



Growth and productivity of *Lotus corniculatus* L. under optimal and suboptimal irrigation conditions in open fields in Northern Mexico

Crecimiento y productividad de *Lotus corniculatus* L. bajo condiciones de riego óptimo y subóptimo en campo abierto en el norte de México

✉ Aurelio Pedroza-Sandoval^{1*}, ✉ Isaac Gramillo-Ávila¹, ✉ José Alfredo Samaniego-Gaxiola²

¹Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Carretera Gómez Palacio-Chihuahua, Bermejillo, Durango, C. P. 35230, México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Blvd. José Santos Valdés 1200 poniente, Matamoros, Coahuila, C. P. 27440, México.

*Corresponding author: apedroza@chapingo.uruza.edu.mx

Abstract

Water scarcity in arid and semi-arid regions limits the sustainability of livestock systems, making it necessary to evaluate forage crops with greater water use efficiency. *Lotus corniculatus* L. has emerged as an alternative due to its nutritional value and tolerance to environmental stress conditions. The objective of this study was to evaluate the agronomic performance of five ecotypes and one variety of *L. corniculatus* grown under optimal soil moisture content (OSMC) and suboptimal soil moisture content (SSMC) conditions in open fields in Northern Mexico. During spring and under SSMC, ecotype 255301, and the Estanzuela Ganador (EG) variety showed significantly higher values in stem length and number; likewise, EG registered the highest leaf area index (LAI) under OSMC. In summer, ecotypes 255305 and 255301 showed the best performance in stem length and rhizome crown diameter (RCD) under OSMC, while EG stood out in LAI. Fresh biomass production per rhizome (FBPR) in spring showed slight variations among the genetic materials under OSMC, while under SSMC, EG, and ecotype 255301 recorded the highest FBPR values (577.3 and 547.6 g, respectively). In summer and under OSMC, ecotype 255301 and EG maintained the highest FBPR (321.6 and 303.5 g, respectively), while ecotype 255301 showed the highest productivity (333.6 g) under SSMC.

Keywords: plant stress physiology, water deficit tolerance, forage, drought, livestock.

Resumen

La escasez hídrica en regiones áridas y semiáridas limita la sostenibilidad de los sistemas ganaderos, lo que hace necesario evaluar cultivos forrajeros con mayor eficiencia en el uso del agua. *Lotus corniculatus* L. ha emergido como una alternativa por su valor nutricional y tolerancia a condiciones de estrés ambiental. El objetivo del estudio fue evaluar el desempeño agronómico de cinco ecotipos y una variedad de *L. corniculatus* cultivados en condiciones de contenido óptimo de humedad del suelo (COHS) y de contenido subóptimo de humedad del suelo (CSHS) en campo abierto en la región norte de México. Durante la primavera y bajo CSHS, el ecotipo 255301 y la variedad Estanzuela Ganador (EG) presentaron valores significativamente mayores en longitud y número de tallos; asimismo, EG registró el mayor índice de área foliar (IAF) bajo COHS. En verano, los ecotipos 255305 y 255301 mostraron el mejor desempeño en la longitud de tallos y en el diámetro de corona del rizoma (DCR) bajo COHS, mientras que EG destacó en IAF. La producción de biomasa fresca por rizoma (PBFR) en primavera presentó ligeras variaciones entre los materiales genéticos bajo COHS, mientras que en CSHS, EG y el ecotipo 255301 registraron los valores más altos de PBFR (577.3 y 547.6 g, respectivamente). En verano y bajo COHS, el ecotipo 255301 y EG mantuvieron la mayor PBFR (321.6 y 303.5 g, respectivamente), mientras que el ecotipo 255301 presentó la mayor productividad (333.6 g) bajo CSHS.

Palabras clave: fisiología del estrés vegetal, tolerancia al déficit hídrico, forrajes, sequía, ganadería.

Please cite this article as follows (APA 7): Pedroza-Sandoval, A., Gramillo-Ávila, I., & Samaniego-Gaxiola, J. A. (2026). Growth and productivity of *Lotus corniculatus* L. under optimal and suboptimal irrigation conditions in open fields in northern Mexico. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 25, e2511. <https://doi.org/10.5154/r.rchsza.2025.09.11>



Revista Chapingo
Serie Zonas Áridas

Introduction

Arid and semi-arid zones are characterized by limited annual rainfall (between 200–350 and 350–600 mm, respectively), while evaporation can exceed up to 10 times the rainfall values (Pedroza-Sandoval et al., 2022). This water imbalance imposes severe restrictions on water availability and compromises the stability of agricultural production systems. In this context, water resources are a central element of environmental policy and a key factor in socioeconomic development policy, since their availability conditions the viability of agroecological regions on a global scale (Instituto Mexicano para la Competitividad [IMCO], 2023). When precipitation falls below historical averages, hydrological imbalances occur that negatively affect agricultural productivity (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2019).

In Mexico, 75.7 % of the freshwater available for productive activities is allocated to the agricultural sector (CONAGUA, 2019). Agriculture, in addition to being a pillar of the rural economy, drives regional growth in areas with geographical and climatic conditions favorable for irrigation (Pérez-Blanco et al., 2011). A representative case is the Comarca Lagunera region, comprised of municipalities in the states of Durango and Coahuila, Mexico. This region has an annual demand of 127 million cubic meters of potable water, which is extracted primarily from underground sources. Its economic importance in the primary sector contrasts sharply with its water scarcity problems stemming from aquifer overexploitation. Reports indicate that 930.9 Mm³ are extracted annually compared to a recharge of 518.9 Mm³, representing a deficit of 44.25 % (Agua para todos, 2016). This sustained pressure jeopardizes regional productive sustainability (Esparza, 2014).

The Comarca Lagunera region is distinguished by its high production of bovine milk under intensive systems. Producers in the region contribute approximately 42 % of the national production (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SADER], 2019), which implies a high demand for forages with high protein content for feeding dairy cattle and, to a lesser extent, beef cattle (Cerdas-Ramírez, 2013). However, this production model entails a considerable socio-environmental cost associated with the overexploitation of the aquifer.

Given this scenario, strategies aimed at mitigating water stress have been explored, such as water harvesting (Pedroza-Sandoval et al., 2022), monitoring of soil and climate conditions (SADER, 2016), and the use of genetic materials tolerant to water deficit (González-Espíndola et al., 2024). In addition, alternative forage crops have been introduced and evaluated, capable

Introducción

Las zonas áridas y semiáridas se caracterizan por presentar precipitaciones anuales limitadas (entre 200–350 y 350–600 mm, respectivamente), mientras que la evaporación puede superar hasta 10 veces los valores de precipitación (Pedroza-Sandoval et al., 2022). Este desequilibrio hídrico impone severas restricciones a la disponibilidad de agua y compromete la estabilidad de los sistemas agroproductivos. En este contexto, el recurso hídrico es un elemento central de la política ambiental y un factor clave de la política de desarrollo socioeconómico, ya que su disponibilidad condiciona la viabilidad de las regiones agroecológicas a escala global (Instituto Mexicano para la Competitividad [IMCO], 2023). Cuando la precipitación se sitúa por debajo de los promedios históricos, se generan desequilibrios hidrológicos que afectan negativamente la productividad agrícola (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2019).

