-314 espigas por metro lineal, con tamaño de grano comercialmente aceptable (7.45-7.95 mm largo x 2.18-2.40 mm ancho). También se observaron valores de rendimiento altos (1.72-3.11 t ha⁻¹), así como un excelente contenido de proteína (20.3-22.8%). Estos resultados demuestran que el centeno es un cereal versátil que se adapta a condiciones ambientales adversas como disminución en la cantidad de agua de riego y temperaturas extremadamente altas.

Palabras clave: Agua de riego, calor extremo, contenido de proteína, cultivo de adaptación, estrés abiótico.

ABSTRACT. In areas with arid and semi-arid climates, the availability and quality of water are critical factors for the development of agronomy. To face the challenge, an alternative for the use of this resource is the implementation of efficient and sustainable techniques such as the use of drip irrigation. The objective of the work was to analyze the agronomic behavior of rye under unfavorable water and temperature conditions to determine the effectiveness of phenotypic stability on La Costa de Hermosillo, Sonora, Mexico. Two rye genotypes were planted under a split plot experimental design (large plot: three water levels and small plot: two genotypes of seeds obtained in different cycles). The agronomic characteristics of the plant, the physicochemical characteristics of the grain were evaluated; and the significance between the different variables was determined with a correlation analysis. The analysis of variance revealed effects on plant height, number of spikes and grains, grain size, thousand grain weight, yield and protein content of rye due to the different water regimes used. Between 219-314 spikes per linear meter were obtained, with a commercially acceptable grain size (7.45-7.95 mm long x 2.18-2.40 mm wide). High yield values (1.72-3.11 t ha⁻¹) were also observed, as well as excellent protein content (20.3-22.8%). These results demonstrate that rye is a versatile cereal that adapts to adverse environmental conditions such as a decrease in the amount of irrigation water and extremely high temperatures.

Keywords: Irrigation water, extreme heat, protein content, adaptation crop, abiotic stress.

Como citar: Sosa-Yañez LC, López-Ahumada GA, García-Hernández JL (2024) Gradiente de humedad en el comportamiento agronómico del centeno cultivado en ambiente de zonas áridas. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 11(2): e4052. DOI: 10.19136/era.a11n2.4052.

INTRODUCCIÓN

El ritmo apresurado del calentamiento global, aunado al incremento de la población mundial, exhibe una amenaza sobre la seguridad alimentaria y nutricional (Darikandeh *et al.* 2022). La agricultura es uno de los sectores más vulnerables por la incertidumbre de las variaciones de temperatura y precipitaciones, debido a que los sistemas meteorológicos no pueden predecir las condiciones y alteraciones del entorno ambiental (Basche *et al.* 2016). Por ejemplo, desconocer la frecuencia, duración e intensidad de las lluvias puede ser un obstáculo para los cultivos de secanos, particularmente aquellos que se siembran en regiones áridas y semiáridas debido a que son más susceptibles al cambio climático (Tariq *et al.* 2023).

El estrés hídrico y el calor son los factores abióticos más importantes en la agricultura, pueden limitar la producción de cultivos por reducir el rendimiento a causa del grave impacto en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Lan *et al.* 2022, Yu *et al.* 2023a). Por lo tanto, la necesidad de mejorar los cultivos es inminente, siendo su principal finalidad la adaptación en entornos desfavorables (Pequeno *et al.* 2021, Shikari *et al.* 2022). De lo anterior, el utilizar estrategias de defensa podría mejorar la técnica de aclimatación en tierras con ambientes adversos como suelos con baja capacidad de retención de agua, baja disponibilidad de agua y temperaturas extremas (Yu *et al.* 2023b).

Las temperaturas elevadas y el bajo recurso de agua pueden llegar a causar alteraciones a nivel morfológico, fisiológico, anatómico, bioquímico y molecular de los cultivos, afectando el desarrollo de los cereales (Seleiman *et al.* 2021, Nasiri *et al.* 2023). A pesar de ello, las plantas responden a estos problemas contrarrestando los efectos adversos (Chakraborty y Roychoudhury 2022). Ante el déficit hídrico edáfico, las plantas reducen la transpiración para mantener el equilibrio hídrico durante sus procesos fisiológicos conduciendo a limitaciones fotosintéticas (Li *et al.* 2019, Melandri *et al.* 2020). Aunado a esto, la presencia de calor extremo hace que las plantas abran sus estomas para disminuir la temperatura interna de las hojas para enfriarlas y posteriormente, aumentar la transpiración (Akter y Rafiqul 2017), lo que puede provocar deshidratación de la planta a causa de mayor absorción de minerales (Atkinson y Urwin 2012).

Se ha reportado que uno de los cereales afectado por sequía es el centeno (*Secale cereale* L.), de la familia *Poaceae* (Schlegel 2013). Aun cuando se presentan desórdenes en el cultivo, tiene cierta tolerancia al estrés por altas temperaturas y estrés hídrico (Hübner *et al.* 2013, Kottmann *et al.* 2016). Estos desórdenes puede reflejarse en cambios en la biosíntesis y estructura del almidón, relacionándose con alteraciones en el endospermo del grano en consecuencia de una reducción del suministro de agua aunado a temperaturas altas del aire (Patindol *et al.* 2015). No obstante, se puede presentar un incremento en la proporción de proteínas del grano (Serna-Saldívar 2013).

Entre los principales países productores de centeno se encuentran Rusia, Alemania, Dinamarca y Polonia, donde es utilizado principalmente para la producción de pan y su composición química está determinada por factores genéticos y las condiciones climáticas (Dziki 2022). En el caso de México, la producción se limita únicamente al estado de Tlaxcala donde el cultivo se establece durante el ciclo primavera-verano en condiciones de secano, el cual, con el paso de los años, su área de cultivo ha experimentado una disminución significativa (SIAP 2022). El grano de centeno generalmente presenta tres componentes principales; el almidón, que se encuentra en mayor proporción (55-65%), las proteínas (8-15%) sobresaliendo las albúminas y

prolaminas (secalinas) y los lípidos (2-3%), donde el ácido linoleico es el más importante (Németh y Tömösközi 2021). Desde el punto de vista nutricional, el centeno se considera un cereal valioso debido a que presenta, en comparación con otros cereales, mayor contenido de fibra y compuestos bioactivos como compuestos fenólicos (Boskov *et al.* 2002, Sluková *et al.* 2021). El tener una dieta rica en cereales integrales como el centeno puede proteger contra el desarrollo de enfermedades cardiovasculares, sobrepeso, diabetes tipo dos y algunos tipos de cáncer (Andersson *et al.* 2014, Jonsson *et al.* 2018).

El cultivo de centeno difiere de otros cereales a causa de que presenta requerimientos nutricionales mínimos y además, puede crecer en regiones donde el clima puede ser extremo y desfavorable. Como altas temperaturas, falta de agua, suelos arenosos e infértiles, con baja capacidad de retención de agua y bajo pH (Hübner *et al.* 2013, Smolik 2013). Debido a estas características de versatilidad, es considerado como un cultivo secundario o de cobertura, el cual se siembra después de una cosecha principal, logrando beneficios de conservación de suelo para el siguiente cultivo (Qi y Helmers 2010).

En vista de la crisis mundial del agua y que la agricultura es una actividad que utiliza un alto volumen, el método de riego por goteo es una medida de ahorro y mejora de la eficiencia del uso de este recurso. Este tipo de riego comúnmente automatizado, utiliza una serie de conductos en forma de cintas o mangueras perforadas, las cuales aplican gotas de agua sobre el suelo y a su vez, permite la aplicación de fertilizantes por medio de las cintas incrementando su eficiencia en la distribución de nutrientes (Groppa 1983). Está indicado para zonas áridas y semiáridas ya que suministra el agua de manera uniforme, llegando directamente a las raíces, manteniendo humedad constante (Elliott *et al.* 2014). Por ello, el objetivo de la investigación fue analizar el comportamiento agronómico del centeno en condiciones desfavorables de agua y temperatura presentadas durante su desarrollo y analizar si existe una relación entre las características agronómicas y fisicoquímicas del cultivo para determinar si presenta estabilidad fenotípica en la Costa de Hermosillo, Sonora.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

Se llevó a cabo en el campo experimental del Departamento de Agricultura y Ganadería de la Universidad de Sonora ubicado en el kilómetro 21 de la carretera Hermosillo-Bahía de Kino (29° 00' 46.8 " LN, 111° 08' 09.9" LO). Según el sistema de clasificación climática de Köppen modificado por Enriqueta García el clima predominante en la región corresponde a un BW(h')x', indicando un clima muy árido, seco, donde la evaporación supera a la precipitación (García 2004).

Material genético

Los dos juegos de semilla de centeno utilizados de la variedad Criollo-Tlaxcala, se obtuvieron de trabajos previos correspondientes a una secuencia experimental con la premisa de lograr la adaptación del cultivo de centeno en un ambiente árido. Los conjuntos de semillas se categorizaron de la siguiente manera: por pertenecer a la cosecha realizada en mayo de 2017, se

llamó SA. Mientras que el grano obtenido, de la cosecha de realizada en mayo y junio de 2020, se le denominó SB.

Preparación del suelo

Previo a la preparación de la tierra para la siembra, se realizó un análisis fisicoquímico del suelo en el área de estudio. Se evaluó la conductividad eléctrica, el porcentaje de saturación, carbonato de calcio, pH, contenido de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y sodio. El muestreo se realizó por triplicado de manera aleatoria a profundidad de 0-15 y 15-30 cm. En el campo de experimentación, cada unidad experimental consistió de cuatro surcos separados a 80 cm, donde cada uno se dividió en dos hileras separadas a 20 cm. Para SA, el área de la parcela experimental fue de 285 m² (9.5 m de ancho x 30 m de largo) y para SB fue un área de 38 m² (9.5 m de ancho x 4 m de largo). La parcela útil de cada tratamiento consistió en 47.4 m² para el conjunto SA y 6.32 m² para el conjunto SB, debido a que se utilizaron los dos surcos intermedios para evitar el efecto orilla.

