



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

UNIDAD REGIONAL UNIVERSITARIA DE ZONAS ÁRIDAS

Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en
Zonas Áridas

EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO, DESARROLLO Y
PRODUCTIVIDAD DE GENOTIPOS DE *Lotus corniculatus* L. CON
POTENCIAL FORRAJERO EN ZONAS ÁRIDAS

T E S I S

Que como requisito parcial

Para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES

Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS

Presenta:

SAHARA XOLOCOTZI ACOLTZI



APROBADA



Bajo la supervisión del Dr. Aurelio Pedroza Sandoval

Bermejillo, Durango, México. Marzo 2023



iniap
Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Tesis realizada por **SAHARA XOLOCOLTZI ACOLTZI** bajo la supervisión del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito
parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO
AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS**

DIRECTOR



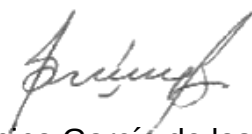
Dr. Aurelio Pedroza Sandoval

CO- DIRECTOR



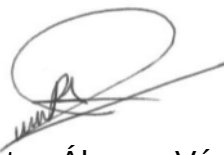
Dr. Ricardo Trejo Calzada

ASESOR



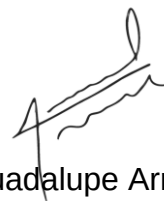
Dr. Gabino García de los Santos

ASESOR



Dr. Perpetuo Álvarez Vázquez

ASESOR



Dr. Jesús Guadalupe Arreola Ávila

Contenido

AGRADECIMIENTOS	xii
DEDICATORIA	xiii
DATOS BIOGRÁFICOS.....	xiv
RESUMEN GENERAL	xv
GENERAL ABSTRACT	xvi
CAPÍTULO I.....	17
1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL	17
1.2 JUSTIFICACIÓN	20
1.3 OBJETIVOS.....	21
1.3.1 Objetivo general	21
1.3.2 Objetivos específicos.....	21
1.4 HIPÓTESIS GENERAL	22
1. 5 REVISIÓN DE LITERATURA.....	22
1.5.1 Cambio climático y cultivos alternativos.....	22
1.5.2 Descripción de <i>Lotus corniculatus</i> L.....	24
1.5.3 Características de tolerancia y adaptación	26
1.5.4 Factores que intervienen en el crecimiento y calidad del forraje --	27

1.5.5 Crecimiento de la planta y rendimiento del forraje -----	28
1.5.6 Índice de Área foliar -----	29
1.5.7 Capacidad de rebrote y dinámica de crecimiento (población de tallos) -----	30
1.5.8 Composición morfológica y relación hoja-tallo -----	32
1.5.9 Contenido nutrimental de los forrajes-----	33
1.5.10 Evaluación productiva en México -----	37
1.6 Literatura citada -----	38
CAPITULO II.....	46
Atributos agronómicos de adaptabilidad, crecimiento y productividad de <i>Lotus corniculatus</i> L. en respuesta al déficit hídrico en el Norte de México.....	46
2.1 RESUMEN-----	46
2.2 INTRODUCCIÓN -----	46
2.3 MATERIALES Y MÉTODOS-----	49
2.3.1 Ubicación geográfica del área de estudio -----	49
2.3.2 Diseño y conducción experimental -----	49
2.3.3 Variables evaluadas -----	52
2.3.3.1 Supervivencia-----	52
2.3.3.2 Longitud de tallo -----	52

2.3.3.3 Cobertura Vegetal -----	52
2.3.3.4 Eficiencia del uso del agua-----	53
2.3.3.5 Producción de Biomasa-----	53
2.3.3.6 Composición morfológica-----	53
2.3.4 Análisis estadístico -----	54
2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN-----	54
2.5 CONCLUSIÓN-----	64
2.6 LITERATURA CITADA -----	64
CAPÍTULO III	68
Indicadores de productividad de <i>Lotus corniculatus</i> L. en respuesta al déficit hídrico en el Norte de México -----	68
3.1 RESUMEN-----	68
3.2 INTRODUCCIÓN -----	68
3.3 MATERIALES Y MÉTODOS-----	70
3.3.1 Ubicación geográfica del área de estudio -----	70
3.3.2 Diseño y conducción experimental -----	70
3.3.3 Variables evaluadas -----	73
3.3.3.1 Índice de Área Foliar-----	73

3.3.3.2 Producción de materia seca -----	73
3.3.3.3 Tasa de crecimiento promedio del forraje-----	74
3.3.3.4 Relación hoja-tallo-----	74
3.3.4 Análisis estadístico -----	74
3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN-----	74
3.5 CONCLUSIONES-----	80
3.6 LITERATURA CITADA -----	81
CAPÍTULO IV.....	84
Comportamiento estacional del estado nutrimental de <i>Lotus corniculatus</i> L. en el norte de México -----	84
4.1 RESUMEN-----	84
4.2 INTRODUCCIÓN -----	84
4.3 MATERIALES Y MÉTODOS-----	87
4.3.1 Ubicación del área de estudio y material vegetal-----	87
4.3.2 Diseño y conducción experimental -----	87
4.3.3 Variables evaluadas-----	89
4.3.3.1 Determinación Nitrógeno -----	89
4.3.3.2 Determinación de macro y micronutrientes-----	90

4.3.3.3 Determinación de Fósforo-----	91
4.3.4 Análisis estadístico -----	93
4.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN-----	93
4.5 CONCLUSIONES-----	99
4.6 LITERATURA CITADA -----	100

Índice de cuadros

Cuadro 1. Concentración mínima de macro y micronutrientes de <i>Medicago sativa</i> y <i>Lotus corniculatus</i> L.	35
Cuadro 2. Relación de accesiones y variedades de <i>Lotus corniculatus</i> L. usados en el experimento con la identificación correspondiente.....	51
Cuadro 3. Crecimiento y desarrollo de diferentes accesiones y variedades de <i>L. corniculatus</i> L. bajo riego óptimo y subóptimo.	58
Cuadro 4. Relación de accesiones y variedades de <i>Lotus corniculatus</i> L. usados en el experimento con la identificación correspondiente.....	72
Cuadro 5. Indicadores de productividad de accesiones/variedad de <i>L. corniculatus</i> L. bajo riego óptimo y subóptimo	77
Cuadro 6. Relación de accesiones y variedades de <i>Lotus corniculatus</i> L. usados en el experimento con la identificación correspondiente.....	88

Índice de figuras

Figura 1. Curva de abatimiento de humedad de la mezcla de suelo utilizada para las accesiones y variedades de *L. corniculatus* L. Donde: %HS= Porcentaje de humedad del suelo; x, es la tensión energía negativa en MPa, considerando que CC y PMP correspondieron a una tensión de energía de 0 y -1.5 MPa, respectivamente..... 50