En México, el 75.7 % del agua dulce disponible para actividades productivas se destina al sector agrícola (CONAGUA, 2019). La agricultura, además de ser un pilar de la economía rural, impulsa el crecimiento regional en zonas con condiciones geográficas y climáticas favorables para el riego (Pérez-Blanco et al., 2011). Un caso representativo es la Comarca Lagunera, integrada por municipios de los estados de Durango y Coahuila, México. Esta región presenta una demanda anual de 127 Mm³ de agua potable que se extrae principalmente del subsuelo. Su relevancia económica en el sector primario contrasta con su problemática de escasez hídrica derivada de la sobreexplotación del acuífero, ya que se ha reportado que anualmente se extraen 930.9 Mm³ frente a una recarga de 518.9 Mm³, lo que representa un déficit de 44.25 % (Agua para todos, 2016). Esta presión sostenida compromete la sostenibilidad productiva regional (Esparza, 2014).

La Comarca Lagunera se distingue por su elevada producción de leche bovina bajo sistemas intensivos. Los productores de la región aportan aproximadamente el 42 % de la producción nacional (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SADER], 2019), lo que implica una alta demanda de forrajes con elevado contenido proteico para la alimentación del ganado lechero y, en menor proporción, del ganado de carne (Cerdas-Ramírez, 2013). No obstante, este modelo productivo conlleva un considerable costo socioambiental asociado a la sobreexplotación del acuífero.

Ante este escenario, se han explorado estrategias orientadas a mitigar la presión hídrica, como cosecha de agua (Pedroza-Sandoval et al., 2022), monitoreo de condiciones edafoclimáticas (SADER, 2016) y uso de materiales genéticos tolerantes al déficit hídrico (González-Espíndola et al., 2024). Asimismo, se han introducido y evaluado cultivos forrajeros alternativos, capaces de

of competing productively with traditional species while simultaneously improving water use efficiency. These crops include prickly pear cactus (*Opuntia* spp.), agave (*Agave* spp.) (Castro-Rivera et al., 2016), and different varieties of clover (*Lotus* spp.) (Pedroza-Sandoval et al., 2024). The latter offer significant agronomic advantages, as they can be established in both pasture systems and cutting systems for obtaining fresh or dry forage.

Among the varieties of clover, *Lotus corniculatus* L. (bird's foot clover) has been evaluated under semi-controlled shade netting conditions in arid areas of Northern Mexico (González-Espíndola et al., 2024; Xolocotzi-Acoltzi et al., 2024a), to analyze its ability to adapt to environments with low rainfall and extreme temperatures (Álvarez-Vázquez et al., 2018). In this regard, it is pertinent to expand evaluations under open-field conditions, select genetic materials with adaptive behavior under shade netting, and evaluate their tolerance to water deficit in open-field conditions.

Several studies support the productive potential of *L. corniculatus*. Its establishment in pastures has been documented to improve milk production and dry matter intake in cattle (Morales et al., 2013). Álvarez-Vázquez et al. (2020) observed a direct relationship between light interception and forage accumulation. Ramírez-Restrepo et al. (2006) evaluated the seasonal and annual forage accumulation rate and the seasonal dynamics of the net accumulation rate of ungrazed forage of *L. corniculatus* compared with perennial ryegrass (*Lolium perenne*) and white clover (*Trifolium repens*). These authors reported that *L. corniculatus* has the potential to increase sheep breeding performance due to its ability to grow in acidic soils, its tolerance to low summer-autumn rainfall, and its high nutritional value.

Based on the above, the objective of this study was to evaluate the agronomic performance of five ecotypes and one variety of *L. corniculatus* grown under conditions of optimum soil moisture content (OSMC) and suboptimal soil moisture content (SSMC) in open fields in Northern Mexico.

Materials and methods

The study was conducted at the *Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas (URUZA)* of the Chapingo Autonomous University (UACH) in Bermejillo, Durango, Mexico (between 101° 41' and 104° 61' W, 24° 22' and 26° 23' N, at 1 100 m a. s. l.). It has a dry desert climate, with summer rains and cool winters, an average annual precipitation of 258 mm and a potential evaporation of 2 000 mm. The average annual temperature is 21 °C, with highs of 33.7 °C and lows of 7.5 °C (Medina-García et al., 2005).

competir productivamente con especies tradicionales y, al mismo tiempo, mejorar la eficiencia en el uso del agua. Entre estos cultivos se encuentran el nopal (*Opuntia* spp.), el maguey (*Agave* spp.) (Castro-Rivera et al., 2016) y diferentes variedades de trébol (*Lotus* spp.) (Pedroza-Sandoval et al., 2024). Estas últimas presentan ventajas agronómicas relevantes, ya que se pueden establecer tanto en sistemas de pradera como en esquemas de corte para la obtención de forraje fresco o seco.

Entre las variedades de trébol, *Lotus corniculatus* L. (trébol pata de pájaro) ha sido evaluado bajo condiciones semicontroladas de malla sombra en zonas áridas del norte de México (González-Espíndola et al., 2024; Xolocotzi-Acoltzi et al., 2024a), con el propósito de analizar su capacidad de adaptación a ambientes con baja precipitación y temperaturas extremas (Álvarez-Vázquez et al., 2018). En este sentido, resulta pertinente ampliar las evaluaciones bajo condiciones de campo abierto, seleccionar los materiales genéticos con comportamiento adaptativo bajo malla sombra y evaluar su tolerancia al déficit hídrico en campo abierto.

Diversos estudios respaldan el potencial productivo de *L. corniculatus*. Se ha documentado que su establecimiento en praderas mejora la producción de leche y el consumo de materia seca en bovinos (Morales et al., 2013). Álvarez-Vázquez et al. (2020) observaron una relación directa entre la intercepción lumínica y la acumulación de forraje. Ramírez-Restrepo et al. (2006) evaluaron la tasa de acumulación de forraje (estacional y anual) y la dinámica estacional de la tasa de acumulación neta de forraje no pastoreado de *L. corniculatus* en comparación con el raigrás perenne (*Lolium perenne*) y el trébol blanco (*Trifolium repens*). Estos autores reportaron que *L. corniculatus* tiene el potencial de aumentar el rendimiento de la cría de ovejas debido a su capacidad de crecer en suelos ácidos, su tolerancia a las bajas precipitaciones de verano-otoño y su elevado valor nutricional.

Con base en lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar el desempeño agronómico de cinco ecotipos y una variedad de *L. corniculatus* cultivados en condiciones de contenido óptimo de humedad del suelo (COHS) y de contenido subóptimo de humedad del suelo (CSHS) en campo abierto en la región norte de México.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en la *Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas (URUZA)* de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) en Bermejillo, Durango, México (entre los 101° 41' y 104° 61' O, 24° 22' y 26° 23' N, a 1 100 m s. n. m.). Presenta clima seco desértico, lluvias en verano e inviernos frescos, precipitación media anual de 258 mm y evaporación potencial de 2 000 mm. La temperatura media anual es de 21 °C, con máximas de 33.7 °C y mínimas de 7.5 °C (Medina-García et al., 2005).

Plant material

Five ecotypes of bird's foot clover (*L. corniculatus* L.) identified with the codes 255301, 227318, 255305, 202700, and 226792, as well as the commercial variety Estanzuela Ganador (EG), were evaluated. These materials were selected for their survival and adaptive performance in a preliminary evaluation under semi-controlled shade netting conditions (Pedroza-Sandoval et al., 2024).