Siembra

Se realizó un ensayo de germinación a 100 semillas por triplicado, para determinar la calidad y capacidad germinación (ISTA 1996), reportándose como porcentaje de germinación. Se considera que una semilla ha germinado cuando la radícula alcanza una longitud superior a 3 mm (Rodríguez-Quilón *et al.* 2008). Se utilizó una cámara de germinación automática de doble cámara (Cleland International Inc., 1000 FAAT, Min, EUA) a 23 °C durante seis días. Considerando estos resultados, se realizaron los cálculos para una densidad de siembra de 120 kg ha⁻¹ de centeno (López-Córdova *et al.* 2018). La fecha de siembra fue el 6 de enero de 2021 (cultivo invierno-primavera). El método de siembra fue manual y a chorrillo, depositando la semilla a una profundidad de 5 cm. Después de colocar las semillas en cada hilera, se cubrieron y con la ayuda de un rastrillo se niveló manualmente la superficie. Por último, se colocó la cinta de riego por goteo.

Tratamientos de riego

Se utilizó riego por goteo mediante dos cintas con diferente caudal: una con un caudal de goteo de 0.8 L h⁻¹ (TORO Aqua-Traxx, EA50604134-1000, EUA) y otra con 1.0 L h⁻¹ (NETAFIM™, STREAMLINE™ X, Tel Aviv, Israel). La distancia entre los goteros de la cinta fue de 30 cm y se trabajó con una presión entre 10 y 12 psi. Los tratamientos consistieron en el uso de tres cantidades diferentes de agua de riego; T1: tratamiento con la menor cantidad de agua de riego (TMEA), cinta con el caudal de goteo de 0.8 L h⁻¹, T2: tratamiento control (TC), cinta con el caudal de goteo de 1.0 L h⁻¹ y T3: tratamiento con la mayor cantidad de agua de riego (TMAA), con ambas cintas, cuyas láminas de riego finales fueron de 49.30, 61.63 y 110.93 cm, respectivamente.

Para la frecuencia y duración de los riegos a lo largo del ciclo de cultivo, se consideró la eficiencia de riego al 90%, la reposición del sistema de riego (4.16 mm h⁻¹), el coeficiente de desarrollo del cultivo, las etapas fenológicas y diferentes factores ambientales como temperaturas mínima y máxima, humedad relativa, precipitación y evapotranspiración. Los datos fueron tomados de la aplicación REMAS, utilizando como estación meteorológica La Bachata en el municipio de Hermosillo (CESAVE-SIAFESON 2021). La aplicación de agua fue la misma para todos

los tratamientos, siendo el flujo del gotero la variación entre ellos. Previo a la siembra, se realizó un riego de 17 horas para generar humedad adecuada del suelo. Este riego se incluyó dentro de las láminas de riego finales. El agua utilizada para el riego presentó una calidad adecuada (C2-S1: salinidad normal-bajo sodio).

Manejo agronómico del cultivo

A través de las cintas de riego, se empleó fertilizante inorgánico fosfonitrato (31N:03P:03K, ISAOSA, México) aplicándose fraccionadamente entre las diferentes etapas del desarrollo del cultivo a dosis de 150 kg ha⁻¹ de nitrógeno (34% entre las etapas de amacollo-embuche, un 33% en la etapa de llenado de grano y un 33% en la etapa de madurez del grano) de acuerdo con López-Córdova *et al.* (2018). El control de malezas se llevó a cabo de manera manual una vez al mes. Para evitar interferencia de roedores de campo se aplicaron tabletas de rodenticida (Storm®, Reino Unido) cada 15 días durante todo el ciclo y en cada madriguera cercana.

La cosecha se realizó de forma manual con una hoz y se colocó en sacos previamente etiquetados. La separación del grano de las espigas se llevó a cabo manualmente. Los granos se limpiaron con un tamiz de aluminio con perforaciones ovaladas (Seedburo Equipment Company, No. 4 1/2/64" x 1/2", IL, EUA). Se utilizó un soplador eléctrico (Koblenz, WD 250-S3, EUA) para eliminar las impurezas. Los granos limpios se almacenaron a -20 °C en un congelador (Electrolux Home Products Inc., Frigidaire Gallery GLFC1526FW1, Estocolmo, Suecia) hasta sus respectivos análisis.

Variables evaluadas

El cambio del cultivo de centeno de un color verde a uno amarillo/dorado, el endurecimiento de los granos y la inclinación de la planta señalaron la llegada a la etapa de madurez fisiológica. A partir de esta etapa, se tomaron muestras de plantas al azar de los dos surcos designados como parcela útil de cada tratamiento. Durante la madurez fisiológica y antes de la cosecha se evaluaron la altura de la planta (AP) y el número de espigas por metro lineal (NEML). La AP se determinó en centímetros por triplicado en 10 plantas de cada surco, desde el nivel del suelo hasta el último punto de la espiga sin considerar las aristas (Mellado 1997). El NEML se determinó por medio de la selección por triplicado tres muestras de espigas de cada fila de los dos surcos intermedios, correspondientes a un metro lineal de superficie. Las espigas se colocaron dentro de bolsas de polipropileno para su almacenamiento y posterior conteo (López-Córdova *et al.* 2018). De las espigas almacenadas, posterior a su conteo se evaluó el número de granos por espiga (GPE), se tomaron por triplicado 30 espigas por cada tratamiento. La espiga se desgranó a mano y se procedió al conteo de granos (Mellado 1997). Tamaño de grano (mm), se tomaron muestras por triplicado de 20 granos por tratamiento para determinar la longitud (TG(L)) y ancho (TG(A)) y se midieron con un vernier digital (STEREN, México). Peso de mil granos (PMG) (g), se determinó pesando cuatro réplicas de 100 granos por cada tratamiento en una balanza analítica digital (Ohaus Corp., Adventurer AR2140, Nueva Jersey, EUA), los cuales se promediaron y se multiplicaron por 10. Peso hectolítrico (PH) (kg hL⁻¹), se determinó de acuerdo al método oficial 55-10.01 de la AACC (2000), utilizando una báscula/computadora (Seedburo Equipment Company, 8350, IL, EUA), la cual registra directamente el peso en unidades de kilogramos por hectolitro. Rendimiento (REND) (t ha⁻¹), para determinar la productividad en cada tratamiento, el peso del

grano cosechado se dividió por los metros cuadrados del área total cosechada, para obtener el rendimiento (López-Córdova *et al.* 2018). Contenido de proteína (PROT), se obtuvo por medio del contenido de nitrógeno determinado mediante micro-Kjeldahl (método oficial 46-13 de la AACC 2000). Para lo cual se utilizó un digestor (Electrothermal Barnstead®, MM2313E, EUA) y un destilador rápido (Labconco®, RAPIDSTILL I., Missouri, EUA). Multiplicando el contenido de nitrógeno por el factor de conversión de 6.2 se determinó el porcentaje de proteína (Wrigley y Bushuk 2010).

Diseño experimental y análisis estadístico

Se llevó a cabo un diseño experimental de parcelas divididas. La parcela grande correspondió a la cantidad de agua utilizada (tres niveles) y la parcela chica a los genotipos de semillas utilizadas (dos niveles) y tres repeticiones. Se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) de parcelas divididas completamente aleatorizado para probar los efectos del agua de riego, la semilla y la interacción entre ellos. Se utilizó la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) para evaluar los efectos significativos de las medias de las variables respuesta. Se utilizaron los coeficientes de correlación de Pearson para determinar la interacción irrigación*semilla entre todas las determinaciones evaluadas asumiendo la normalidad de los datos. Todas las evaluaciones se realizaron por triplicado. Los resultados fueron analizados con el paquete estadístico InfoStat (v2020). Las imágenes se elaboraron en el software SigmaPlot® (v10.0).

RESULTADOS

Análisis fisicoquímico del suelo

El suelo tiene una textura franco-arcillosa arenosa con un 58% de arena, 22% de limo y 20% de arcilla. El nivel de conductividad eléctrica fue de 0.70 mS cm^{-1} , indicando una condición no salina. Se observaron niveles adecuados de pH (7.9), carbonato de calcio (<1), fósforo (37 mg kg^{-1}), calcio ($3\ 294 \text{ mg kg}^{-1}$), sodio (139 mg kg^{-1}), magnesio (265 mg kg^{-1}) y potasio (519 mg kg^{-1}). A diferencia de lo anterior, el valor de nitrógeno fue bajo (12.23 mg kg^{-1}), comparándose con el nivel recomendado que es de 30 mg kg^{-1} por lo que fue necesario aplicar fertilizante.

Ensayo de germinación

El ensayo de germinación, indica que la semilla tiene en promedio de 93.3-100% de germinación. Estos valores demuestran que la semilla está sana y tiene buenas condiciones para su uso en campo.

Altura de la planta

El ANDEVA mostró diferencias estadísticas significativas para la altura de planta, en las fuentes de variación cantidad de agua de riego utilizada ($P \leq 0.0001$) y semilla ($P \leq 0.01$), así como en la interacción de ambos factores ($P \leq 0.0001$). La interacción TMEA*SA presentó la mayor altura con valor similar a la interacción de TC*SA; pero TMAA*SA mostró diferencias significativas al reducir la altura de la planta en un 7.52% (Tabla 1). Por otro lado, TMEA*SB, presentó la altura más

baja de todas, disminuyendo en un 4.91%, mostrando un valor similar TMAA*SA, mientras que TMAA*SB no presentó diferencias respecto a TC (Tabla 1).

Tabla 1. Efecto de los regímenes de riego y el conjunto de semilla utilizada sobre las características agronómicas de la planta de centeno.