Figura 2. Temperatura media, máxima, mínima y humedad relativa mensual registradas en malla sombra con accesiones y variedades de *L. corniculatus* L. de abril 2021 a mayo 2022, Bermejillo, Dgo. 55

Figura 3. Porcentaje de sobrevivencia de plantas de las accesiones y variedades de *L. corniculatus* L. evaluados en condiciones de malla-sombra en el norte de México. ADAP, es período de adaptación de las plantas durante el trasplante a las macetas; P, es primavera; V, es verano; O, es otoño y; I, es invierno. Con periodo de evaluación de abril 2021 a mayo 2022. Bermejillo, Dgo. 56

Figura 4. Dinámica temporal de la longitud de tallo (A), cobertura vegetal (B), producción de biomasa fresca acumulada (PBFA) (C) y, Eficiencia en el uso del agua (EUA) (D) de *L. corniculatus* L. en diferentes épocas estacionales del año en contenido óptimo (COHS) y subóptimo (CSHS) de humedad del suelo, durante el período de abril de 2021 a mayo de 2022, Bermejillo, Dgo. 60

Figura 5. Composición morfológica de diferentes materiales genéticos de *L. corniculatus* L. según la época estacional del año en condiciones óptimas (COHS) y subóptimas (CSHS) de riego..... 63

Figura 6. Curva de abatimiento de humedad de la mezcla de suelo utilizada para las accesiones y variedades de *L. corniculatus* L. Donde: %HS= Porcentaje de humedad del suelo; x, es la tensión energía negativa en MPa, considerando que

CC y PMP correspondieron a una tensión de energía de 0 y -1.5 MPa, respectivamente..... 71

Figura 7. Temperatura media, máxima, mínima y humedad relativa mensual registradas en malla sombra con accesiones y variedades de *L. corniculatus* L. de abril 2021 a mayo 2022, Bermejillo, Dgo. 75

Figura 8. Dinámica temporal de Índice de área foliar (A), Materia seca acumulada (B), Tasa de crecimiento promedio del forraje (TC) (C) y, relación hoja-tallo (D) de *L. corniculatus* L. en diferentes épocas estacionales del año en contenido óptimo (COHS) y subóptimo (CSHS) de humedad del suelo, durante el período de abril de 2021 a mayo de 2022, Bermejillo, Dgo. 80

Figura 9. Curva de abatimiento de humedad de la mezcla de suelo utilizada para las accesiones y variedades de *L. corniculatus* L. Donde: %HS= Porcentaje de humedad del suelo; x, es la tensión energía negativa en MPa, considerando que CC y PMP correspondieron a una tensión de energía de 0 y -1.5 MPa, respectivamente..... 87

Figura 10. Temperatura media, máxima, mínima y humedad relativa mensual registradas en malla sombra con accesiones y variedades de *L. corniculatus* L. de abril 2021 a mayo 2022, Bermejillo, Dgo. 93

Figura 11. Comportamiento estacional en el contenido de nutrientes en hoja de *L. corniculatus* L. bajo dos contenidos de humedad del suelo en el Norte de México. Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$), cifras con las mismas letras en cada gráfico, son estadísticamente iguales. Donde: COHS, es contenido óptimo de humedad del suelo ($26 \% \pm 1.5$), CSHS, es contenido subóptimo de humedad del suelo ($22 \% \pm 1.5$)..... 97

Figura 12. Comportamiento estacional en el contenido de nutrientes de *L. corniculatus* L. bajo dos contenidos de humedad en el Norte de México. Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$), cifras con las mismas letras en cada gráfico, son estadísticamente iguales. Donde: COHS, es contenido óptimo de humedad del suelo ($26 \% \pm 1.5$), CSHS, es contenido subóptimo de humedad del suelo ($22 \% \pm 1.5$)..... 99

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado para el desarrollo de este proyecto de investigación.

A la UACH-URUZA por permitirme desarrollarme dentro de sus instalaciones, así como brindar los medios para la realización de mis estudios de posgrado.

Al Dr. Aurelio Pedroza Sandoval por su dirección durante el proyecto y las grandes atribuciones realizadas durante mi periodo de estudios, por los conocimientos compartidos y paciencia brindada.

A mi comité asesor: Dr. Ricardo Trejo Calzada, Dr. Gabino García de los Santos, Dr. Perpetuo Álvarez Vázquez y Dr. Jesús Guadalupe Arreola, por las observaciones realizadas a lo largo del desarrollo de este proyecto de investigación.

A los profesores del posgrado que contribuyeron en mi formación durante mi periodo de estudios.

Al M.C. Luis Ángel González y la M.C. Rosario Jacobo, por apoyarme durante la conducción experimental y compartir sus conocimientos.

DEDICATORIA

A mis padres Martina y Humberto que son su amor y apoyo he logrado mis metas en la vida y en mi desarrollo profesional.

A mis hermanos Pedro y Rogelio, gracias por apoyarme en los buenos y malos momentos, por escuchar y comprenderme siempre.

A Ignacio, gracias por apoyarme y estar a mi lado en todo momento.

A aquellos amigos y compañeros que han formado parte de mi desarrollo personal y profesional, gracias por estar a mi lado.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Sahara Xolocotzi Acoltzi

Fecha de nacimiento 21 de febrero de 1998

Lugar de nacimiento: Contla de Juan Cuamatzi, Tlaxcala

CURP: XOAS980221MTLLCH01

Profesión: Ingeniero en Sistemas Agroalimentarios

Cédula profesional: 12569213



Desarrollo académico

Preparatoria: Preparatoria Agrícola Chapingo- Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco de Mora, Estado de México, México (2013-2016)

Licenciatura: Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas- Universidad Autónoma Chapingo, Bermejillo, Mapimí, Durango (2016-2020)

Desarrollo científico

Participación como ponente en el IX Congreso Internacional y XXIII Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas, en octubre 2021 con el trabajo: Indicadores de crecimiento, productividad y sobrevivencia de diferentes genotipos de *Lotus corniculatus* L. bajo riego óptimo y subóptimo.