Propagation was carried out asexually using stem cuttings placed in polystyrene cups with distilled water for 35 days, during which time they developed primary roots. Subsequently, the rooted cuttings were individually transplanted into 0.5 kg black polyethylene bags containing a soil:compost:peat moss (50:30:20, v/v) substrate. The plants were allowed to develop for two months (from February to March 2023) before being planted in open fields.

Experimental design

A randomized complete block design with a split-plot arrangement and three replications was established. The large plots (arranged in parallel) corresponded to the moisture regimes: optimum soil moisture content (OSMC) and suboptimal soil moisture content (SSMC), $25 \pm 2\%$ (23–27 %) and $20 \pm 2\%$ (18–22 %) of soil moisture, respectively. Humidity was monitored in real time with a digital sensor (PMS-714, Lutron Electronic Enterprise Co., Taiwan), and irrigation times were adjusted based on the flow rate of the drip tape. The small plots corresponded to the six genetic materials evaluated.

The experimental unit (plant material) consisted of a 2×1 m plot with three established rhizome plants, spaced 0.5 m apart. Each large plot (soil moisture content) was 12 m long. Two plants were randomly selected from each experimental unit for analysis.

Evaluations were performed every 45 days between cuts, following a 60-days after transplant (dat) establishment period. Two cuts were made per season in spring and summer, and one cut in autumn and winter.

Soil preparation and irrigation system

The soil was prepared using a disc plow with a walk-behind tractor (643100, Zip Star, Mexico) to loosen compaction to a depth of 30 cm. Subsequently, a drip irrigation system was installed, consisting of a 2-inch PVC main pipe, lateral lines, and drip tapes arranged in rows. Each pair of drip tapes had a valve to control irrigation based on moisture levels. Previously, soil

Material vegetal

Se evaluaron cinco ecotipos de trébol pata de pájaro (*L. corniculatus* L.) identificados con los códigos 255301, 227318, 255305, 202700 y 226792, así como la variedad comercial Estanzuela Ganador (EG). Estos materiales se seleccionaron por su supervivencia y desempeño adaptativo en una evaluación preliminar bajo condiciones semicontroladas de malla sombra (Pedroza-Sandoval et al., 2024).

La propagación se realizó de forma asexual mediante tallos colocados en vasos de unicel con agua destilada durante 35 días, periodo en el que desarrollaron raíces primarias. Posteriormente, los tallos enraizados se trasplantaron individualmente a bolsas negras de polietileno de 0.5 kg con suelo:compost:peat moss (50:30:20, v/v) como sustrato. Las plantas se dejaron desarrollar durante dos meses (de febrero a marzo de 2023) antes de su establecimiento en campo abierto.

Diseño de experimental

Se estableció un diseño experimental de bloques completos al azar con arreglo en parcelas subdivididas y tres repeticiones. Las parcelas grandes (dispuestas de manera paralela) correspondieron a los regímenes de humedad: contenido óptimo de humedad del suelo (COHS) y contenido subóptimo de humedad del suelo (CSHS), $25 \pm 2\%$ (23–27 %) y $20 \pm 2\%$ (18–22 %) de humedad del suelo, respectivamente. La humedad se monitoreó en tiempo real con un sensor digital (PMS-714, Lutron Electronic Enterprise Co., Taiwán), y los tiempos de riego se ajustaron con base en el gasto de los goteros de la cintilla. Por su parte, las parcelas chicas correspondieron a los seis materiales genéticos evaluados.

La unidad experimental (material vegetal) consistió en una parcela de 2×1 m con tres plantas establecidas como rizomas, con separación de 0.5 m. Cada parcela grande (contenido de humedad del suelo) tuvo 12 m de longitud. De cada unidad experimental se seleccionaron dos plantas al azar para su análisis.

Las evaluaciones se realizaron cada 45 días entre cortes, posteriores a un periodo de establecimiento de 60 días después del trasplante (ddt). Se efectuaron dos cortes por estación en primavera y verano, y un corte en otoño e invierno.

Preparación del suelo y sistema de riego

El suelo se preparó mediante arado de disco con motocultor (643100, Zip Star, México) para descompactar hasta 30 cm de profundidad. Posteriormente, se instaló un sistema de riego por goteo compuesto por una tubería principal de PVC de 2", líneas laterales y cintillas de

moisture constants were determined using the membrane pot method (Richards, 1948). Field capacity (FC) corresponded to 27 %, and the permanent wilting point (PWP) to 14 % gravimetric moisture.

For the first 15 dat, the soil was maintained at cover (FC) throughout the experimental area. Subsequently, moisture treatments were differentiated with irrigation intervals every 48 h. Recovery irrigations were applied for 4 h when the moisture reached the lower limit of each range: 23 % for OSMC and 18 % for SSMC.

Variables analyzed

The growth variables analyzed were stem length (SL, cm), rhizome crown diameter (RCD, mm), number of stems per rhizome (NSR), plant vigor (PV), leaf area (LA, cm²), and leaf area index (LAI). SL was measured with a measuring tape from the central bud according to the growth habit of the accession and the variety. To obtain the RCD, a digital vernier caliper was used. The PV was estimated on a scale of 0 to 10, where 0 corresponded to a wilted plant and 10 to a vigorous plant (Pedroza-Sandoval & Samaniego-Gaxiola, 2009). The AF was obtained with a portable leaf area meter (cm²) (LI-3000C, LI-COR®), and the LAI was estimated with a ceptometer (LP-80 AccuPAR, Decagon Devices).

Regarding performance variables, fresh biomass production per rhizome (FBPR, g) and dry biomass production per rhizome (DBSPR, g) were evaluated using a granary scale. FBPR was recorded at the time of aerial foliage harvesting, while DBSPR was obtained after drying the sample in a forced-air oven (1600, HAFO®, USA) at 65 °C for 24 h.

Data analysis

The data were subjected to analysis of variance and Tukey's test for mean comparison ($\alpha = 0.05$) (Steel & Torrie, 1988) using SAS version 9.0 (SAS Institute Inc, 1985). Regression analyses and associations between variables were performed using Microsoft Excel.

Results and discussion

Growth and development

A significant interaction effect was detected between soil moisture content (SMC) and the genetic materials of *L. corniculatus* (Table 1), in accordance with that reported by Pedroza-Sandoval et al. (2025). In spring and under SMC, ecotype 255301 presented the highest SL (40.0 cm), differing significantly ($p < 0.05$) from ecotypes 202700 and 226792, while EG recorded the greatest NSR (322), although it was only significantly different ($p < 0.05$) from ecotype 202700. This behavior differs from that reported by Castillo-Cabrera et al.

riego dispuestas en hileras. Cada par de cintillas tenía una válvula para controlar el riego por tratamiento de humedad. Previamente, se determinaron las constantes de humedad del suelo mediante el método de la olla de membrana (Richards, 1948). La capacidad de campo (CC) correspondió a 27 %, y el punto de marchitez permanente (PMP) a 14 % de humedad gravimétrica.

Durante los primeros 15 ddt, el suelo se mantuvo a CC en toda el área experimental. Posteriormente, se diferenciaron los tratamientos de humedad con intervalos de riego cada 48 h. Los riegos de recuperación se aplicaron durante 4 h cuando la humedad alcanzó el límite inferior de cada rango: 23 % para el COHS y 18 % para el CSHS.