Tratamientos	Altura de planta (cm)	Número de espigas por metro lineal	Granos por espiga
Conjunto de semillas SA			
Menor cantidad de agua (TMEA)	155.44 ± 8.75 ^{aA}	314.67 ± 18.78 ^{aA}	45.36 ± 11.04 ^{cD}
Control (TC)	155.43 ± 12.53 ^{aA}	276.67 ± 11.27 ^{bB}	53.46 ± 10.35 ^{aA}
Mayor cantidad de agua (TMAA)	143.73 ± 13.85 ^{bC}	281.17 ± 15.35 ^{bB}	49.54 ± 9.42 ^{bBC}
Conjunto de semillas SB			
Menor cantidad de agua	143.69 ± 12.03 ^{bC}	266.33 ± 9.50 ^{aB}	45.12 ± 10.21 ^{cD}
Control	151.11 ± 11.74 ^{aAB}	231.00 ± 9.90 ^{bC}	51.72 ± 9.36 ^{aAB}
Mayor cantidad de agua	148.94 ± 10.27 ^{bC}	219.33 ± 13.32 ^{bC}	47.80 ± 11.17 ^{bCD}

Los valores presentados son la media ± la desviación estándar de tres repeticiones. Las letras minúsculas en cada columna representan diferencias significativas entre los tratamientos de agua de riego utilizada (parcela grande), mientras que las letras mayúsculas en cada columna representan diferencias significativas entre ambos conjuntos de semillas (parcela chica) (Tukey, $P \leq 0.05$).

Número de espigas por metro lineal

Para el número de espigas, el ANDEVA mostró evidencia de que esta variable se ve afectada por la cantidad de agua y la semilla utilizada ($P \leq 0.0001$). En contraste, la interacción entre ambos factores no presentó efecto adicional. Se observó que los conjuntos de semillas son diferentes entre ellos, a diferencia de los tratamientos de la cantidad de agua utilizados en los que TMEA fue diferente de TC y TMAA, presentando la mayor cantidad de espigas. El TMEA presentó un aumento significativo en la cantidad de espigas del 17.5 y 15.29% en comparación con TC en los dos juegos de semilla (Tabla 1). Al mismo tiempo, TMAA mostró una disminución en el número de espigas de 5.05% en SB sin diferencias significativas con respecto al TC correspondiente.

Granos por espiga

El número de granos por espiga fue afectado ($P \leq 0.05$) por los tratamientos de riego y por la semilla utilizada, mientras que la interacción entre ellos no fue significativa. Tanto el conjunto de semillas SA como SB mostraron el mismo comportamiento, donde TMEA presentó el menor número de granos por espiga, disminuyendo en 14.64 y 12.76%, respectivamente (Tabla 1). Asimismo, el TMAA disminuyó un 6.53% en comparación con el TC, que tuvo el mayor número de granos por espiga.

Tamaño de grano

El tamaño del grano, mostró diferencias significativas ($P \leq 0.0001$) en el largo y ancho del grano debido a la cantidad de agua, la semilla y la interacción de ambos factores. Se observó mayor tamaño del grano en TMAA y menor tamaño en TMEA (Figura 1). Del mismo modo, los conjuntos de semillas utilizadas también presentaron diferencias estadísticas ($P \leq 0.05$). El TMEA presentó la longitud más corta tanto en SA como SB, siendo SA el valor más bajo con una disminución de 6.28%.

Por otro lado, TMAA no presentó diferencias significativas en comparación con TC (Figura 1A). Asimismo, TMEA disminuyó un 2.21% en SB, mientras que TMAA aumentó un 2.34% (Figura 1A). En cuanto al ancho de grano, el TC*SA presentó el mayor valor y TC*SB el más bajo; sin embargo, utilizando el conjunto de semillas SB, TMEA presentó el mismo valor que TC, siendo estadísticamente igual, mientras que TMAA aumentó en 7.79% (Figura 1B). Por el lado de SA, TMEA y TMAA mostraron un ancho de grano menor, disminuyendo en 3.75 y 1.25%, respectivamente (Figura 1B). De manera general, el grano que presentó el mayor tamaño fue el grano del TC de SA y el menor tamaño correspondió al grano del TMEA de SB.

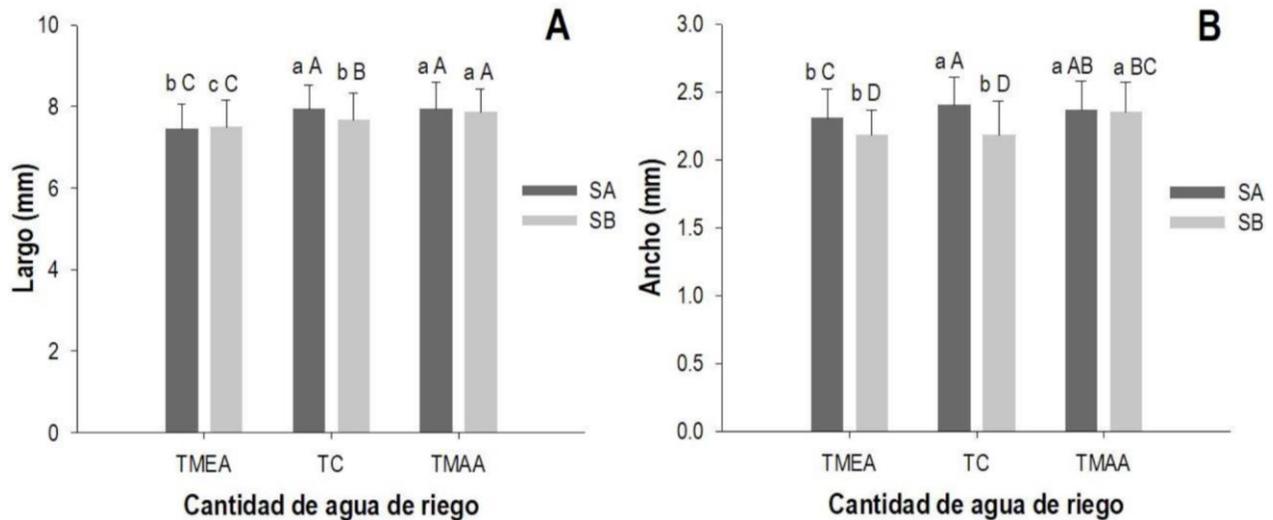


Figura 1. Efecto de los regímenes de riego y el conjunto de semilla utilizada sobre el tamaño de grano de centeno. A: Largo del grano, B: ancho del grano. Valores medios de tres repeticiones. Las letras minúsculas en las barras del mismo color en cada variable representan diferencia estadística entre los tratamientos de agua de riego (parcela grande), mientras que las letras mayúsculas en cada variable representan diferencia estadística entre ambos conjuntos de semillas (parcela chica) (Tukey, $P \leq 0.05$). TMEA: tratamiento con menor cantidad de agua, TC: tratamiento control, TMAA: tratamiento con mayor cantidad de agua. SA y SB: conjunto de semilla.

Peso de mil granos

El ANDEVA mostró evidencia ($P \leq 0.0001$) de que los tratamientos de riego, las semillas utilizadas y la interacción entre ellos tienen efecto sobre esta variable. Los tres tratamientos de riego y las dos semillas utilizadas presentan diferencias estadísticas entre ellos, mientras que, en la interacción de ambos factores, sólo TC*SA no presentó diferencias significativas, siendo igual a TMAA*SA. En lo que corresponde al conjunto de semillas SA, TMAA presentó una disminución del 3% en peso en comparación con TC, mientras que TMEA presentó una disminución del 18.19% (Tabla 2). Por otro lado, en el conjunto SB, los tres tratamientos de riego fueron estadísticamente diferentes comparados con TC. TMEA presentó una reducción de 6.71%, mostrando el menor peso de todos los resultados. Al mismo tiempo, el TMAA aumentó 35.47% el peso, siendo una media cercana al valor TC de SA (Tabla 2).

Peso hectolítrico

En el ANDEVA del peso hectolítrico, la cantidad de agua de riego y la semilla presentaron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.0001$). Se observó también un efecto adicional por su

interacción. La prueba de Tukey mostró estas diferencias entre las dos semillas y las tres cantidades de agua de riego utilizadas, teniendo el peso hectolítrico más alto TMAA con SA (Tabla 2). Para el conjunto de semillas SA, no hubo diferencias significativas entre los tratamientos de agua, siendo TMEA el que presentó el mayor peso de todos. Por otro lado, en SB, TMAA presentó un aumento de peso de 4.08% mostrando diferencia estadística, mientras que TMEA presentó una disminución de 1.73%, pasando de un peso hectolítrico de 65.16 a 61.69 kg hL⁻¹ (Tabla 2).

Tabla 2. Efecto sobre el peso de mil granos, peso hectolítrico y rendimiento de centeno debido a los conjuntos de semillas utilizadas y los diferentes niveles de riego.

Tratamientos	Peso de mil granos (g)	Peso hectolítrico (kg hL ⁻¹)	Rendimiento (t ha ⁻¹)
Conjunto de semillas SA			
Menor cantidad de agua (TMEA)	21.53 ± 1.68 ^{bb}	64.96 ± 0.42 ^{aA}	2.43 ± 0.18 ^{bbc}
Control (TC)	26.32 ± 2.84 ^{aA}	65.01 ± 0.27 ^{aA}	3.10 ± 0.42 ^{aA}
Mayor cantidad de agua (TMAA)	25.53 ± 0.99 ^{aA}	65.19 ± 0.13 ^{aA}	2.93 ± 0.42 ^{abAB}
Conjunto de semillas SB			
Menor cantidad de agua	18.33 ± 0.75 ^{cC}	61.69 ± 0.32 ^{bb}	1.72 ± 0.15 ^{bd}
Control	19.65 ± 2.65 ^{bbc}	61.95 ± 0.93 ^{bb}	1.76 ± 0.37 ^{bd}
Mayor cantidad de agua	26.62 ± 0.49 ^{aA}	65.16 ± 0.20 ^{aA}	2.39 ± 0.09 ^{aC}

Los valores presentados son la media ± la desviación estándar de tres repeticiones. Las letras minúsculas en cada columna representan diferencias significativas entre los tratamientos de agua de riego utilizada (parcela grande), mientras que las letras mayúsculas en cada columna representan diferencias significativas entre ambos conjuntos de semillas (parcela chica) (Tukey, $P \leq 0.05$).