Participación como expositora en el VI Congreso Internacional y XVIII Congreso Nacional sobre Recursos Bióticos de Zonas Áridas, en diciembre 2022, con el trabajo: Productividad de biomasa de diferentes genotipos de *Lotus corniculatus* L. en condiciones óptimas y subóptimas de humedad en el suelo

RESUMEN GENERAL

El trébol pata de pájaro (*Lotus corniculatus* L.) es una leguminosa ampliamente distribuida en el mundo, principalmente en Estados Unidos, Australia, Chile y Sudamérica. El objetivo de este estudio fue evaluar el comportamiento de indicadores de crecimiento, productividad y contenido nutrimental de diferentes accesiones y variedades de *L. corniculatus* L. en respuesta al déficit hídrico en condiciones semi controladas de malla-sombra. Se usó un diseño experimental de bloques al azar con tres repeticiones en arreglo de parcelas divididas. Las parcelas grandes fueron dos contenidos de humedad en el suelo: óptimo (COHS: 26 % $\pm$ 1.5) y subóptimo (CSHS: 22 % $\pm$ 1.5); las parcelas chicas fueron 10 materiales genéticos de *L. corniculatus* L., referidos a las accesiones 255301, 227318, 255305, 202700, 226792, 232098, así como las variedades Estanduela Ganador, San Gabriel, Gran San Gabriel y Procel 804. Después de un año de evaluación, solo cinco materiales genéticos lograron sobrevivir, correspondientes a las accesiones 255301, 255305, 202700, 226792 y la variedad Estanduela Ganador. La accesión 202700 fue la mejor adaptada a CSHS con una cobertura vegetal de 1,649.0 cm², producción de biomasa fresca acumulada de 583.7 g planta⁻¹ y una longitud de talo de 23 cm; en tanto que la accesión 255305 fue la de mejor respuesta a COHS con una cobertura vegetal de 1,661.2 cm² y una producción de 740.1 g planta⁻¹. En consecuencia, la mejor productividad en CSHS se observó en la accesión 202700 con un índice de área foliar (IAF) de 3.2, materia seca (MS) acumulada de 94.9 g planta⁻¹ y una tasa de crecimiento (TC) de 0.30 g MS planta⁻¹ d⁻¹; en tanto, la accesión 255305 fue la de mejor respuesta en COHS con un IAF de 4.7, MS acumulada de 131.8 g planta⁻¹ y una TC de 0.43 g MS planta⁻¹ d⁻¹. Las accesiones 255301 y 226792 fueron las más sobresalientes en la relación hoja-tallo como componentes del rendimiento de forraje. El contenido nutrimental en hojas de *L. corniculatus* L. mostró una deficiencia de N, P, Fe, Mn y Zn conforme avanzó la edad de la planta. *L. corniculatus* L. tuvo un mejor comportamiento de crecimiento y productividad en las estaciones de verano, otoño.

Palabras clave: Forrajes, leguminosas, ganadería, sequía, zonas áridas.

Tesis de Maestría en Ciencias, Posgrado en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas.

Autor: Sahara Xolocotzi Acoltzi

Director de tesis: Dr. Aurelio Pedroza Sandoval

GENERAL ABSTRACT

Bird's foot clover (*Lotus corniculatus* L.) is a legume widely distributed throughout the world, mainly in the United States, Australia, Chile, Uruguay, and Argentina. It has a great ability to adapt to different environments. The objective of this study was to evaluate the behavior of indicators such as growth, productivity and nutritional content of different accessions and varieties of *L. corniculatus* L. in response to water deficit in semi-controlled conditions of mesh-shade. A randomized block experimental design with three replications in split plot arrangement was used. The large plots had two soil moisture contents: optimal (OSMC: 26%±1.5) and suboptimal (SSMC: 22%±1.5); the small plots were 10 genetic materials of *L. corniculatus* L., referring to the accessions 255301, 227318, 255305, 202700, 226792, 232098 as well as the varieties Estanzuela Ganador, San Gabriel, Gran San Gabriel and Procel 804. After one year of evaluation, only five genetic materials survived, corresponding to the accessions 255301, 255305, 202700, 226792, and the variety Estanzuela Ganador. Accession 202700 was the best adapted to SSMC with a plant cover of 1,649.0 cm², accumulated fresh biomass production of 583.7 g plant⁻¹ and a stem length of 23 cm, while the accession 255305 was the best response to OSMC with a plant cover of 1,661.2 cm² and a production of 740.1 g plant⁻¹. Consequently, the best productivity in SSMC was observed in accession 202700 with a leaf area index (LAI) of 3.2, accumulated dry matter (DM) of 94.9 g plant⁻¹ and a growth rate (GR) of 0.30 g DM plant⁻¹ d⁻¹; meanwhile, accession 255305 was the best response in OSMC with an LAI of 4.7, accumulated DM of 131.8 g plant⁻¹ and a GR of 0.43 g DM plant⁻¹ d⁻¹. Accessions 255301 and 226792 were the most outstanding in the leaf-stem relationship as components of forage yield. The nutrient content in leaves of *L. corniculatus* L. showed a deficiency of N, P, Fe, Mn and Zn through the different seasonal periods of the study period,

Keywords: Forages, legumes, livestock, drought, arid zones.

Tesis de Maestría en Ciencias, Posgrado en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas.

Autor: Sahara Xolocotzi Acoltzi

Director de tesis: Dr. Aurelio Pedroza Sandoval

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL

Actualmente el mundo cuenta con una población creciente y con patrones de consumo cambiantes, por ello, tiene la tarea de planificar y gestionar la futura evolución de los recursos hídricos y del suelo (FAO, 2012). En México el 76% del volumen de agua está destinado a las actividades agrícolas (CONAGUA, 2018), pero estas no siempre se realizan de manera adecuada al establecerse cultivos con altos requerimientos hídricos en zonas con poca disponibilidad del recurso.

La disponibilidad de agua para la agricultura es una limitación en aumento en lugares donde las precipitaciones son escasas y no es viable el desarrollo de nuevos recursos hídricos (FAO, 2012). Por tanto, es necesario hacer más eficiente el consumo de agua para fines agrícolas, involucrando mejoras dentro y fuera de las explotaciones, como el aumento de la transferencia de tecnología para las actividades de producción reservadas a mejorar la gestión del suelo y el agua (Banco Mundial, 2021).

El mal aprovechamiento del agua en las actividades productivas se relaciona con otro fenómeno: las sequías, que también afectan a la población y actividades productivas, además que en los últimos años han producido pérdidas económicas considerables. México, del 2011 a 2013 se vio severamente afectado por una sequía que cubrió el 90 % del territorio ocasionando graves desequilibrios hidrológicos, que perjudicaron la producción agrícola (CONAGUA, 2018). Diversas comunidades vegetales sobrellevan periodos extensos de déficit hídrico, que son la principal causa de bajos rendimientos de los cultivos económicamente importantes y en el deterioro de las tierras destinadas para pastoreo. La sequía constituye el factor ambiental que predomina en diferentes sistemas de producción, ya sea por la reducción en el rendimiento o por la limitación en la expansión de áreas agrícolas (Castillo, 2012).

En el Norte de México, la región de la Comarca Lagunera conformada por algunos municipios de los estados de Durango y Coahuila presenta problemas referentes a la escasez de agua y la sobre explotación de los mantos acuíferos, sumado a ello está el fenómeno de salinización y aguas subterráneas salobres (CONAGUA, 2018). Esta región se destaca por la producción de melón, carne de ave y leche de bovino, así como en la producción de forrajes (Ramírez et al., 2019), actividades que implican el uso de cantidades enormes de agua perjudicando severamente el abastecimiento de otros sectores de la población que requieren de tal recurso para actividades domésticas.