Variables analizadas

Las variables de crecimiento analizadas fueron longitud de tallo (LT, cm), diámetro de corona del rizoma (DCR, mm), número de tallos por rizoma (NTR), vigor de la planta (VP), área foliar (AF, cm²) e índice de área foliar (IAF). La LT se midió con un flexómetro desde el cogollo central según el hábito de crecimiento de la accesión y la variedad. Para obtener el DCR, se usó un vernier digital. El VP se estimó en una escala de 0 a 10, donde 0 correspondió a una plana marchita y 10 a una planta vigorosa (Pedroza-Sandoval & Samaniego-Gaxiola, 2009). El AF se obtuvo con un medidor de área foliar (cm²) portátil (LI-3000C, LI-COR®) y el IAF se estimó con un ceptométer (LP-80 AccuPAR, Decagon Devices).

En cuanto a las variables de rendimiento, se evaluó la producción de biomasa fresca por rizoma (PBFR, g) y la producción de biomasa seca por rizoma (PBSPR, g) con ayuda de una balanza granataria. La PBFR se registró al momento del corte del follaje aéreo, mientras que la PBSPR se obtuvo después de secar la muestra en una estufa de aire forzado (1600, HAFO®, EUA) a 65 °C durante 24 h.

Análisis de datos

Los datos se sometieron a análisis de varianza y comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$) (Steel & Torrie, 1988) en el programa SAS ver. 9.0 (SAS Institute Inc, 1985). Los análisis de regresión y asociaciones entre variables se realizaron en Microsoft Excel.

Resultados y discusión

Crecimiento y desarrollo

Se detectó un efecto significativo de interacción entre el contenido de humedad del suelo (CHS) y los materiales genéticos de *L. corniculatus* (Cuadro 1), en concordancia con lo reportado por Pedroza-Sandoval et al. (2025). En primavera y bajo CSHS, el ecotipo 255301 presentó la

Table 1. Mean comparisons of growth and development indicators of different genetic materials of forage clover (*Lotus corniculatus* L.) under optimal (OSMC) and suboptimal (SSMC) soil moisture conditions in two seasons of the year 2023.

Cuadro 1. Comparación de medias de indicadores del crecimiento y desarrollo de diferentes materiales genéticos de trébol forrajero (*Lotus corniculatus* L.) bajo condiciones óptimas (COHS) y subóptimas (CSHS) de humedad del suelo en dos épocas del año 2023.

SMC/CHS	Ecotypes/ Variety/ Ecotipos/ Variedad	Spring/Primavera			Summer/Verano		
		SL (cm)/ LT (cm)	RCD (cm)/ DCR (cm)	NSR/ NTR	SL (cm)/ LT (cm)	RCD (cm)/ DCR (cm)	NSR/ NTR
OSMC/ COHS (25± 2 %)	255301	29.8 ± 5.7 ab	6.8 ± 0.7 a	263.6 ± 120.6 ab	29.6 ± 4.4 ab	10.0 ± 2.2 a	303.6 ± 69.5 a
	227318	22.3 ± 14.0 ab	7.8 ± 2.3 a	230.2 ± 81.0 ab	27.5 ± w8.8 abc	8.5 ± 1.4 ab	285.6 ± 115.6 a
	255305	32.5 ± 6.1 a	7.8 ± 1.0 a	261.3 ± 97.7 ab	34.0 ± 7.8 a	9.1 ± 0.7 ab	259.3 ± 102.7 a
	202700	25.3 ± 2.3 b	8.0 ± 1.3 a	197.6 ± 39.3 ab	24.3 ± 3.3 bc	8.8 ± 1.5 ab	208.6 ± 53.6 a
	226792	28.4 ± 7.8 ab	7.4 ± 0.9 a	170.0 ± 82.9 b	21.9 ± 2.0 c	7.0 ± 1.2 b	251.2 ± 99.1 a
	Estanzuela Ganador	31.3 ± 2.9 a	7.6 ± 1.2 a	272.3 ± 37.7 a	26.3 ± 9.4 bc	9.0 ± 1.4 ab	325.3 ± 146.7 a
SSMC/ CSHS (20± 2 %)	255301	40.0 ± 11.0 a	7.5 ± 1.0 a	293.6 ± 37.4 ab	33.5 ± 5.8 a	8.8 ± 1.2 a	325.0 ± 143.6 a
	227318	30.1 ± 11.2 ab	7.8 ± 2.6 a	257.3 ± 138.5 ab	24.0 ± 9.5 abc	8.4 ± 1.3 ab	297.2 ± 166.5 a
	255305	27.1 ± 2.8 ab	6.5 ± 0.8 a	205.0 ± 56.7 ab	25.1 ± 3.3 abc	8.1 ± 1.8 ab	243.0 ± 48.5 a
	202700	24.3 ± 4.9 b	7.5 ± 1.0 a	158.6 ± 67.5 b	21.0 ± 5.1 c	7.1 ± 1.0 b	206.3 ± 67.8 a
	226792	24.8 ± 3.8 b	7.33 ± 1.0 a	231.0 ± 99.4 ab	22.3 ± 1.6 bc	8.1 ± 1.0 ab	310.3 ± 83.0 a
	Estanzuela Ganador	32.0 ± 2.7 ab	8.6 ± 1.3 a	322.0 ± 60.3 a	29.7 ± 4.6 ab	8.0 ± 0.9 ab	324.3 ± 52.4 a

SMC: soil moisture content; SL: stem length; RCD: rhizome crown diameter; NSR: number of stems per rhizome. Values are mean ± standard deviation. Different letters within each column and for each humidity condition indicate significant differences (Tukey, $p \leq 0.05$).

CHS: contenido de humedad del suelo; LT: longitud de tallo; DCR: diámetro de corona del rizoma; NTR: número de tallos por rizoma. Los valores corresponden a la media ± desviación estándar. Letras diferentes dentro de cada columna y para cada condición de humedad indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

(2023), who documented superior performance of ecotype 202700 under temperate climate conditions in the State of Mexico. No significant differences ($p > 0.05$) were detected in the RCD between treatments.

In summer, under OSMC, ecotypes 255305, 255301, and 227318 showed the best performance in SL ($p < 0.05$), with values of 34.0, 29.6, and 27.5 cm, respectively (Table 1). Regarding RCD, ecotype 226792 presented the lowest value (7.0 cm), with significant differences compared to ecotype 255301 (10.0 cm). In contrast, ecotype 202700 showed the lowest growth response under SSMC. No significant effects on NSR were detected under any water conditions.

These results indicate that plant growth can be maintained even under unfavorable climatic conditions (34 °C) (Medina-García et al., 2005), provided there is adequate water availability. Furthermore, the good performance of ecotypes 255305 and 255301, previously observed under semi-controlled shade netting conditions (Xolocotzi-Acoltzi et al., 2024a), is confirmed, demonstrating their adaptive stability in open fields.

mayor LT (40.0 cm), diferenciándose significativamente ($p < 0.05$) de los ecotipos 202700 y 226792, mientras que EG registró el mayor NTR (322), aunque solo fue significativamente diferente ($p < 0.05$) del ecotipo 202700. Este comportamiento difiere de lo reportado por Castillo-Cabrera et al. (2023), quienes documentaron un desempeño superior del ecotipo 202700 bajo condiciones de clima templado en el Estado de México. No se detectaron diferencias significativas ($p > 0.05$) en el DCR entre los tratamientos.