Rendimiento

Para el rendimiento se observa que el conjunto de semillas SA alcanzó mayores valores que SB, indicando que el tipo de semilla influye en esta variable ($P \leq 0.0001$). Asimismo, la cantidad de agua de riego presentó efecto ($P \leq 0.0001$), donde el tratamiento con menor cantidad de agua de riego fue donde se presentó el menor rendimiento de grano (Tabla 2). En el conjunto de semillas SA, TMAA y TMEA presentaron una disminución en la producción de centeno correspondiente a 5.46 y 21.18%, respectivamente, en comparación con TC. Sin embargo, solo TMEA fue el que mostró diferencias significativas (Tabla 2). En SB, TMEA también se presentó una disminución en el rendimiento, siendo solo de 2.82% sin mostrar diferencias con TC, mientras que TMAA aumentó 35.02%, acercándose al valor TMEA de SA (Tabla 2).

Contenido de proteína del grano

En ambos conjuntos de semillas y la interacción tipo de riego*semilla fueron los que mostraron efecto sobre esta variable. La comparación de medias detectó un comportamiento diferente entre los tipos de semillas. Para la interacción cantidad de agua*semilla, los valores de TC se mantuvieron en los extremos, siendo SA el valor más alto de proteína (22.78%) y SB el menor (20.34%). En la interacción correspondiente a SA, TMEA y TMAA no se observaron diferencias; pero en CT, se observó una disminución de 5.44 y 6.80%, respectivamente (Figura 2). Por otro lado, para la interacción riego con SB, los tres tratamientos presentaron diferencias, siendo TMEA el que mostró el mayor incremento en comparación con TC, con 8.50%, mientras que el TMAA aumentó 3.14%.

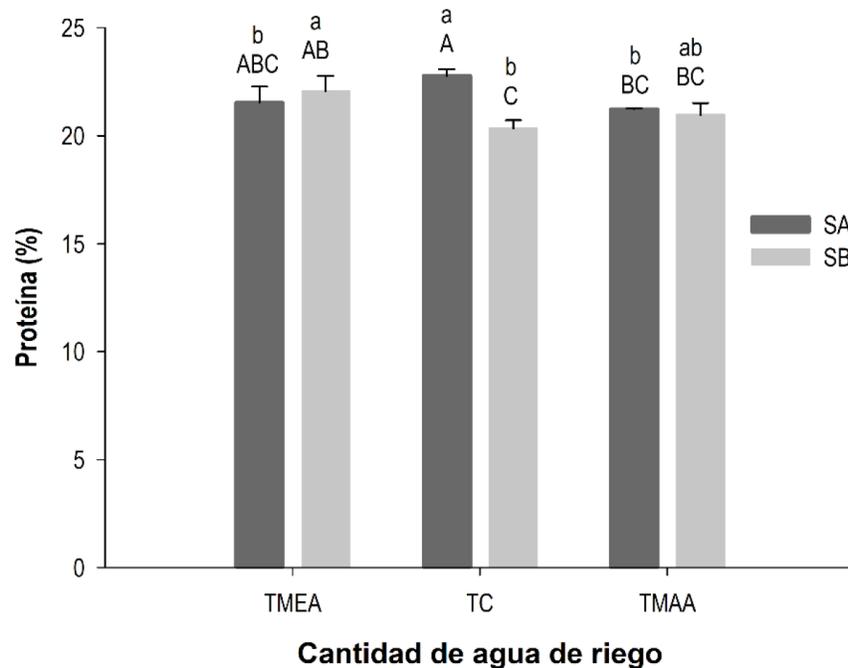


Figura 2. Efecto en el contenido de proteína del grano de centeno por la cantidad de agua y la semilla utilizada. Valores medios de tres repeticiones. Las letras minúsculas en las barras del mismo color representan diferencia estadística entre los tratamientos de agua de riego utilizada (parcela grande), mientras que las letras mayúsculas representan diferencia estadística entre ambos conjuntos de semillas (parcela chica) (Tukey, $P \leq 0.05$). TMEA: tratamiento con menor cantidad de agua, TC: tratamiento control, TMAA: tratamiento con mayor cantidad de agua. SA y SB: conjunto de semillas.

Coefficientes de correlación

Los coeficientes de correlación de Pearson (Tabla 3), mostraron correlaciones significativas entre las variables evaluadas. Para SA en el TMAA, el aumento en el número de granos por espiga está directamente correlacionado con el peso hectolítrico ($r = 0.998^*$). Por otro lado, en TMEA, la variable proteína presenta una correlación significativa y negativa con el tamaño de grano ($r = -0.999^{**}$) y el rendimiento ($r = -0.999^{**}$).

El rendimiento se relaciona de forma positiva con el número de espigas por metro lineal para CT en SB ($r = 0.943^{**}$) y en TMAA en SA ($r = 0.918^{**}$), mientras que en TMEA con SB, existe una correlación negativa ($r = -0.999^{**}$). En cuanto al número de espigas por metro lineal y el número de granos por espiga en TMAA en SB, también hay correlación negativa significativa alta ($r = -0.915^{**}$), lo que podría deberse a un exceso de agua que conduce a la producción de espigas, pero no al desarrollo de granos, o bien, a un efecto de compensación, al haber menos espigas éstas amarrarán un mayor número de granos. El número de granos por espiga presentó un comportamiento diferente entre los tratamientos y las variables agronómicas. Para SA, hubo una correlación positiva con la altura de la planta ($r = 0.298^*$) en CT, el peso de mil granos ($r = 0.468^*$) en TMEA y el ancho de grano ($r = 0.162^*$) en TMAA. Por el contrario, en SB, hubo una correlación negativa entre los granos por espiga y el ancho de grano ($r = -0.164^*$) en CT y el rendimiento ($r = -0.857^*$) en TMAA. El tamaño del grano se correlacionó negativamente con otras variables, como

el peso de mil granos con longitud ($r = -0.437^*$) en TMAA y la altura de la planta con ancho ($r = -0.257^*$) en TMEA, ambos correspondientes a SB. En todos los tratamientos de riego y en los tipos de semilla utilizados, se encontró que el aumento en la longitud del grano se acompaña de un incremento en el ancho del grano.

Tabla 3. Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre las características agronómicas y el contenido proteico de centeno.

Coeficientes de correlación de Pearson (r)									
<i>Tratamiento con menor cantidad de agua</i>									
SA / SB	AP	NEML	GPE	TG(L)	TG(A)	PMG	PH	REND	PROT
AP	-	-0.409 ^{NS}	-0.007 ^{NS}	0.116 ^{NS}	-0.257 [*]	0.239 ^{NS}	0.101 ^{NS}	-0.749 ^{NS}	0.540 ^{NS}
NEML	0.292 ^{NS}	-	-0.393 ^{NS}	0.349 ^{NS}	-0.288 ^{NS}	-0.222 ^{NS}	0.773 ^{NS}	0.672 ^{NS}	-0.999 ^{**}
GPE	0.129 ^{NS}	-0.528 ^{NS}	-	-0.051 ^{NS}	0.015 ^{NS}	-0.164 ^{NS}	-0.384 ^{NS}	-0.265 ^{NS}	0.876 ^{NS}
TG(L)	-0.170 ^{NS}	0.743 ^{NS}	-0.062 ^{NS}	-	0.246 ^{***}	0.291 ^{NS}	-0.441 ^{NS}	0.436 ^{NS}	0.904 ^{NS}
TG(A)	-0.144 ^{NS}	0.461 ^{NS}	-0.023 ^{NS}	0.112 [*]	-	-0.027 ^{NS}	0.067 ^{NS}	-0.605 ^{NS}	0.569 ^{NS}
PMG	-0.044 ^{NS}	0.601 ^{NS}	0.468 [*]	-0.205 ^{NS}	0.200 ^{NS}	-	-0.978 ^{NS}	0.267 ^{NS}	0.895 ^{NS}
PH	0.290 ^{NS}	-0.500 ^{NS}	0.953 ^{NS}	-0.766 ^{NS}	-0.766 ^{NS}	0.821 ^{NS}	-	-0.067 ^{NS}	-0.783 ^{NS}
REND	0.275 ^{NS}	-0.504 ^{NS}	0.125 ^{NS}	-0.396 ^{NS}	0.466 ^{NS}	-0.592 ^{NS}	-0.746 ^{NS}	-	-0.569 ^{NS}
PROT	-0.405 ^{NS}	-0.944 ^{NS}	0.919 ^{NS}	-0.999 ^{**}	-0.999 ^{**}	0.250 ^{NS}	0.758 ^{NS}	-0.999 [*]	-
<i>Tratamiento control</i>									
SA / SB	AP	NEML	GPE	TG(L)	TG(A)	PMG	PH	REND	PROT
AP	-	-0.718 ^{NS}	-0.007 ^{NS}	0.120 ^{NS}	0.053 ^{NS}	-0.213 ^{NS}	0.342 ^{NS}	-0.576 ^{NS}	-0.868 ^{NS}
NEML	-0.724 ^{NS}	-	-0.029 ^{NS}	-0.114 ^{NS}	-0.188 ^{NS}	0.624 ^{NS}	0.585 ^{NS}	0.943 ^{**}	0.076 ^{NS}
GPE	0.298 [*]	-0.624 ^{NS}	-	-0.008 ^{NS}	-0.164 [*]	0.267 ^{NS}	0.964 ^{NS}	0.010 ^{NS}	-0.908 ^{NS}
TG(L)	-0.070 ^{NS}	-0.456 ^{NS}	0.047 ^{NS}	-	0.234 ^{***}	0.026 ^{NS}	-0.778 ^{NS}	-0.027 ^{NS}	0.188 ^{NS}
TG(A)	-0.083 ^{NS}	0.346 ^{NS}	-0.060 ^{NS}	0.111 [*]	-	-0.269 ^{NS}	-0.042 ^{NS}	-0.135 ^{NS}	0.677 ^{NS}
PMG	-0.382 ^{NS}	0.494 ^{NS}	0.203 ^{NS}	-0.089 ^{NS}	0.001 ^{NS}	-	-0.939 ^{NS}	0.644 ^{NS}	0.939 ^{NS}
PH	-0.994 ^{NS}	0.117 ^{NS}	-0.540 ^{NS}	0.524 ^{NS}	0.371 ^{NS}	-0.995 ^{NS}	-	0.631 ^{NS}	-0.764 ^{NS}
REND	0.233 ^{NS}	-0.578 ^{NS}	0.018 ^{NS}	0.382 ^{NS}	0.274 ^{NS}	0.012 ^{NS}	0.521 ^{NS}	-	0.019 ^{NS}
PROT	0.997 ^{NS}	-0.301 ^{NS}	0.689 ^{NS}	-0.355 ^{NS}	-0.539 ^{NS}	0.957 ^{NS}	-0.982 ^{NS}	-0.673 ^{NS}	-
<i>Tratamiento con mayor cantidad de agua</i>									
SA / SB	AP	NEML	GPE	TG(L)	TG(A)	PMG	PH	REND	PROT
AP	-	-0.701 ^{NS}	-0.018 ^{NS}	-0.150 ^{NS}	0.013 ^{NS}	-0.089 ^{NS}	-0.295 ^{NS}	-0.554 ^{NS}	-0.782 ^{NS}
NEML	-0.575 ^{NS}	-	-0.915 [*]	0.470 ^{NS}	0.411 ^{NS}	-0.522 ^{NS}	0.493 ^{NS}	0.745 ^{NS}	0.630 ^{NS}
GPE	0.087 ^{NS}	-0.240 ^{NS}	-	0.012 ^{NS}	0.034 ^{NS}	0.308 ^{NS}	-0.337 ^{NS}	-0.857 [*]	-0.754 ^{NS}
TG(L)	0.026 ^{NS}	0.025 ^{NS}	0.137 ^{NS}	-	0.095 [*]	-0.437 [*]	-0.654 ^{NS}	0.454 ^{NS}	0.943 ^{NS}
TG(A)	0.015 ^{NS}	0.113 ^{NS}	0.162 [*]	0.186 ^{***}	-	0.058 ^{NS}	0.268 ^{NS}	0.024 ^{NS}	-0.995 ^{NS}
PMG	0.230 ^{NS}	-0.153 ^{NS}	0.333 ^{NS}	0.208 ^{NS}	-0.099 ^{NS}	-	-0.329 ^{NS}	-0.611 ^{NS}	-0.759 ^{NS}
PH	0.911 ^{NS}	-0.284 ^{NS}	0.998 [*]	0.725 ^{NS}	-0.813 ^{NS}	0.084 ^{NS}	-	0.509 ^{NS}	-0.365 ^{NS}
REND	-0.652 ^{NS}	0.918 ^{**}	-0.528 ^{NS}	-0.209 ^{NS}	0.397 ^{NS}	-0.192 ^{NS}	-0.847 ^{NS}	-	0.616 ^{NS}
PROT	-0.023 ^{NS}	-0.741 ^{NS}	-0.375 ^{NS}	0.305 ^{NS}	0.877 ^{NS}	0.861 ^{NS}	-0.434 ^{NS}	-0.111 ^{NS}	-