Muchos de los cultivos establecidos de la Comarca Lagunera son ineficientes y carentes de racionalidad económica y ecológica. En un estudio realizado por Ramírez et al. (2019) exponen que en esta zona no se deberían sembrar cultivos forrajeros como el sorgo, la alfalfa y maíz, ya que son cultivos de baja densidad económica y precio, que a la vez requieren de volúmenes considerables de agua para su producción (García et al., 2014 y Reta et al., 2013). En la región hay una presente escasez de agua debido a que su oferta no cubre la demanda, es un insumo escaso y de gran importancia para su desarrollo económico.

La búsqueda de cultivos alternativos o la introducción de nuevos genotipos con menores requerimientos hídricos es requerida para sustituir o complementar a los existentes en las zonas agrícolas de regiones áridas y semiáridas, consiguiendo mejores rendimientos al ser propicios para la región, respetando las condiciones climáticas predominantes (Neri y Medina, 2019). Uno de los objetivos principales en el mejoramiento de plantas para las regiones agrícolas y ganaderas es la identificación de caracteres bioquímicos y fisiológicos que pueden contribuir a incrementar el rendimiento de diversos cultivos (PROCISUR, 2010) para el caso de la Comarca Lagunera, las leguminosas forrajeras son las de mayor interés.

Algunos de los cultivos alternativos empleados en la región han sido el de canola (*Brassica napus* L.) y chícharo (*Pisum sativum* L.) en el ciclo otoño-invierno y soya (*Glycine max* L.) en primavera verano, con un buen rendimiento, y

productividad del agua, pero con menor calidad de forraje comparada con la de alfalfa (*Medicago sativa* L.) (Reta et al., 2017), tal característica implica continuar con la búsqueda de cultivos que ofrezcan una mejor calidad de forraje, además de un menor consumo de agua e insumos agrícolas.

Entre una gran variedad de leguminosas forrajeras con potencial de desarrollo en regiones con marcada estacionalidad destacan diferentes especies de *Lotus*, principalmente *L. corniculatus*, *L. tenuis* y *L. uliginosus*, que son empleadas para mejorar el rendimiento de los pastizales con aprovechamiento de pastoreo (PROCISUR, 2010). *L. corniculatus* es la especie forrajera de mayor importancia en regiones templadas de Asia Menor, Europa y norte de Sudamérica por su gran resistencia a condiciones adversas medioambientales (Gunn et al., 1992).

L. corniculatus, comúnmente conocido como trébol pata de pájaro, es una leguminosa de origen europeo y mediterráneo, y que actualmente se encuentra distribuido en diversos países, con excepción de regiones muy frías y tropicales (Bolzón et al., 2014). Esta especie tiene alta capacidad de adaptación a diferentes condiciones agronómicas, respecto a otras leguminosas como tolerancia a la inundación, sequía, bajos niveles nutrientes como fósforo, suelos ácidos y con altos niveles de aluminio y manganeso (Guillen y Widdup, 2008).

El rendimiento y calidad nutricional varía de entre 18.9 % y 21.8 % de proteína cruda, base seca, característica similares o superiores a la alfalfa (*Medicago sativa* L.) y al trébol blanco (*Trifolium repens* L.) (García et al., 2014). Además, su concentración de taninos condensados evita el timpanismo en rumiantes de pastoreo y protegen la degradación de proteínas en el rumen (MacAdam, 2013). La gran variabilidad de los genotipos de esta especie se debe a la amplia base genética y su forma tetraploide, y diploide (Bolzon et al., 2004) permitiendo el desarrollo de nuevos genotipos para su empleo en diversas regiones climáticas.

El cultivo del trébol pata de pájaro se usa de manera exitosa en regiones con veranos secos y marcada estacionalidad, como en Nueva Zelanda y en Uruguay, donde han demostrado sus ventajas como forraje (Barry et al., 2003). De igual

manera, se ha demostrado su tolerancia al déficit hídrico a campo abierto al crecer en suelos poco fértiles, atributos de particular interés para su uso en zonas con estas características. El cultivo ha sido empleado en actividades para controlar procesos de erosión, y como biorremediador en suelos contaminados con boro, selenio y otros agentes contaminantes (Díaz, 2005). Otros estudios realizados sobre el comportamiento de *L. corniculatus* y varios de sus genotipos se han realizado en Sudamérica, en específico Uruguay y Chile, en donde se ha categorizado como una especie tolerante y productiva en tiempos de sequía (PROCISUR, 2010).

Los estudios realizados sobre *L. corniculatus* en México han sido pocos, entre ellos se encuentra la evaluación de su comportamiento productivo dependiente de estrategias de cosecha y su respuesta productiva en función de la cantidad de luz interceptada (Álvarez, 2018a) y la identificación de estrategias óptimas para su cosecha (Álvarez et al., 2020), aunque solo en pocos genotipos. Encontrar información respecto al manejo del cultivo en el país es aún más complejo.

Lotus corniculatus L. es un trébol exótico que no se ha evaluado bajo las condiciones ambientales de la Comarca Lagunera, tal cultivo es una alternativa que puede cumplir con las expectativas de producción en las zonas áridas y semiáridas, concentradas en el adecuado uso del recurso agua y la evaluación de su adaptabilidad permitirá desarrollar paquetes tecnológicos sobre el cultivo que beneficien a los productores de forrajes y el mantenimiento de los recursos agua y suelo.

1.2 JUSTIFICACIÓN

En las regiones áridas y semiáridas existen dos situaciones persistentes: el limitado acceso a recursos hídricos para las actividades productivas en el sector agropecuario que orilla a bajos niveles de ingreso para los habitantes de estas zonas; y la alta vulnerabilidad a la desertificación de estas regiones provocada por actividades como el pastoreo y la deforestación desmedidos. Por lo tanto, la

búsqueda y propuesta de nuevos cultivos con potencial productivo en la Comarca Lagunera que sean compatibles con las características medioambientales de la región y brinden mejores o iguales rendimientos a los cultivos que se producen, son necesarios para tener un aprovechamiento eficiente del agua, del suelo e insumos involucrados en el establecimiento de los cultivos hasta su cosecha, pues el acuífero sigue sufriendo sobreexplotación que afectará todo tipo de actividad productiva, al cierre del 2020 CONAGUA (2020) informó que el acuífero 0523 Principal Región Lagunera no tiene disponibilidad hídrica presentando un déficit de 149,045,850 m³, este valor considera la recarga total media anual que recibe el acuífero, la descarga anual comprometida (534,100,000 m³) y el volumen de extracción de aguas subterráneas, siendo éste último el más alto (683,145,850 m³), lo que indica que la demanda sobrepasa la capacidad de recarga del acuífero.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Generar conocimiento básico y tecnológico sobre el comportamiento de diferentes accesiones y variedades de *Lotus corniculatus* L. con potencial forrajero en zonas áridas bajo condiciones semicontroladas de malla sombra y bajo dos contenidos de humedad (óptimo y subóptimo).