En verano, bajo COHS, los ecotipos 255305, 255301 y 227318 mostraron el mejor desempeño en LT ($p < 0.05$), con valores de 34.0, 29.6 y 27.5 cm, respectivamente (Cuadro 1). En cuanto al DCR, el ecotipo 226792 presentó el valor más bajo (7.0 cm), con diferencias significativas respecto al ecotipo 255301 (10.0 cm). En contraste, el ecotipo 202700 registró la menor respuesta de crecimiento bajo CSHS. No se detectaron efectos significativos en el NTR bajo ninguna condición hídrica.

Estos resultados indican que el crecimiento de la planta se puede mantener aun cuando las condiciones climáticas son desfavorables (34 °C) (Medina-García

Leaf development and vigor

In spring, ecotype 226792 exhibited the greatest vigor under SSMC (9.8 on a 0–10 scale), while the LAI was highest in ecotype 255301 (4.2). Again, ecotype 202700 showed the lowest values under both humidity conditions. No significant differences in LA were observed between the genetic materials at this time (Table 2).

During the summer and under OSMC, ecotypes 226792 and 255305 showed greater vigor (10) and LA (24.1 cm²), respectively, while the EG variety presented the highest LAI (3.3) (Table 2). The observed pattern partially coincides with that reported by Xolocotzi-Acoltzi et al. (2024a), who identified ecotype 255301 as having the best LAI response under optimum moisture content in shade netting. In the present study, the best performance of this ecotype was identified under SSMC in open fields, suggesting high adaptive plasticity. The LAI is closely related to photosynthetic capacity and forage biomass accumulation (Chen et al., 2023; Pedroza-Sandoval et al., 2024).

et al., 2005), siempre y cuando exista disponibilidad hídrica adecuada. Asimismo, se confirma el buen desempeño de los ecotipos 255305 y 255301, observado previamente en condiciones semicontroladas de malla sombra (Xolocotzi-Acoltzi et al., 2024a), lo cual evidencia su estabilidad adaptativa en campo abierto.

Desarrollo foliar y vigor

En primavera, el ecotipo 226792 presentó el mayor vigor bajo CSHS (9.8 en escala 0–10), mientras que el IAF fue mayor en el ecotipo 255301 (4.2). Nuevamente, el ecotipo 202700 fue el que presentó los valores más bajos en ambas condiciones de humedad. No se observaron diferencias significativas en el AF entre los materiales genéticos en esta época (Cuadro 2).

Durante el verano y bajo COHS, los ecotipos 226792 y 255305 mostraron mayor vigor (10) y AF (24.1 cm²), respectivamente, mientras que la variedad EG presentó el mayor IAF (3.3) (Cuadro 2). El patrón observado coincide parcialmente con lo reportado por Xolocotzi-Acoltzi et al. (2024a), quienes identificaron

Table 2. Mean comparisons of indicators of leaf development and vigor of different genetic materials of forage clover (*Lotus corniculatus* L.) under optimal (OSMC) and suboptimal (SSMC) soil moisture conditions in two seasons of the year 2023.

Cuadro 2. Comparación de medias de indicadores de desarrollo foliar y vigor de diferentes materiales genéticos de trébol forrajero (*Lotus corniculatus* L.) bajo condiciones óptimas (COHS) y subóptimas (CSHS) de humedad del suelo en dos épocas del año 2023.

SMC/CHS	Ecotypes/ Variety/ Ecotipos/ Variedad	Spring/Primavera			Summer/Verano		
		VIG (0-10)	LA (cm ²)/ AF (cm ²)	LAI/ IAF	VIG (0-10)	LA (cm ²)/ AF (cm ²)	LAI/ IAF
OSMC/ COHS (25 ± 2 %)	255301	8.8 ± 0.40 abc	39.4 ± 6.66 a	2.4 ± 0.32 b	9.6 ± 0.51 ab	18.8 ± 7.14 ab	2.4 ± 0.46 ab
	227318	8.5 ± 0.54 bc	41.3 ± 11.14 a	2.7 ± 1.22 ab	9.6 ± 0.51 ab	18.9 ± 8.24 ab	1.0 ± 0.19 b
	255305	8.8 ± 0.40 abc	34.7 ± 14.07 a	3.3 ± 0.27 ab	9.6 ± 0.51 ab	24.1 ± 10.56 a	1.9 ± 0.62 ab
	202700	6.8 ± 0.75 d	42.1 ± 8.25 a	2.2 ± 0.33 b	8.5 ± 0.54 b	13.9 ± 4.97 ab	2.1 ± 1.18 ab
	226792	9.2 ± 0.44 ab	33.4 ± 6.80 a	1.9 ± 0.42 b	10.0 ± 0.0 a	10.9 ± 3.17 b	2.4 ± 1.44 ab
	Estanzuela Ganador	8.5 ± 0.54 bc	37.9 ± 13.38 a	3.5 ± 0.27 ab	9.3 ± 1.03 ab	12.5 ± 5.7 ab	3.3 ± 0.97 a
SSMC/ CSHS (20 ± 2 %)	255301	9.0 ± 0.63 bc	40.9 ± 8.50 a	4.2 ± 0.32 a	9.5 ± 0.83 ab	19.0 ± 5.18 a	3.1 ± 0.68 a
	227318	9.0 ± 0.0 bc	39.5 ± 17.36 a	2.7 ± 1.33 ab	9.4 ± 0.54 ab	13.2 ± 7.94 ab	2.1 ± 0.20 ab
	255305	9.0 ± 0.89 ab	42.8 ± 10.29 a	2.6 ± 0.15 ab	9.3 ± 0.51 ab	16.0 ± 5.76 ab	2.8 ± 0.66 ab
	202700	8.0 ± 0.0 c	43.2 ± 21.97 a	2.3 ± 1.04 b	9.0 ± 0.0 ab	9.4 ± 2.54 b	1.9 ± 0.76 ab
	226792	9.8 ± 0.40 a	38.2 ± 6.48 a	3.4 ± 0.44 ab	10.0 ± 0.0 a	11.8 ± 2.18 b	1.7 ± 0.44 b
	Estanzuela Ganador	8.0 ± 0.89 c	43.5 ± 9.80 a	3.5 ± 0.37 ab	9.1 ± 0.75 ab	15.8 ± 3.17 ab	3.0 ± 0.73 ab

SMC: soil moisture content; LAI: leaf area index; FBPR: fresh biomass production per rhizome; DBPR: dry biomass production per rhizome. Values are expressed as mean ± standard deviation. Different letters within each column and for each humidity condition indicate significant differences (Tukey, $p \leq 0.05$).

CHS: contenido de humedad del suelo; IA: índice de área foliar; PBFR: producción de biomasa fresca por rizoma; PBSR: producción de biomasa seca por rizoma. Los valores corresponden a la media ± desviación estándar. Letras diferentes dentro de cada columna y para cada condición de humedad indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

Production of fresh and dry biomass

In spring, FBPR showed slight but significant differences ($p < 0.05$) under OSMC, while under SSMC, the EG variety and ecotype 255301 recorded the highest FBPR (577.3 and 547.6 g, respectively), compared to ecotype 227318 (183.5 g) (Figure 1A). This indicates that, under favorable water availability, the genetic materials exhibit similar productive responses; however, under water deficit, differences in tolerance emerge, with the EG variety and ecotype 255301 standing out as the most stable. These results are consistent with previous evaluations on shade netting (Xolocotzi-Acoltzi et al., 2024a).