Nivel significativo * $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$, *** $P \leq 0.001$ y ^{NS} $P \geq 0.05$. AP: altura de la planta; NEML: número de espigas por metro lineal; GPE: granos por espiga; TG(L): tamaño de grano largo; TG(A): tamaño de grano ancho; PMG: peso de mil granos, PH: peso de hectolítrico, REND: rendimiento y PROT: proteína. SA y SB: conjunto de semillas.

DISCUSIÓN

Análisis fisicoquímico del suelo

La contribución nutricional del suelo es primordial para la productividad de cualquier cultivo. Por lo tanto, su análisis fisicoquímico es útil para mejorar las condiciones y necesidades requeridas por el cultivo (Castellanos *et al.* 2000). La textura del suelo tiene efecto directo en las características de retención de humedad: capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente de un suelo (PMP) (Richer-de-Forges *et al.* 2022). Los suelos francos presentan mejor respuesta respecto a esas dos características del suelo, tal como fue el caso del suelo experimental del presente estudio. Ello favorece el crecimiento de un cultivo como el centeno (Flores *et al.* 2011). Un suelo franco amplía la retención y la disponibilidad de la humedad en el suelo (Rudiyanto *et al.* 2021), con ello amplía el potencial de un cultivo para absorber la solución del suelo, a diferencia de suelos extremadamente arenosos o arcillosos (Román-Dobarco *et al.* 2019). La evaluación de la conductividad eléctrica del suelo cuantifica la concentración de sales solubles, refiriéndose a la capacidad de un material para conducir la corriente eléctrica. Este valor mostró que el suelo presentaba nulo efecto nocivo sobre el crecimiento de las plantas (Gartley 2011). Es importante mencionar que alteraciones en la dosis de los microelementos puede afectar la calidad y viabilidad de las semillas (Gough 2020). Debido a que no se observaron deficiencias o problemas excesivos, no fue necesaria la aplicación de mejoradores de suelo. Por otro lado, una deficiencia de nitrógeno puede resultar en afectaciones agronómicas como disminución del rendimiento.

Ensayo de germinación

La capacidad de germinación es uno de los factores que pueden ayudar a evaluar la calidad del grano durante su almacenamiento, ya que esta propiedad puede disminuir con el paso del tiempo. Para las semillas de cereales almacenados, una disminución en el contenido de humedad y/o la temperatura, puede aumentar el período de viabilidad (Jian 2022). Según ISTA (1996), el porcentaje de semillas germinadas es una medida cuantitativa de la viabilidad. La medición de la viabilidad es un requisito previo esencial en la agricultura para evaluar el estado de la semilla para la plantación; por lo que las semillas deben encontrarse en buenas condiciones para mostrar los efectos del tratamiento (Gough 2020).

La germinación y la aparición de semillas son dos fases críticas en el desarrollo de las plantas y están mediadas por diversos ambientales, como la temperatura y el estrés hídrico. Cuando existe un porcentaje de germinación inferior al 85%, se sugiere que las semillas no serán adecuadas en condiciones ambientales experimentales (Javaid *et al.* 2022). Ya que el vigor de la semilla es responsable de una germinación y emergencia uniforme y rápida en condiciones de campo (Mahender *et al.* 2015). El bajo nivel de vigor en un entorno productivo puede conducir a disminución del rendimiento y la calidad de los cultivos (Bobadilla-Meléndez *et al.* 2013). Por lo que de acuerdo con los resultados encontrados las semillas fueron almacenadas de forma adecuada para conservarlas.

Altura de la planta

La falta de precipitaciones y la presencia de temperaturas altas en el año 2021, en comparación con el año 2020, no presentaron cambios notables para esta variable (Figura 3),

debido a que se obtuvieron valores similares a los publicados de un trabajo previo (Sosa-Yañez *et al.* 2022). Al compararse con lo reportado por López-Córdova *et al.* (2018), se tuvo un incremento en la altura de la planta. Mientras que Kleinpaul *et al.* (2018) reportan valores de altura entre 126.30 y 169.20 cm en centeno plantado en clima húmedo de Brasil.

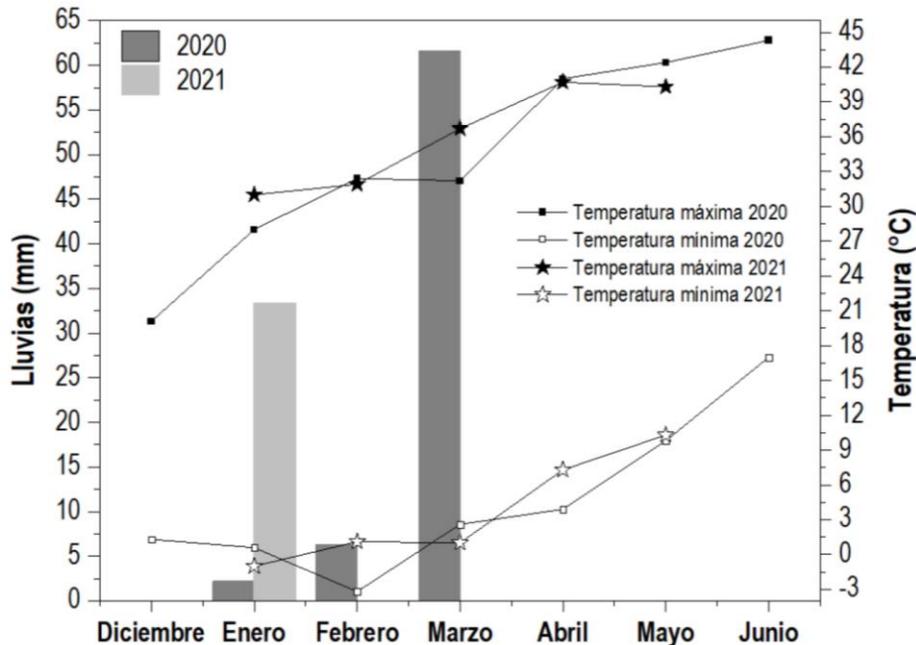


Figura 3. Temperaturas mínimas, máximas y lluvias presentadas de diciembre a junio del 2020 y 2021 en la Costa de Hermosillo, Sonora, México (CESAVE-SIAFESON 2021).

La altura continúa estando dentro de los valores característicos de un cultivo de centeno (Mellado *et al.* 2008). Sin embargo, es necesario señalar que, aunque la planta pueda llegar a alcanzar una altura mayor de 180 cm, puede presentar una falta de agua para el desarrollo de los granos, así como acame del cultivo (Murillo-Amador *et al.* 2001), causando rotura de tallos, flexión de la planta y debilitamiento de las raíces, resultando en mala nutrición de los cultivos y bajos rendimientos.