1.3.2 Objetivos específicos

- Evaluar la capacidad de adaptación de diez accesiones y variedades de *Lotus corniculatus* L. y su tolerancia al déficit hídrico en condiciones semiprotegidas de malla sombra.
- Identificar las accesiones y variedades de *Lotus corniculatus* L. con mayor potencial productivo bajo dos condiciones de humedad (óptima y subóptima) en condiciones de malla sombra.
- Determinar el contenido nutrimental de *Lotus corniculatus* L. estacional para un mejor conocimiento del manejo de fertilización del cultivo.

1.4 HIPÓTESIS GENERAL

Ha: *Lotus corniculatus* L. no se adapta a las condiciones ambientales de la Comarca Lagunera debido a la falta de atributos morfométricos, fisiológicos y requerimientos nutrimentales para su desarrollo, crecimiento y productividad.

1. 5 REVISIÓN DE LITERATURA

1.5.1 Cambio climático y cultivos alternativos

El uso del agua para la producción agrícola es un tema de gran relevancia al hablar sobre los recursos hídricos y la seguridad alimentaria (FAO, 2012). A nivel mundial, más de 330 millones de hectáreas de cultivo disponen de instalaciones de riego, las cuales representan el 20 % total de la superficie cultivada y aportan el 20 % de la producción total de alimentos en (Banco Mundial, 2021). En el 2017 la superficie sembrada bajo riego en México fue de 6.5 millones de hectáreas, de las cuales un poco más de la mitad se ubicaron en 86 distritos de riego (CONAGUA, 2018), lo que señala que el recurso agua está bajo un plan de manejo organizado, pero parece no considerar las condiciones de tal recurso en estas regiones ya que en muchas de ellas hay un limitado acceso al agua para riego.

La disponibilidad de agua en las zonas de clima árido y semiárido ha sido cuantificada con base en la precipitación media anual (Mazuela, 2013) lo que indica que se ha mantenido baja por décadas. Sin embargo, ha provisto de recursos y servicios ambientales como forraje para el ganado, productos alimenticios y medicinales, conservación de la biodiversidad, provisión de agua dulce, producción de energía, turismo y recreación a una tercera parte de la humanidad (Briones et al., 2018). Por lo que es relevante retomar la planeación y el diseño de políticas adecuadas de las zonas áridas y semiáridas a través de la promoción del cultivo y cuidado de especies originarias (Neri et al., 2019) o la introducción de cultivos alternativos capaces de adaptarse a los objetivos de productividad y conservación de los recursos naturales.

Hoy en día los avances tecnológicos y de innovación en el uso de variedades, densidades de siembra, cosecha, control de plagas y enfermedades, así como aspectos de conservación de recursos como suelo y agua de cultivos alternativos, ofrecen un amplio panorama para los productores agrícolas ya que les permite tomar las mejores decisiones para su producción y obtener los mejores beneficios (FIRCO, 2019). Además, disponer de cultivares forrajeros adaptados positivamente a distintos ambientes y sistemas de producción, impacta decisivamente en la productividad y/o persistencia de cada componente de la cadena forrajera (Cuitiño, 2012).

Las leguminosas juegan un papel crítico en los diferentes ecosistemas y en la agricultura, donde su habilidad para establecer simbiosis con bacterias fijadoras de nitrógeno las hace colonizadoras eficaces en ambientes bajos en nitrógeno (Rojas et al., 2005), de entre la gran variedad de leguminosas sobresalen las del género *Lotus*. Los estudios sobre el establecimiento de este forraje se han desarrollado en países como Uruguay y Chile por el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) con experimentación en plantaciones de *L. corniculatus* y *L. uliginosus*, con más de 1800 plantas, evaluando principalmente su tolerancia al estrés hídrico y su respuesta en la diversidad morfológica de raíces, todo esto llevado a cabo en invernadero en condiciones de estrés hídrico (40 % de capacidad de campo) (INIA, 2010).

Como resultado se obtuvo a *L. corniculatus* L. como una especie tolerante y productiva durante un periodo de sequía en verano, incluso sobre *L. uliginosus*. Se mostró también que la selección fenotípica de raíz pivotante proporcionaba resultados más consistentes para ambas especies en condiciones de sequía en campo. A la vez, *L. corniculatus* L. presentó los valores más altos de conductancia estomática y los potenciales hídricos más elevados, lo cual podría significar que la especie posee mecanismos de ajuste osmótico que permitirían a las plantas mantener la tasa de transpiración con una alta tensión de agua en sus tejidos (PROCISUR, 2010; INIA, 2010).

Uno de los objetivos principales de los mejoradores de plantas para las regiones agrícolas y ganaderas es la identificación de caracteres bioquímicos y fisiológicos que puedan contribuir a incrementar el rendimiento de las leguminosas forrajeras bajo condiciones medioambientales adversas (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA], 2010). Sin embargo, la producción agrícola se está viendo afectada negativamente por un aumento y una mayor variabilidad de las temperaturas, cambios en el nivel y la frecuencia de las precipitaciones, una mayor frecuencia de periodos sin lluvia y sequías, la intensificación de los fenómenos meteorológicos extremos y la salinización de los terrenos de cultivo y el agua dulce. A medida que se intensifiquen los efectos del cambio climático sobre la agricultura, será cada vez más difícil cultivar cosechar, criar animales y gestionar los recursos naturales (Ramírez et al., 2017).

1.5.2 Descripción de *Lotus corniculatus* L.

Lotus corniculatus L. es una planta herbácea, perenne de la familia Fabaceae que puede alcanzar hasta los 50 cm de altura, tiene tallos delgados, hojas imparipinnadas, generalmente con 5 foliolos con margen entero de 4 a 18 mm, los dos inferiores distintos de los restantes, semejando estípulas muy reducidas; la corola es color amarillo, en ocasiones anaranjada o rojiza de 8-18 mm de largo con la quilla acabada en pico y pétalos en estandarte; el cáliz en ocasiones es turbinado y firme; las flores se encuentran agrupadas en inflorescencias con forma de umbela y pedunculadas, situadas en las axilas foliares, raramente se presentan flores solitarias; el fruto es una vaina recta de hasta 30 mm de largo por 2-3 mm de ancho, dispuestas en racimos (de ahí su nombre pata de pájaro) con la superficie glabra, son altamente dehiscentes y sus semillas son subglobosas, de 0.5 a 1 mm de diámetro (Peralta y González 2009; Crumbacher, 2012).