During the summer, under OSMC, ecotype 255301 and variety EG had the highest FBPR (321.6 and 303.5 g, respectively), and under SSMC, ecotype 255301 had the highest FBPR (333.6 g). Under both humidity conditions, ecotype 202700 recorded the lowest FBPR ($p < 0.05$; Figure 1B). Overall, the lower production observed in summer suggests a combined effect of seasonal heat stress and water regime, a common phenomenon in crops (López-Atanacio et al., 2022; Xolocotzi-Acoltzi et al., 2024b).

No significant differences ($p > 0.05$) were detected in DBPR under OSMC; however, in spring and under SSMC, ecotype 255301 and variety EG recorded the highest DBPR (149 and 152 g, respectively), consistent with the trend observed in FBPR (Figure 2A). In summer, no significant differences ($p > 0.05$) were observed in DBPR between treatments (Figure 2B).

al ecotipo 255301 como el de mejor respuesta en IAF bajo contenido de humedad óptimo en malla sombra. En el presente estudio, el mejor desempeño de dicho ecotipo se identificó bajo CSHS en campo abierto, lo que sugiere una alta plasticidad adaptativa. El IAF se relaciona estrechamente con la capacidad fotosintética y la acumulación de biomasa forrajera (Chen et al., 2023; Pedroza-Sandoval et al., 2024).

Producción de biomasa fresca y seca

En primavera, la PBFR mostró ligeras diferencias significativas ($p < 0.05$) bajo COHS, mientras que bajo CSHS la variedad EG y el ecotipo 255301 registraron los mayores PBFR (577.3 y 547.6 g, respectivamente), en comparación con el ecotipo 227318 (183.5 g) (Figura 1A). Lo anterior indica que, bajo disponibilidad hídrica favorable, los materiales genéticos presentan respuestas productivas similares; sin embargo, bajo déficit hídrico emergen diferencias en tolerancia, donde la variedad EG y el ecotipo 255301 destacan como los más estables. Estos resultados son congruentes con evaluaciones previas en malla sombra (Xolocotzi-Acoltzi et al., 2024a).

Durante el verano, bajo COHS, el ecotipo 255301 y la variedad EG tuvieron la mayor PBFR (321.6 y 303.5 g, respectivamente), y bajo CSHS, el ecotipo 255301 presentó la mayor PBFR (333.6 g). En ambas condiciones de humedad, el ecotipo 202700 registró la PBFR más baja ($p < 0.05$; Figura 1B). En general, la menor producción observada en verano sugiere un efecto combinado del estrés térmico estacional y del régimen

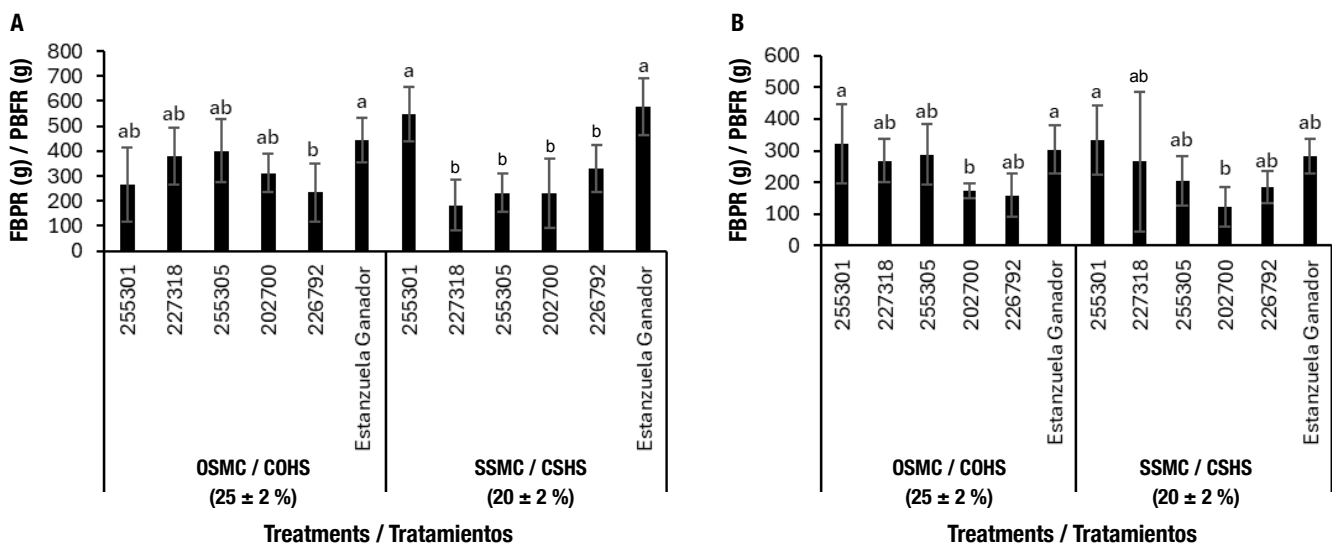


Figure 1. Mean comparisons of fresh biomass production per rhizome (FBPR) of forage clover (*Lotus corniculatus* L.) under optimal (OSMC) and suboptimal (SSMC) soil moisture conditions: A) spring and B) summer. Different letters in each treatment and for each humidity condition indicate significant differences (Tukey, $p \leq 0.05$).

Figura 1. Comparación de medias de la producción de biomasa fresca por rizoma (PBFR) de trébol forrajero (*Lotus corniculatus* L.) bajo condiciones óptimas (COHS) y subóptimas (CSHS) de humedad del suelo: A) primavera y B) verano. Letras diferentes en cada tratamiento y para cada condición de humedad indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