Número de espigas por metro lineal

El estrés por sequía en centeno acelera las etapas fenológicas del cultivo (Shahmoradi y Ghotbi 2022). Además, disminuye el rendimiento en un ambiente árido con clima desértico. En un estudio de las características agronómicas de genotipos de centeno plantados en suelos poco fértiles con baja capacidad de retención de agua en diferentes condiciones de sequía en diversas etapas de desarrollo, se reporta una disminución en el número de espigas por metro cuadrado en los tratamientos de sequía, con correlación positiva y significativa con el rendimiento (Kottmann *et al.* 2016). También se reporta que la madurez fisiológica del centeno se alcanzó en menor número de días bajo condiciones de sequía severa, donde es importante destacar que las etapas fenológicas en esta investigación siguieron este mismo patrón. Por otro lado Kuzminykh *et al.* (2020), reportan alrededor de 102 plantas por metro cuadrado de productividad de centeno invernal, con la ocurrencia de bajas temperaturas durante el desarrollo del cultivo. Considerando

lo mencionado anteriormente, las condiciones ambientales presentadas durante el desarrollo del centeno en el presente estudio (Figura 3) no fueron óptimas para un cereal que crece y se produce en ambientes fríos (Szuleta *et al.* 2022). A pesar de estas circunstancias, obtuvimos resultados relevantes en esta variable, lo que nos indica que el centeno es un cereal que se puede adaptar a diferentes entornos, conservando buenas características como lo es la cantidad de espigas, el cual, está relacionado con el rendimiento del cultivo.

Granos por espiga

Sin duda, la disminución de la cantidad de agua de riego y el aumento de las temperaturas presentadas durante el desarrollo del cultivo (Figura 3) afectó esta variable, ya que hubo una disminución en comparación con Sosa-Yañez *et al.* (2022), quienes obtuvieron entre 54 y 60 granos por espiga. Al momento de la cosecha, el cultivo presentaba baja humedad, por lo que los granos comenzaron a caer de las espigas por sí mismos. Es crucial indicar que el rendimiento en los cereales puede verse afectado si hay una disminución en la cantidad de granos que quedan dentro de la espiga (Slafer *et al.* 2014, Kottmann *et al.* 2016). Desde otra perspectiva, la disminución del número de granos por espiga no implicó un impacto negativo en el cultivo en comparación con otras investigaciones donde las condiciones ambientales y otros factores no simulaban un ambiente adverso para el desarrollo del cultivo, como los reportados por Mellado *et al.* (2008), Jaikumar *et al.* (2012) y Kuzminykh *et al.* (2020) quienes utilizaron estimulantes del crecimiento.

Tamaño del grano

Además del número de granos por espiga, el tamaño del grano es una variable importante porque puede limitar el rendimiento de los cultivos. En granos como el trigo y el arroz, la sequía causa una reducción en la etapa de llenado del grano (Patindol *et al.* 2015, Yu *et al.* 2016), que puede estar relacionado con un tamaño y peso de grano más pequeño. Sin embargo, los efectos dependen de la intensidad y duración del estrés y la etapa fenológica (Dresselhaus y Hückelhoven, 2018).

Existe un efecto sobre el tamaño del grano al aumentar la cantidad de agua de riego utilizada durante el desarrollo. Disminuir el volumen de agua tiene impacto significativo en el grano de centeno. Al respecto, Sosa-Yañez *et al.* (2022), obtuvieron granos con longitudes entre 8.25 y 8.55 mm, y de ancho entre 2.48 y 2.53 mm, por lo que en comparación, hubo una disminución en el tamaño. Esto parece indicar que las temperaturas extremas y las pocas lluvias presentadas durante el desarrollo del cultivo (Figura 3) afectan esta variable. A pesar de estos resultados, los tamaños de grano de los tratamientos están dentro de los rangos medios reportados por Mellado *et al.* (2008).

Peso de mil granos

En comparación con el estudio previo de Sosa-Yañez *et al.* (2022), se observa una pérdida de peso considerable, pasando de entre las medias de 30.57-32.65 g a 18.33-26.62 g. Esto puede deberse a que las condiciones climáticas durante el desarrollo fueron diferentes. Ya que en el 2021, tuvo menos precipitaciones y aumentaron las temperaturas máximas y mínimas en los meses de desarrollo del cultivo (Figura 3). Al igual que Kottmann *et al.* (2016) y Stępień *et al.* (2016), se coincide en que las altas temperaturas y la sequía pueden afectar el peso de los granos de centeno;

lo cual puede estar relacionado con el aumento de la tasa de respiración en las plantas. En otros cereales, la sequía también tiene efectos adversos, por ejemplo, en sorgo disminuye el número de granos por espiga y el peso de los granos (Araki *et al.* 2022). A pesar de que las condiciones durante el desarrollo no fueron ideales, se presentan valores medios similares en comparación con otras investigaciones, según lo informado por Tupits (2008) con medias entre 25 y 35 g y Hansen *et al.* (2004) que trabajaron con diferentes líneas de centeno con estándares entre 22.9 y 28.2 g.

Peso hectolítrico

El peso hectolítrico se utiliza para relacionar la densidad y el tamaño del grano de cereales, proporcionando información sobre su calidad. A nivel comercial, un grano de buena calidad produce un mayor beneficio para los agricultores. Sin embargo, si hay un aumento en las temperaturas y ausencia o escasez de agua, afecta negativamente el crecimiento y desarrollo de los cereales. Por ejemplo, generalmente hay una disminución en el tamaño de los granos debido a una maduración inadecuada de la planta debido al crecimiento acelerado, causando limitaciones en el peso. Por lo tanto, el peso del hectolitro se utiliza como una medida aproximada del rendimiento esperado de la harina y un indicador del llenado de los granos (Hollins *et al.* 2004). Al respecto Gooding *et al.* (2003), observaron que, la sequía y altas temperaturas entre las etapas de antesis y llenado de grano, redujo el peso hectolítrico.

Durante el desarrollo del cultivo, se presentaron lluvias solamente en el mes de enero y las temperaturas tendieron a incrementar a medida que pasaba el tiempo, esto en comparación con las condiciones del estudio anterior (Sosa-Yañez *et al.* 2022) (Figura 3). Debido a estas condiciones, se presentó una disminución en la variable de peso hectolítrico pasando de 66.00-66.80 kg hL⁻¹ a 61.69-65.19 kg hL⁻¹. Sin embargo, a pesar de las condiciones desfavorables y el desarrollo acelerado presentado que llevó a una disminución en el peso y tamaño de grano, se siguen manteniendo valores cercanos a otras investigaciones de centeno (Mellado *et al.* 2008, Peratoner *et al.* 2016, López-Córdova *et al.* 2019). De manera que se puede considerar como una característica positiva en cuanto a la resistencia del cultivo a través de las condiciones ambientales ocasionadas por el cambio climático.

Rendimiento

Las condiciones ambientales en Sonora no son las más favorables para la producción de centeno. Pero con los resultados obtenidos, se corrobora que este cultivo es altamente adaptable en ambientes adversos, preservando su calidad agronómica, por lo que es necesario incrementar su rendimiento bajo esas condiciones para satisfacer la demanda de alimentos ante el aumento de la población mundial (Semenov *et al.* 2014). El déficit hídrico y las altas temperaturas afectan el rendimiento del trigo y otros cereales (Lawas *et al.* 2018, Gupta *et al.* 2022, Neiff *et al.* 2022, Qin *et al.* 2022). Por su parte, Kuzminykh *et al.* (2020), específicamente en centeno, con estimulantes del crecimiento obtuvieron rendimientos de 2.48 a 3.28 t ha⁻¹; mientras que López-Córdova *et al.* (2018) reportan rendimientos de 2.2 t ha⁻¹ utilizando la misma variedad de semilla y nivel de fertilización. Los cuales fueron superiores al rendimiento promedio de centeno en México fue de 1.71 t ha⁻¹ en 2019 (SIAP 2022).

Contenido de proteína del grano

En el caso de que los nutrientes del suelo no están en las cantidades requeridas para cada cultivo, puede existir un efecto sobre el contenido de proteínas y minerales de cereales (Patindol *et al.* 2015). El suelo con alta humedad debido al aumento del riego o las altas precipitaciones puede producir granos con bajo contenido de nitrógeno y proteínas (Gough 2020). Los valores más altos de contenido de proteína se presentaron con el mismo nivel de fertilización que Hansen *et al.* (2004) y López-Córdova *et al.* (2019) reportan (rangos de 8.6-11.3% y 15-16%, respectivamente). Lo mismo ocurre en comparación con otros estudios de líneas e híbridos de centeno como lo reportado por Laidig *et al.* (2017) y Linina *et al.* (2019). Todo esto parece confirmar lo mencionado por Stępień *et al.* (2016) quienes reportan que menos precipitaciones y altas temperaturas favorecen la mayor concentración de proteínas.

El efecto de los cambios en el ambiente es mayor durante el inicio del desarrollo del grano ya que los procesos biológicos y fisiológicos se ven afectados (Beckles y Thitisaksakul 2014). Un ambiente estresante puede alterar la funcionalidad del almidón y disminuir su acumulación por efecto en las enzimas involucradas en la biosíntesis debido a que algunas son termolábiles (Patindol *et al.* 2015, Thitisaksakul *et al.* 2012). Por lo anterior, el incremento obtenido en el contenido de proteína en el grano puede estar relacionado a un efecto sobre el almidón por las condiciones presentadas durante el desarrollo del cultivo y la aceleración de las etapas fenológicas.

Las personas se inclinan por una dieta rica y nutritiva, siendo los cereales integrales una parte fundamental, ya que son una fuente esencial de compuestos bioactivos (Andersson *et al.* 2014). Si a esto le añadimos una alta cantidad de proteínas, se obtendrían productos con mejor calidad nutricional. En los cereales, los compuestos proteicos se pueden encontrar en todo el grano, el germen y la capa de aleurona, donde se concentra la cantidad más significativa (Serna-Saldívar 2013).

Coefficientes de correlación

La correlación de Pearson permite examinar las tendencias de las variables y cuantificar la magnitud de su asociación, ayudando a describir cuantitativamente la fuerza y la dirección de la relación (Roy-García *et al.* 2019). Corroborando este último con lo indicado por Hansen *et al.* (2004) y Stępień *et al.* (2016): un mayor contenido proteico corresponde a un menor rendimiento. Las diferencias en las características de calidad de este cereal en diferentes años, en varias zonas, en otras condiciones ambientales, e incluso sembradas el mismo año en parcelas adyacentes enfatizan que el medio ambiente durante el crecimiento y la cosecha del cultivo juega un papel crítico. Del mismo modo, la técnica de almacenamiento y el procesamiento también son importantes para el mantenimiento del vigor y la viabilidad de los alimentos (Gough 2020).