El trébol cuenta con un sistema radicular pivotante, profundo y ramificado, su rebrote depende de yemas axilares de tallos no cortados y de yemas de corona (Peralta y González 2009; Sistema de Información de Biodiversidad de la Administración de Parque Nacionales, Argentina [SIB], 2021); presenta

variaciones en tamaño, forma y pubescencia, en el color de las hojas y en el hábito de crecimiento, que tiende a ser erecto, aunque puede ser postrado o ascendente (Seaney y Henson, 1970)

Existen alrededor de 200 especies anuales y perennes del género *Lotus*, distribuidas principalmente en el mediterráneo europeo (Lagler, 2003). El 90 % del área mundial sembrada es con *L. corniculatus* L. y se encuentra principalmente en Estados Unidos, Australia, Chile, Uruguay y Argentina (Escaray et al., 2012). La gran cantidad de genotipos de esta especie se debe a su amplia base genética, teniendo algunos rizomatosos e hibridaciones interespecíficas (Steiner y García, 2001).

El trébol pata de pájaro es ampliamente utilizado en sistemas ganaderos, agrícola-ganaderos y lecheros en países como Uruguay, con un área sembrada de más de 300,000 hectáreas (INIA, 2010). Una característica más que sobresale de esta leguminosa es que contiene taninos condensados (Escaray et al., 2012), estos permiten que la planta presente resistencia a enfermedades y al ataque de insectos, y al ser consumida por el ganado, se reduce la presencia de parásitos gastrointestinales y previenen el meteorismo (Min y Hart, 2003), tales características aumentan su interés de su establecimiento como cultivo forrajero, ya que la producción es el principal objetivo en las actividades agropecuarias. Aunque *L. corniculatus* L. tiene problemas de persistencia, principalmente por el hábito de crecimiento erguido (Oliveira y Paim, 1990). Esta última característica ha sido prioridad en diversos programas de mejoramiento en diferentes países, pero son diversos los factores que influyen sobre tal atributo, principalmente los climáticos (Bolzon et al., 2004).

En cuanto a la calidad nutritiva de *L. corniculatus*, se han reportado concentraciones de proteína cruda de entre 18.9 a 21.8 %, porcentajes similares o superiores a la alfalfa (*Medicago sativa* L.) y el trébol blanco (*Trifolium repens* L.) (García et al., 2014). En cuanto a proteína degradada en rumen se reporta 20.9 %, proteína sin degradar del 77 % y proteína metabolizable del 10.9 %, una Fibra Insoluble Detergente Neutro (FDN) de entre 27.4 y 48 %, Fibra Detergente

Ácido (FDA) de entre 22.9 y 29.1 %, así como la digestibilidad varía del 61.2 a 71.6 % en un clima templado cálido de Australia (Arzani et al., 2006; Fulkerson et al., 2006, Ramírez et al., 2006 y Scharenberg et al., 2007). En el caso de México, estudios realizados por García et al (2014) en evaluaciones realizadas a 12 genotipos de *L. corniculatus* L. indicaron porcentajes promedio de digestibilidad del 76 al 79 %, y del 18 al 26.6 % de PC, así con de FDA de 24.9 a 29.1 % y de FDN de 42.7 a 48.4 %. En cuanto a la Digestibilidad *in vitro* se obtuvieron valores de entre 75.86 y 79.30 %.

1.5.3 Características de tolerancia y adaptación

Lotus corniculatus L. ha sido una leguminosa predominante durante cuatro décadas, cultivándose extensivamente en Uruguay desde 1950. Su alta adopción a nivel internacional explica que sea una de las especies más estudiadas en dicho país. Es una especie que expresa diferentes adaptaciones agronómicas, respecto a otras fabáceas, como la tolerancia a suelos mal drenados donde otras forrajeras no podrían desarrollarse adecuadamente (Steiner y García, 2001) debido a su raíz pivotante profunda y ramificada (Cárdenas, 2011), a la sequía, a bajos niveles de fósforo, a suelos ácidos (pH de 5.5-7) (Canals et al., 2009) y con altos niveles de Al y Mn (Guillen y Widdup, 2008). Sin embargo, entre sus desventajas destacan el lento establecimiento inicial, que no admite aprovechamientos intensos y cosechas frecuentes, así como baja persistencia y productividad (Ixtaina y Mujica, 2010).

Las especies de *L. corniculatus*, *L. tenuis* y *L. uliginosus* han sido elegidos para el desarrollo de diversas investigaciones precisamente por su capacidad para adaptarse al estrés abiótico ante diferentes situaciones medioambientales, tales como alta salinidad, la acidez y la sequía. En particular, la sequía, que constituye uno de los problemas más frecuentes que afectan a la productividad y persistencia de estas diferentes especies utilizadas para la producción de forraje (IICA, 2010).

INIA Chile ha comparado las especies de *L. corniculatus*, *L. uliginosus* y *L. tenuis* con especies modelo como *L. japonicus*, Gifu y MG-20, *L. burtii* y *filicaulis* bajo diferentes niveles de disponibilidad hídrica (100 %, 80 %, 60 % y 40 % de la capacidad de campo), tal condición afectó todos los caracteres y mostraron diferencias significativas entre las poblaciones por la disponibilidad de agua, sobresaliendo *L. corniculatus* y *L. tenuis* al tener los más altos valores de acumulación de materia seca bajo estrés hídrico, siendo las especies más tolerantes a la sequía. A su vez, *L. corniculatus* sobresalió por sus mecanismos de ajuste osmótico que permiten a la planta mantener la tasa de transpiración con una alta tensión de agua en los tejidos (IICA, 2010).

1.5.4 Factores que intervienen en el crecimiento y calidad del forraje

Los cultivos que se siembran con objetivos precisos como la obtención de alimentos, de fibra y energía requieren de condiciones específicas para desarrollarse, tales como un grado óptimo de temperatura y una cantidad de agua suficiente (Ramírez et al., 2017), entre otros insumos y características de crecimiento de los cultivos establecidos. Tres son los factores principales que determinan la calidad del forraje, y, por tanto, su valor nutritivo final: las especies botánicas, el estado de planta cuando se cosecha y las condiciones de recolección. Y los factores secundarios incluyen la temperatura y la humedad del suelo durante el crecimiento de las plantas y su fertilidad, todos estos son determinantes en la calidad del forraje ya que afectan la anatomía y fisiología de la planta (Díaz y Callejo, 2004).

Por su origen europeo, *L. corniculatus* se adapta principalmente a climas templados y fríos, aunque también se ha desarrollado en latitudes tropicales y subtropicales y es apropiada para suelos que van desde arcillosos hasta arenosos, secos e inundados (Acuña, 1998), sobresaliendo entre otras especies forrajeras como el trébol blanco y rojo (Bolzon, 2004). Condiciones cálidas y húmedas aceleran la tasa de mortandad de las plantas y llegan a presentarse casos de podredumbre radicular. Esta se visualiza en la parte aérea por una marchitez permanente progresiva en los distintos tallos de la planta, culminando

con la muerte de estas durante periodos de alta demanda atmosférica de agua, principalmente en verano (Formoso, 1993).