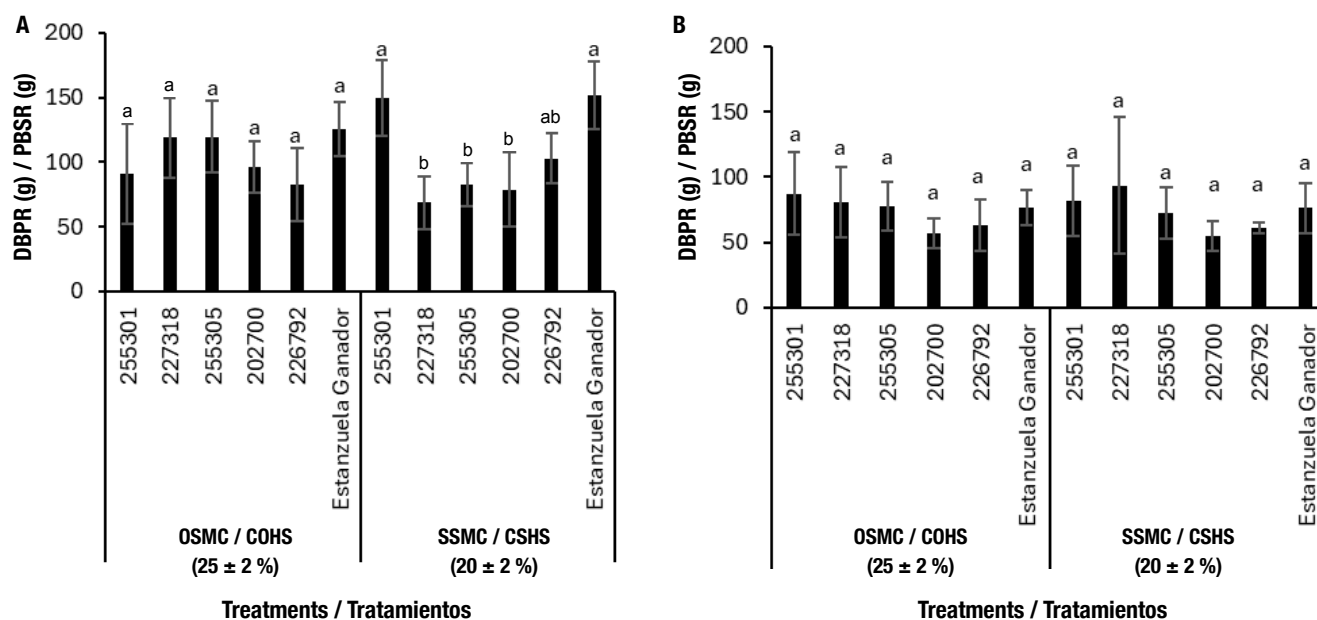


Figure 2. Mean comparisons of dry biomass production per rhizome (DBPR) of forage clover (*Lotus corniculatus* L.) under optimal (OSMC) and suboptimal (SSMC) soil moisture conditions: A) spring and B) summer. Different letters in each treatment and for each humidity condition indicate significant differences (Tukey, $p \leq 0.05$).

Figura 2. Comparación de medias de la producción de biomasa seca por rizoma (PBSR) de trébol forrajero (*Lotus corniculatus* L.) bajo condiciones óptimas (COHS) y subóptimas (CSHS) de humedad del suelo: A) primavera y B) verano. Letras diferentes en cada tratamiento y para cada condición de humedad indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

The differences between fresh and dry biomass could be associated with variations in tissue water content. This behavior has been documented in tomato crops subjected to water stress (Miranda-Rojas et al., 2025). In general, ecotype 255301 showed the best response to water deficit conditions, suggesting that this material could be a source of stress tolerance due to its ability to maintain cell turgor and dry matter production.

The results confirm the adaptability and productivity of *L. corniculatus* genetic materials under open field conditions in arid areas of Northern Mexico, which agrees with previous studies carried out in semi-protected shade netting environments (Xolocotzi-Acoltzi et al., 2024a).

Under adequate water availability, all evaluated materials show regional productive potential. However, it is necessary to validate the results in the field with producers, as well as to carry out a phylogenetic characterization at the species level, since there is phenotypic variation among ecotypes in terms of morphology, development, and fresh forage productivity. In scenarios of limited water availability (18–22 % soil moisture) and extreme temperatures (average of 34 °C and maximums of 45 °C in summer [Medina-García et al., 2005]), ecotype 255301 and the EG variety show greater adaptation potential.

hídrico, fenómeno común en cultivos agrícolas (López-Atanacio et al., 2022; Xolocotzi-Acoltzi et al., 2024b).

No se detectaron diferencias significativas ($p > 0.05$) en la PBSR bajo COHS; sin embargo, en primavera y bajo CSHS, el ecotipo 255301 y la variedad EG registraron la mayor PBSR (149 y 152 g, respectivamente), en concordancia con la tendencia observada en la PBFR (Figura 2A). En verano, no se observaron diferencias significativas ($p > 0.05$) en el PBSR entre tratamientos (Figura 2B).

Las diferencias entre biomasa fresca y seca podrían estar asociadas con variaciones en el contenido hídrico tisular. Este comportamiento ha sido documentado en el cultivo de tomate sometido a estrés hídrico (Miranda-Rojas et al., 2025). En general, el ecotipo 255301 presentó la mejor respuesta ante condiciones de déficit hídrico, por lo que este material podría ser una fuente de tolerancia al estrés por su capacidad para mantener la turgencia celular y su producción de materia seca.

Los resultados confirman la adaptabilidad y productividad de materiales genéticos de *L. corniculatus* en condiciones de campo abierto en zonas áridas del norte de México, lo cual concuerda con estudios previos realizados en ambientes semiprottegidos de malla sombra (Xolocotzi-Acoltzi et al., 2024a).

Conclusions

A significant interaction effect between soil moisture content and *L. corniculatus* genetic materials was confirmed, which showed differential responses in growth and forage productivity under contrasting irrigation conditions. In spring, under optimal irrigation conditions, the genotypes showed similar productivity in fresh biomass per rhizome. In contrast, under suboptimal soil moisture conditions, the EG variety and ecotype 255301 exhibited the best performance. During the summer, ecotype 255301 stood out as the most productive material under water deficit. The higher forage productivity observed was mainly associated with increases in the leaf area index. These results demonstrate the potential of *L. corniculatus* as an alternative forage crop in arid regions of Northern Mexico. They also show that the selection of genetic material must be adjusted to regional water availability.

End of English version

References / Referencias

- Agua para todos (2016, October 26). *Sobreexplotación y contaminación de acuíferos*. Agua para todos, agua para la vida. <https://aguaparatodos.org.mx/sobreexplotacion-y-contaminacion-de-acuiferos/>
- Álvarez-Vázquez, P., García-de los Santos, G., Guerrero-Rodríguez, J., Mendoza-Pedroza, S., Ortega-Cerrilla, M., & Hernández-Garay, A. (2018). Comportamiento productivo de *Lotus corniculatus* L. dependiente de la estrategia de cosecha. *Agrociencia*, 52(8), 1081–1093. <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1724>
- Álvarez-Vázquez, P., Mendoza-Pedroza, S. I., de los Santos-García, G., Guerrero-Rodríguez, J. D., Rojas-García, A. R., & Encina-Domínguez, J. A. (2020). Respuesta productiva de trébol pata de pájaro en función del porcentaje de luz interceptada. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(24), 105–116. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i24.2362>
- Castillo-Cabrera, C., Mendoza-Pedroza, S. I., Escalante-Estrada, J. A. S., García-de los Santos, G., Pro-Martínez, A., & González-Cerón, F. (2023). Análisis de crecimiento de trébol pata de pájaro a diferente densidad de siembra. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(2), 265–276. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i2.3420>
- Castro-Rivera, R., Aguilar-Benítez, G., & Solís-Oba, M. M. (2016). Ensilado de maguey, una alternativa para la alimentación animal en zonas áridas y semiáridas. *Revista Frontera Biotecnológica*, 4, 12–20. <https://www.revistafronterabiotecnologica.cibatlaxcala.ipn.mx/volumen/vol04/pdf/vol-04-3.pdf>
- Cerdas-Ramírez, R. (2013). Formulación de raciones para carne y leche. Desarrollo de un módulo práctico para técnicos y estudiantes de ganadería de Guanacaste, Costa Rica. *InterSedes*, 14(29), 133–158. http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-24582013000300009&lng=en&tlng=es

Bajo disponibilidad hídrica adecuada, todos los materiales evaluados muestran potencial productivo regional. No obstante, es necesario validar los resultados en campo con los productores, así como realizar una caracterización filogenética a nivel de especie, ya que existe variación fenotípica entre ecotipos en cuanto a la morfología, desarrollo y productividad de forraje fresco. En escenarios de disponibilidad de agua limitada (18–22 % de humedad del suelo) y temperaturas extremas (promedio de 34 °C y máximas de 45 °C en verano [Medina-García et al., 2005]), el ecotipo 255301 y la variedad EG presentan mayor potencial de adaptación.