CONCLUSIONES

El centeno es un cereal que se adapta a condiciones ambientales adversas. En el presente estudio, un aumento en la irrigación no necesariamente mejora la calidad del cultivo. Por lo que puede considerarse como una alternativa para maximizar la productividad agrícola de una manera sostenible promoviendo una gestión eficiente de agua con el uso del riego por goteo. El análisis de

correlación explica el comportamiento y relación de las variables. Los granos de centeno tuvieron buen rendimiento y alto contenido de proteínas, demostrando su adaptación al entorno edafoclimático de la Costa de Hermosillo, donde se presentan condiciones desfavorables de agua y temperatura. Esto puede favorecer la propuesta de establecer la variedad de centeno criollo-Tlaxcala como cereal primario en Sonora. A pesar de que el cultivo tiene menos sensibilidad a las variaciones ambientales, para poder respaldar la implementación del cultivo en el noroeste de México, es necesario una investigación más sobre diferentes entornos. Además de investigar sobre el tipo y la calidad de las proteínas presentes en el grano para conocer la estabilidad fenotípica y valor nutricional del cultivo.

AGRADECIMIENTOS

Sosa-Yañez fue apoyada por una beca de CONACYT-México (No. 785398). Los autores agradecen a Juan Pedro López-Córdova, Ramón Dolores Valdez-Domínguez y a las personas involucradas en todo el trabajo de campo. Igualmente, agradecemos a José Luis Cárdenas-López, Dr. Pedro Cano-Ríos y M.C. José Guadalupe González-Quirino por su apoyo en varios apartados de los análisis de datos

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia

LITERATURA CITADA

- AACC (2000) Approved Methods of the AACC. American Association of Cereal Chemists. 10th Edition. Minnesota, EUA. Methods 55.10.01 and 46-13.
- Akter N, Rafiqul IM (2017) Heat stress effects and management in wheat. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 37: 1-17. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0443-9>.
- Andersson AA, Dimberg L, Åman P, Landberg R (2014) Recent findings on certain bioactive components in whole grain wheat and rye. *Journal of Cereal Science* 59(3): 294-311. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.01.003>.
- Araki R, Takano Y, Miyazaki H, Ii H, An P (2022) Drought stress alters iron accumulation in *Sorghum bicolor* seeds. *Environmental and Experimental Botany* 204: 105093. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105093>.
- Atkinson NJ, Urwin PE (2012) The interaction of plant biotic and abiotic stresses: from genes to the field. *Journal of Experimental Botany* 63(10): 3523-3543. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers100>.
- Basche AD, Kaspar TC, Archontoulis SV, Jaynes DB, Sauer TJ, Parkin TB, Miguez FE (2016) Soil water improvements with the long-term use of a winter rye cover crop. *Agricultural Water Management* 172: 40-50. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.04.006>.
- Beckles DM, 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>.
- Bobadilla-Meléndez M, Gámez-Vázquez AJ, Ávila-Perches MA, García-Rodríguez JJ, Espitia-Rangel E, Moran-Vázquez N, Covarrubias-Prieto J (2013) Yield and quality of oat seed in function of date and plant density. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4(7): 973-985.

- Boskov HH, Andreasen M, Nielsen M, Larsen L, Knudsen BK, Meyer A, Christensen L, Hansen Å (2002) Changes in dietary fibre, phenolic acids, and activity of endogenous enzymes during rye bread-making. *European Food Research and Technology* 214: 33-42. <https://doi.org/10.1007/s00217-001-0417-6>.
- Castellanos JZ, Uvalle Bueno JX, Aguilar Santelises A (2000) Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. 2da Edición. INTAGRI-Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura. San Miguel de Allende, Guanajuato, México. 10, 65 y 161p.
- Chakraborty S, Roychoudhury A (2022) Morphological, Architectural and Biochemical Modifications of Cereal Crops During Abiotic Stress. In: Roychoudhury A, Aftab T, Acharya K (eds) *Omics Approach to Manage Abiotic Stress in Cereals*. Springer, Singapore. pp. 1-20. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0140-9_1.
- CESAVE-SIAFESON (2021) Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Sonora-Sistema de Alerta Fitosanitaria del Estado de Sonora. REMAS-Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas de Sonora. Estación meteorológica de la Costa de Hermosillo: LA BACHATA. <https://www.siafeson.com/remas/index.php/estacionglobal?rid=94>. Fecha de consulta: 25 de julio de 2021.
- Darikandeh D, Shahnazari A, Khoshravesh M, Hoogenboom G (2022) Impact of climate change on water requirement, water productivity, and rice yield using risk analysis. *Irrigation Sciences and Engineering* 46(3): 35-55. <https://doi.org/10.22055/jise.2022.41556.2036>.
- Dresselhaus T, Hückelhoven R (2018) Biotic and abiotic stress responses in crop plants. *Agronomy* 8(11): 267. <https://doi.org/10.3390/agronomy8110267>.
- Dziki D (2022) Rye flour and rye bran: new perspectives for use. *Processes* 10(2): 293. <https://doi.org/10.3390/pr10020293>.
- Elliott J, Deryng D, Müller C, Frieler K, Konzmann M, Gerten D, Glotter M, Flörke M, Wada Y, Best N, Eisner S, Fekete BM, Folberth C, Foster I, Gosling SN, Haddeland I, Khabarov N, Ludwig F, Masaki Y, Olin S, Rosenzweig C, Ruane AC, Satoh Y, Schmid E, Stacke T, Tang Q, Wisser D (2014) Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111(9): 3239-3244. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222474110>.
- Flores OMA, Palomo RM, Figueroa VU (2011) Producción de forraje con cereales de grano pequeño. 1era Edición. Folleto Técnico No. 37. Campo Experimental Zacatecas. CIRNOC/INIFAP-Centro de Investigación Regional Norte Centro/Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. pp. 6-7.
- García E (2004) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251-1>. Fecha de consulta: 12 de noviembre de 2022.
- Gartley KL (2011) Recommended methods for measuring soluble salts in soils. In: *Recommended soil testing procedures for the Northeastern United States*. Northeastern Regional Publication, University of Delaware, Agricultural Experiment Station 493: 1864-2.
- Gooding MJ, Ellis RH, Shewry PR, Schofield JD (2003) Effects of restricted water availability and increased temperature on the grain filling, drying and quality of winter wheat. *Journal of Cereal Science* 37(3): 295-309. <https://doi.org/10.1006/jcrs.2002.0501>.
- Gough RE (2020) Seed quality: Basic mechanisms and agricultural implications. Basra AS (ed) CRC Press, New York, USA. 412p.
- Groppa M (1983) Riego por goteo. *Palmas* 4(1): 35-36
- Gupta S, Yadav B, Timalsina B, Ganesh GC, Bhuj N, Roka P, Bhandari R (2022) Physiological, morphological & biochemical response of wheat (*Triticum Aestivum*) against heat & drought stress and the tolerance mechanism-a review. *Reviews in Food and Agriculture* 3(1): 43-47. <https://doi.org/10.26480/rfna.01.2022.43.47>.
- Hansen HB, Møller B, Andersen SB, Jørgensen JR, 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>.
- Hollins PD, Kettlewell PS, Peltonen-Sainio P (2004) Relationships between climate and winter cereal grain quality in Finland and their potential for forecasting. *Agricultural and Food Science* 13(3): 295-308. <https://doi.org/10.2137/1239099042643107>.

- Hübner M, Wilde P, Schmiedchen B, Dopierala P, Gowda M, Reif JC, Miedaner T (2013) Hybrid rye performance under natural drought stress in Europe. *Theoretical and Applied Genetics* 126: 475-482. <https://doi.org/10.1007/s00122-012-1994-4>.
- ISTA (1996) International Seed Testing Association. International Rules for Seed Testing. Seed Science and Technology, Zürich, Switzerland.
- Jaikumar NS, Snapp SS, Murphy K, Jones SS (2012) Agronomic assessment of perennial wheat and perennial rye as cereal crops. *Agronomy Journal* 104(6): 1716-1726. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0291>.
- Javaid MM, Mahmood A, Alshaya DS, Alkahtani MD, Waheed H, Wasaya A, Khan SA, Naqve M, Haider I, Shahid MA, Nadeem MA, Azmat S, Khan BA, Balal RM, Attia KA, Fiaz S(2022) Influence of environmental factors on seed germination and seedling characteristics of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Scientific Reports* 12(1): 9522. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13416-6>.
- Jian F (2022) A general model to predict germination and safe storage time of crop seeds. *Journal of Stored Products Research* 99: 102041. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2022.102041>.
- Jonsson K, Andersson R, Knudsen KEB, Hallmans G, Hanhineva K, Katina K, Kolehmainen M, Kyrø C, Langton M, Nordlund E, et al. (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>.
- Kleinpaul JA, Filho AC, Silveira DL, Neu IMM, Bandeira CT, Provedi A (2018) Nonlinear models for plant height of rye cultivars at sowing times. *Journal of Agricultural Science* 10(12): 157-170. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n12p157>.
- Kottmann L, Wilde P, Schittenhelm S (2016) How do timing, duration, and intensity of drought stress affect the agronomic performance of winter rye?. *European Journal of Agronomy* 75: 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.12.010>.
- Kuzminykh AN, Pashkova GI, Novoselov SI (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 HP, 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>.
- Lan Y, Chawade A, Kuktaite R, Johansson E (2022) Climate change impact on wheat performance—effects on vigour, plant traits and yield from early and late drought stress in diverse lines. *International Journal of Molecular Sciences* 23(6): 3333. <https://doi.org/10.3390/ijms23063333>.
- Lawas LMF, Zuther E, Jagadish SK, Hinch DK (2018) Molecular mechanisms of combined heat and drought stress resilience in cereals. *Current Opinion in Plant Biology* 45: 212-217. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2018.04.002>.
- Li Q, Wei M, Li Y, Feng G, Wang Y, Li S, Zhang D (2019) Effects of soil moisture on water transport, photosynthetic carbon gain and water use efficiency in tomato are influenced by evaporative demand. *Agricultural Water Management* 226: 105818. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105818>.
- 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-Córdova JP, Rodríguez-Félix F, Wong-Corral FJ, Ramírez-Reyes F, Rueda-Puente EO, López-Ahumada GA (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 JP, Rueda-Puente EO, Vargas-López JM, Wong-Corral FJ, López-Ahumada GA (2018) Rendimiento y calidad de grano en centeno (*Secale cereale* L) bajo diferentes condiciones de fertilización en el estado de Sonora, México. *Biotecnica* 20(3): 76-82. <https://doi.org/10.18633/biotecnica.v20i3.716>.
- Mahender A, Anandan A, Pradhan SK (2015) Early seedling vigour, an imperative trait for direct-seeded rice: an overview on physio-morphological parameters and molecular markers. *Planta* 241(5): 1027-1050. <https://doi.org/10.1007/s00425-015-2273-9>.
- Melandri G, AbdElgawad H, Riewe D, Hageman JA, Asard H, Beemster GT, Kadam N, Jagadish K, Altmann T, Ruyter-Spira C, Bouwmeester H (2020) Biomarkers for grain yield stability in rice under drought stress. *Journal of Experimental Botany* 71(2): 669-683. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz221>.