Resultados obtenidos en estudios realizados por Santacoloma *et. al.* (2017) concluyeron en que el crecimiento y la producción de biomasa de cultivos de *L. corniculatus*, responde a cambios en las condiciones biológicas, químicas y físicas del suelo. En praderas establecidas con el trébol pata de pájaro se ha observado que la pérdida de producción de forraje se debe a la pérdida de plantas como consecuencia de lesiones en los tejidos de raíz y corona, provocadas por diversos fenómenos como el sobrepastoreo y el daño de organismos como nematodos (Formoso, 1993).

1.5.5 Crecimiento de la planta y rendimiento del forraje

El crecimiento de las plantas es definido generalmente como un incremento irreversible en las dimensiones de esta (Di Benedetto y Tognetti, 2016) y para determinarlo pueden medirse los cambios en volumen, pero debido a las dificultades prácticas que genera, suelen determinarse variables relacionadas, tales como la acumulación de peso, las variaciones en la altura o el diámetro, o los cambios en el área foliar. Esta metodología permite realizar un análisis de crecimiento de los cultivos al ser una aproximación cuantitativa de descripción e interpretación del desarrollo vegetal, determinado por condiciones genético-ambientales (Pérez et al., 2018)

Se espera que la biomasa acumulada de una planta (u órgano) incremente inicialmente a una tasa exponencial, más tarde de manera lineal y finalmente observar un crecimiento a una tasa decreciente hasta alcanzar un nivel máximo (Poorter, 2002). El análisis clásico del crecimiento es un análisis de la acumulación de peso seco, que es muy buen estimador del carbono total de la planta, permitiendo analizar importantes aspectos de su fisiología (Di Benedetto y Tognetti, 2016). En el estudio de las especies forrajeras su crecimiento ha sido definido mediante la altura del dosel y la cantidad del forraje producido (Matthews et al., 1999).

Estudios realizados con *L. corniculatus* L. sobre su producción y calidad nutritiva han sido reportados por diversos autores, señalando que su producción de forraje puede ir de 4,799 a 13,300 kg de MS ha⁻¹ (Acuña, 1998; Cárdenas et al., 2007). García et al. (2014) indican en estudios realizados en México que los genotipos con mayor productividad de forraje fueron el 202700, Estanduela Ganador y Gran San Gabriel con 1,099.7, 1,1057.2 y 982. 6 kg ha⁻¹, respectivamente. Por otro lado, Álvarez et al. (2018b) obtuvieron diferencias en tratamientos y estaciones del año en cuanto a la altura de *L. corniculatus* L. en praderas cosechadas, entre estaciones, la altura promedio estacional mayor se registró en primavera-verano con 28 cm, y en invierno la menor con 20 cm.

El estado de desarrollo de la planta es uno de los principales factores que afectan al valor nutritivo de los forrajes ya que, durante la fase de crecimiento rápido, las plantas forrajeras contienen suficientes nutrientes para satisfacer las necesidades de crecimiento y reproductivas. Al comenzar su estado de madurez, los niveles de muchos nutrientes disminuyen, por lo que debe realizarse el corte tomando en cuenta el desarrollo de la planta y no tanto por un calendario fijo, con esto se pretende producir forrajes de calidad elevada (Díaz y Callejo, 2004). Para el caso de *L. corniculatus* L. Cárdenas et al. (2007) señalan una frecuencia de corte cada 45 días, en dicho periodo se han encontrado mejores rendimientos y calidad del forraje.

1.5.6 Índice de Área foliar

El Índice de Área Foliar es un indicador del área del tejido foliar por unidad de superficie y es una variable fundamental para el estudio del desarrollo y crecimiento de los cultivos (Mendoza-Pérez et al., 2017). Además, es la base para la estimación de requerimientos de la planta como los hídricos, nutricionales, eficiencia bioenergética y determinar el potencial de daños fitosanitarios (Hernández-Hernández et al., 2011), pues existe una importante relación con la interceptación de la radiación solar, relacionada a los procesos transpirativos de la planta y a la fotosíntesis reflejados en la productividad (acumulación de biomasa) (Mendoza-Pérez et al., 2017).

Generalmente, la determinación del IAF es destructiva y requiere de procedimientos para integrar la superficie foliar (White et al., 2000). Sin embargo, se han utilizado diversos métodos no destructivos para su cálculo que van desde el uso de equipos como el medidor de área foliar (LI-COR 3100) y a través del uso de imágenes digitales procesadas utilizando softwares como ImageJ, y comparando ambos métodos Newton Martin et al. (2021) obtuvieron resultados similares, siendo este software de manera confiable para la medición del área foliar en caso de no contar con equipos específicos para tal función.

1.5.7 Capacidad de rebrote y dinámica de crecimiento (población de tallos)

El rebrote del forraje es considerado como el tiempo que le toma a la planta recuperar la biomasa removida después de una defoliación, por ello es importante conocer la fenología de la planta al acumular su biomasa entre una cosecha y la siguiente, esta acumulación varía por factores ambientales involucrados como la temperatura, humedad, la fertilidad del suelo, la luz interceptada y el manejo realizado (Hernández et al., 2000; Montes et al., 2016; Difante et al., 2009). Por tal motivo, el conocimiento de los cambios estacionales en el rendimiento y calidad nutricional de las plantas permite determinar la mejor frecuencia de cosecha para obtener la mayor producción de forraje de alta calidad (Villegas et al., 2004 y Velasco et al., 2007).

En el caso de las leguminosas, las yemas son las responsables del nuevo crecimiento, las cuales están concentradas en la corona en la base del tallo, además, en el caso del trébol, presenta estolones de cuyos nudos se desarrollan yemas axilares que pueden dar origen a raíces y nuevas hojas, por ello son más resistentes al pastoreo (Olivares, 2009). Estas características morfológicas constituyen la vía vegetativa que permite mantener las plantas en condiciones productivas durante largos periodos de tiempo, aunque se haya destruido la corona de la planta madre. La velocidad inicial de crecimiento de las plantas dependerá de las reservas de hidratos de carbono, que son aquellos compuestos fácilmente hidrolizables que la planta fabrica, almacena y utiliza como recursos para la mantención y formación de órganos aéreos y subterráneos. Se

concentran principalmente en raíces, bases de tallos, estolones y rizomas (Olivares, 2009).

La concentración de materia seca (MS) y proteína cruda (PC) en los forrajes normalmente declinan con aumentos en el número de días del rebrote produciendo cambios en la calidad del forraje cosechado. Las tasas de disminución incrementan a medida que los periodos de rebrote y momento de utilización se van localizando sobre estados fenológicos más avanzados de desarrollo: vegetativo, botón floral, floración temprana, vainas verdes, vainas maduras. Paralelamente, las proporciones entre las distintas partes de la planta cambian, originándose una disminución de la relación hoja/tallo con el aumento en la edad de rebrote y/o avance del estado de madurez (Formoso, 1993).