Conclusiones

Se confirmó un efecto significativo de interacción entre el contenido de humedad del suelo y los materiales genéticos de *L. corniculatus*, lo cual evidenció respuestas diferenciales en crecimiento y productividad forrajera bajo condiciones de riego contrastantes. En primavera, bajo riego óptimo, los genotipos mostraron un comportamiento productivo similar en biomasa fresca por rizoma. En contraste, bajo condiciones subóptimas de humedad del suelo, la variedad EG y el ecotipo 255301 presentaron el mejor desempeño. Durante el verano, el ecotipo 255301 destacó como el material más productivo bajo déficit hídrico. La mayor productividad forrajera observada se asoció principalmente con incrementos en el índice de área foliar. Estos resultados demuestran el potencial de *L. corniculatus* como cultivo forrajero alternativo en zonas áridas del norte de México. Asimismo, evidencian que la selección de materiales genéticos debe ajustarse a la disponibilidad hídrica regional.

Fin de la versión en español

- Chen, X., Cai, A., Guo, R., Liang, C., & Li, Y. (2023). Variation of gross primary productivity dominated by leaf area index in significantly greening area. *Journal of Geographical Sciences*, 33, 1747–1764. <https://doi.org/10.1007/s11442-023-2151-5>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019). *Estadísticas del agua en México 2019*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM_2019.pdf
- Esparza, M. (2014). La sequía y la escasez de agua en México: Situación actual y perspectivas futuras. *Secuencia*, 89, 193–219. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-03482014000200008
- González-Espíndola, L. Á., Pedroza-Sandoval, A., Trejo-Calzada, R., Jacobo-Salcedo, M. R., García-de los Santos, G., & Quezada-Rivera, J. J. (2024). Relative water content, chlorophyll index, and photosynthetic pigments on *Lotus corniculatus* L. in response to water deficit. *Plants*, 13(7), 961. <https://doi.org/10.3390/plants13070961>

- Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO). (2023, July 13). *Aguas en México, ¿escasez o mala gestión?*. IMCO. <https://agua.org.mx/biblioteca/aguas-en-mexico-escasez-o-mala-gestion-imco/>.
- López-Atanacio, M., Lucas-García, R., Rosas-Guerrero, V., Alemán-Figueroa, L., Kuk-Dzul, J. G., & Hernández-Flores, G. (2022). Seasonal variation in the response of a monoecious crop to increased temperature and fertilizers. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1012859. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1012859>
- Medina-García, G., Díaz-Padilla, G., López-Hernández, J., Ruíz-Corral, J. A., & Marín-Silva, M. (2005). *Estadísticas climatológicas básicas del estado de Durango (periodo 1961–2003)*. Centro de Investigación Regional Norte Centro.
- Miranda-Rojas, J. A., Pedroza-Sandoval, A., Gramillo-Ávila, I., Trejo-Calzada, R., Sánchez-Cohen, I., & Yáñez-Chávez, L. G. (2025). Algae extracts and zeolite modulate plant growth and enhance the yield of tomato *Solanum lycopersicum* L. under suboptimum and deficient soil water content. *Horticulturae*, 11(8), 902. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11080902>
- Morales, A., León, J., Cárdenas, E., Afanador, G., & Carulla, J. (2013). Composición química de la leche, digestibilidad in vitro de la materia seca y producción en vacas alimentadas con gramíneas solas o asociadas con *Lotus uliginosus*. *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*, 60(1), 32–48. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=407639233004>
- Pedroza-Sandoval, A., González-Espíndola, L. Á., Jacobo-Salcedo, M. R., Gramillo-Ávila, I., & Miranda-Rojas, J. A. (2025). Magnetized saline water modulates soil salinization and enhances forage productivity: genotype-specific responses of *Lotus corniculatus* L. *Horticulturae*, 11(4), 428. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11040428>
- Pedroza-Sandoval, A., & Samaniego-Gaxiola, J. A. (2009). Análisis del área bajo la curva del progreso de las enfermedades en patosistemas agrícolas. In: N. Bautista-Martínez, L. Soto-Rojas, & R. Pérez-Pacheco (Eds.), *Tópicos selectos de estadística aplicados a la fitosanidad* (pp. 179–189). Colegio de Postgraduados. <http://doi.org/10.13140/2.1.4475.7767>
- Pedroza-Sandoval, A., Sánchez-Cohen, I., & Trejo-Calzada, R. (2022). *Captación de agua de lluvia para zonas con déficit hídrico. Agenda digital en plataforma Python*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Pedroza-Sandoval, A., Xolocotzi-Acoltzi, S., Trejo-Calzada, R., García-de los Santos, G., Álvarez-Vázquez, P., & Arreola-Ávila, J. G. (2024). Leaf area index and forage productivity indicators of *Lotus corniculatus* L. at different soil moisture contents and seasons of the year. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 15(1), 17–31. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v15i1.6472>
- Pérez-Blanco, C. D., Gómez-Gómez, C. M., & del Villar-García, A. (2011). El riesgo de disponibilidad de agua en la agricultura: una aplicación a las cuencas del Guadalquivir y del Segura. *Estudios de Economía Aplicada*, 29(1), 333–358. <https://www.redalyc.org/pdf/301/30120835011.pdf>
- Ramírez-Restrepo, C., Kemp, P., Barry, T., & López-Villalobos, N. (2006). Production of *Lotus corniculatus* L. under grazing in a dryland farming environment. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 49(1), 89–100. <https://doi.org/10.1080/00288233.2006.9513698>
- Richards, L. A. (1948). Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. *Soil Science*, 66(2), 105–110. https://journals.lww.com/soilsci/citation/1948/08000/porous_plate_apparatus_for_measuring_moisture.3.aspx
- SAS Institute Inc. (1985). *SAS user's guide: statistics* [software]. SAS Institute, Inc.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2019, June 18). *La producción en Zonas Áridas de México*. SADER. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/la-produccion-en-zonas-aridas-de-mexico?idiom=es>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2016, September 06). *La Comarca Lagunera, primer lugar en producción de leche, carne de ave y forrajes*. SAGARPA. <https://www.gob.mx/agricultura/%7Cregionlagunera/articulos/la-comarca-lagunera-primer-lugar-en-produccion-de-leche-carne-de-ave-y-forrajes-sagarpa>
- Steel, R., & Torrie, J. (1988). *Bioestadística. Principios y procedimientos*. McGraw Hill.
- Xolocotzi-Acoltzi, S., Pedroza-Sandoval, A., García-de los Santos, G., Álvarez-Vázquez, P., & Gramillo-Ávila, I. (2024a). Growth, productivity, yield components and seasonality of different genotypes of forage clover *Lotus corniculatus* L. under varied soil moisture contents. *Plants*, 13(10), 1407. <https://doi.org/10.3390/plants13101407>
- Xolocotzi-Acoltzi, S., Pedroza-Sandoval, A., Trejo-Calzada, R., García-de los Santos, G., & Yáñez-Chávez, L. G. (2024b). Variation of the nutritional content of different genotypes of *Lotus corniculatus* L. under optimum and sub-optimal soil moisture conditions throughout the seasons of the year. *Agro Productividad*, 17(7), 13–21. <https://doi.org/10.32854/agrop.v17i7.2655>