- Mellado ZM (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 ZM, Matus TI, Madariaga BR (2008) Antecedentes sobre el centeno en Chile y otros países. Boletín 182. INIA-Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Chillán, Chile. 64p.
- Murillo-Amador B, Escobar-H A, Fraga-Mancillas H, Pargas-Lara 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. <https://doi.org/10.35196/rfm.2001.2.145>.
- Neiff N, González-Pérez L, Mendoza-Lugo JA, Martínez C, Kettler BA, Dhliwayo T, Babu R, Trachsel S (2022) QTL and genomic prediction accuracy for grain yield and secondary traits in a maize population under heat and heat-drought stresses. Journal of Crop Improvement 37(5): 709-734. <https://doi.org/10.1080/15427528.2022.2145591>.
- Nasiri S, Andalibi B, Tavakoli-Zaniani A, Delavar MA (2023) Investigation the impacts of mineral biochar and methyl jasmonate application on biochemical characteristics and yield of barley under drought stress. Environmental Stresses in Crop Sciences 16(2): 561-574. <https://doi.org/10.22077/escs.2023.4823.2076>.
- Németh R, Tömösközi S (2021) Rye: Current state and future trends in research and applications. Acta Alimentaria 50(4): 620-640. <https://doi.org/10.1556/066.2021.00162>.
- Patindol JA, Siebenmorgen TJ, Wang YJ (2015) Impact of environmental factors on rice starch structure: A review. Starch-Stärke 67(1-2): 42-54. <https://doi.org/10.1002/star.201400174>.
- Pequeno DN, Hernandez-Ochoa IM, Reynolds M, Sonder K, Molero Milan A, Robertson RD, Lopes MS, Xiong W, Kropff M, Asseng S (2021) Climate impact and adaptation to heat and drought stress of regional and global wheat production. Environmental Research Letters 16(5): 054070. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd970>.
- Peratoner G, Seling S, Klotz C, Florian C, Figl U, Schmitt AO (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>.
- Qi Z, Helters MJ (2010) Soil water dynamics under winter rye cover crop in central Iowa. Vadose Zone Journal 9(1): 53-60. <https://doi.org/10.2136/vzj2008.0163>.
- Qin W, Wang J, Ma L, Wang F, Hu N, Yang X, Yu K (2022) UAV-based multi-temporal thermal imaging to evaluate wheat drought resistance in different deficit irrigation regimes. Remote Sensing 14(21): 5608. <https://doi.org/10.3390/rs14215608>.
- Richer-de-Forges AC, Arrouays D, Chen S, Román M, Libohova Z, Roudier P, Minasny B, Bourennane H (2022) Hand-feel soil texture and particle-size distribution in central France. Relationships and implications. CATENA 213: 106155. 10.1016. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106155>.
- Rodríguez-Quilón I, Adam G, Durán JM (2008) Germination tests and analysis of viability and vigor in seeds. Agricultura: Revista Agropecuaria 78(912).
- Román-Dobarco M, Cousin I, Le Bas C, Martin MP (2019) Pedotransfer functions for predicting available water capacity in French soils, their applicability domain and associated uncertainty. Geoderma 336: 81-95. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.08.022>.
- Roy-García I, Rivas-Ruiz R, Pérez-Rodríguez M, Palacios-Cruz L (2019) Correlation: Not all correlation entails causality. Revista Alergia México 66(3): 354-360. <https://doi.org/10.29262/ram.v66i3.651>.
- Rudiyanto B, Chaney NW, Maggi F, Goh Eng Giap S, Shah RM, Fiantis D, Setiawan BI (2021) Pedotransfer functions for estimating soil hydraulic properties from saturation to dryness. Geoderma 403: 115194. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115194>.
- Schlegel RH (2013) Rye: genetics, breeding and cultivation. CRC Press Taylor & Francis Group. New York, USA 9p.
- Seleiman MF, Al-Suhaibani N, Ali N, Akmal M, Alotaibi M, Refay Y, Dindaroglu T, Abdul-Wajid HH, Battaglia ML (2021) Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. Plants 10(2): 259. <https://doi.org/10.3390/plants10020259>.
- Semenov MA, Stratonovitch P, Alghabari F, Gooding MJ (2014) Adapting wheat in Europe for climate change. Journal of Cereal Science 59(3): 245-256. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.01.006>.
- Serna-Saldívar SRO (2013) Química, almacenamiento e industrialización de cereales. Agt Editor. México. 703p.
- Shahmoradi S, Ghotbi V (2022) Evaluation of Iranian rye (*Secale cereale* L.) ecotypes under late season drought stress. Environmental Stresses in Crop Sciences 15(1): 19-29. <http://dx.doi.org/10.22077/escs.2020.3507.1867>.

- Shikari AB, Dikilitas M, Simsek E, Guldur ME, Simsek U, Karakas S, Abdel Latef AAH (2022) Nanotechnology and its role in cereal crops under abiotic stress. In: Abdel Latef AAH (eds) Sustainable remedies for abiotic stress in cereals. Springer Nature Singapore. pp. 675-687. https://doi.org/10.1007/978-981-19-5121-3_26.
- SIAP (2022) Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Estadística de Producción Agrícola. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>. Fecha de consulta: 30 de noviembre de 2022.
- Slafer GA, Savin R, Sadras VO (2014) Coarse and fine regulation of wheat yield components in response to genotype and environment. *Field Crops Research* 157: 71-83. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.12.004>.
- Sluková M, Jurkaninová L, Gillarová S, Horáčková Š, Skřivan P (2021) Rye—nutritional and technological evaluation in Czech cereal technology – A review: Sourdoughs and bread. *Czech Journal of Food Sciences* 39(2): 65-70. <https://doi.org/10.17221/204/2020-CJFS>.
- Smolik M (2013) Discrimination of population of recombinant inbred lines of rye (*Secale cereale* L.) for different responses to nitrogen-potassium stress assessed at the seedling stage under in vitro conditions. *Electronic Journal of Biotechnology* 16(1): 5-5. <http://dx.doi.org/10.2225/vol16-issue1-fulltext-5>.
- Sosa-Yañez LC, García-Hernández JL, Rodríguez-Félix F, Bello-Pérez LA, Tovar J, López-Córdova JP, López-Ahumada GA (2022) Influencia de tres regímenes de riego sobre la calidad agronómica de centeno cultivado en la costa de Hermosillo, Sonora, México. *Terra Latinoamericana* 40: e1073. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1073>.
- Stępień A, Wojtkowiak K, Pietruszewicz M, Skłodowski M, Pietrzak-Fiećko R (2016) The yield and grain quality of winter rye (*Secale cereale* L.) under the conditions of foliar fertilization with micronutrients (Cu, Zn and Mn). *Polish Journal of Natural Sciences* 31(1): 33-46.
- Szuleta E, Phillips T, Knott CA, Lee CD, Van Sanford DA (2022) Influence of planting date on winter rye performance in Kentucky. *Agronomy* 12(11): 2887. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112887>.
- Tariq A, Ullah I, Sardans J, Graciano C, Mussarat S, Ullah A, Zeng F, Wang W, Al-Bakre DA, Ahmed Z, Ali S, Zhang Z, Yaseen IA, Peñuelas J (2023) Strigolactones can be a potential tool to fight environmental stresses in arid lands. *Environmental Research* 229: 115966. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115966>.
- Thitisaksakul M, Jiménez RC, Arias MC, Beckles DM (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.
- Wrigley C, Bushuk W (2010) Rye and triticale: Characteristics and quality requirements. In: Wrigley CW, Batey IL (eds) *Cereal grains: Assessing and managing quality*. Woodhead Publishing. Washington. pp. 112-140. <https://doi.org/10.1533/9781845699529.2.112>.
- Yu H, Cao Y, Wang Z, Zhang J, Yang L, Zhao Z, Wang S, Zhou Z, Loka DA, Hu W (2023a) Identification of the most sensitive stage of cotton microspore development to water deficit and analysis of carbohydrate metabolism related to pollen viability. *Environmental and Experimental Botany* 206: 105168. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105168>.
- Yu L, Huang Z, Tang S, Korpelainen H, Li C (2023b) *Populus euphratica* males exhibit stronger drought and salt stress resistance than females. *Environmental and Experimental Botany* 205: 105114. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105114>.
- Yu X, Li B, Wang L, Chen X, Wang W, Gu Y, Wang Z, Xiong F (2016) Effect of drought stress on the development of endosperm starch granules and the composition and physicochemical properties of starches from soft and hard wheat. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 96(8): 2746-2754. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7439>.