En el caso del conocimiento de la dinámica de crecimiento de las especies forrajeras, ya sea en monocultivo o asociadas, es primordial para la obtención de un sistema planta-animal eficiente y de calidad (Hernández et al., 2000). Esta información, aunada a los requerimientos nutricionales de los animales permitirá programar un eficiente manejo y, por lo tanto, obtener las mayores ganancias económicas por animal y por unidad de superficie en los sistemas de producción pecuarios (Zaragoza et al., 2009).

En una pradera o un sistema evaluado bajo condiciones controladas sin defoliar se debe considerar la tasa de crecimiento de tejido vegetal y la pérdida de tejido por senescencia o descomposición, la cual cambia dependiendo de la estación del año (Gutiérrez et al., 2018), esto ayuda en investigaciones agropecuarias en el análisis de crecimiento de especies forrajeras, utilizando variables que permiten inferencias sobre algunos aspectos fisiológicos del desarrollo de las plantas como la fotosíntesis, respiración y asignación de carbono (McGraw et al., 1990). Por ello, es de gran importancia describir el comportamiento fisiológico, de producción y composición nutricional de las especies forrajeras, ya que permite conocer el efecto de los factores ambientales sobre la capacidad productiva de las plantas a lo largo de su ciclo biológico (Enríquez y Romero, 1999; Gutiérrez et al., 2018).

También las curvas de distribución de forraje estacional se han utilizado en la evaluación de especies forrajeras (Mazzanti et al., 1992). Por lo tanto, el conocimiento de los cambios estacionales en el crecimiento acumulado de las especies forrajeras permite determinar la frecuencia con la que se debe defoliar la pradera para obtener la mayor producción de forraje de calidad (Velasco et al., 2007). Para el caso de *L. corniculatus* L. Álvarez et al. (2018a) en estudios en México obtuvieron los mayores rendimientos promedios estacionales en primavera con 8,817 kg MS ha⁻¹ y los menores en otoño 4,432 kg MS ha⁻¹. Tal comportamiento se explica por la relación entre la producción de forraje y las temperaturas óptimas (22 °C) para el crecimiento de *L. corniculatus* L. en condiciones de campo (García et al., 2014).

1.5.8 Composición morfológica y relación hoja-tallo

Las hojas constituyen la parte más nutritiva y digestible de las plantas, ya sean aprovechadas en verde, como heno o incluso como ensilados. Algunas plantas forrajeras como la alfalfa cuando están en un estado de floración del 10 %, las hojas pueden contener alrededor de un 24 % de proteína bruta, mientras que en los tallos solo un 12 %. Además de las hojas y tallos, se considera la presencia de malezas o tallos secos, los cuales restan calidad al forraje pastoreado o cosechado (Díaz y Callejo, 2004).

En estudios realizados por Álvarez et al. (2018a) obtuvieron que en la composición morfológica de *L. corniculatus* L. al día del corte variaron los rendimientos promedios de los componentes del forraje, en donde la hoja fue la que más aportó al rendimiento con el 53 %, seguido por el tallo con 32 %, material muerto 8 %, y maleza con el 7 % y en estudios más recientes por Álvarez et al. (2020), se obtuvieron resultados similares en cuanto a composición morfológica donde la hoja aporta el 56 %, seguido por el tallo con el 30.5 %, material muerto 8.5 % y maleza con 4.5 %.

La relación hoja-tallo es un componente de la arquitectura del dosel de las forrajeras y un factor determinante en la selección de la dieta y su consumo,

representando un importante indicador de la calidad, ya que un porcentaje elevado de hojas es lo más deseable ya que en ellas se encuentra un contenido de proteína cruda, al menos dos veces mayor que en los tallos (Popovic et al., 2001). Además, estos últimos tienen mayor concentración de lignina conforme avanza la edad de la planta, lo que reduce su digestibilidad y calidad general del forraje (Wilson et al., 2018).

En el caso de estudios de rendimiento y productividad realizados por García et al. (2014) en *L. corniculatus* L. obtuvieron valores de relación hoja/tallo que variaron de 1.5 a 4.4 en 12 diferentes genotipos evaluados. En estudios realizados por Álvarez et al. (2020) se obtuvieron resultados de relación hoja/tallo que variaron por estación, obteniendo la mayor en invierno con 2.6, seguida por otoño con 2.5, mientras que verano y primavera se obtuvieron 1.9 y 1.8, respectivamente. Cabe destacar que ambos estudios se realizaron en parcelas experimentales en el Estado de México con las mismas condiciones climáticas.

1.5.9 Contenido nutrimental de los forrajes

El análisis químico de los tejidos vegetales de cultivos tiene como objetivo determinar el contenido de macro y micronutrientes para la identificación de deficiencias, basadas en datos de referencia, y en conjunto con análisis químicos del suelo en el que se desarrollaron, hacer recomendaciones de fertilización (Correndo y García, 2012). Se establecen de manera general diferentes categorías de contenido de nutrientes:

A) Zona de deficiencia severa: en ella la producción aumenta, pero el nivel de nutrientes en tejido se ve disminuida, se denomina efecto de Steenbjerg (Steenbjerg, 1954), esto ocurre al disminuir la velocidad de absorción o transporte de los nutrientes al tejido foliar, causando su dilución.

B) Zona de ajuste: hay una relación lineal entre el nivel foliar y el crecimiento o la producción de la planta.

C) Zona de suficiencia, es una banda estrecha debajo de la cual la producción decrece fuertemente debido a la falta de algún nutriente, en esta región se encuentra el “nivel crítico” que corresponde a contenido de nutrientes asociados a una intensidad máxima de procesos fisiológicos definidos como la actividad fotosintética (Malavolta et al., 1997).

D) Zona de lujo: en ella el nivel foliar aumenta mientras que la producción permanece constante, se habla de un desperdicio de nutrientes.

E) Zona de toxicidad, el nivel del nutriente aumenta aún más y la producción disminuye, ya sea como consecuencia de un efecto tóxico del elemento o un desbalance entre los elementos (Walworth y Sumner, 1987).

El diagnóstico foliar basado en el nivel crítico es uno de los criterios más utilizados de interpretación en el análisis de plantas y que los valores obtenidos se comparen con valores estándares para un determinado nutriente, estado fenológico y órgano establecido (Bates, 1971). El valor crítico considera a la concentración mínima del nutriente con la que se logra del 90 al 95 % del rendimiento máximo, y una de las desventajas que muestra este valor es que puede variar entre un 25 % o más en función de las condiciones en la que se desarrolle la planta o el cultivo (Correndo y García, 2012). Los niveles críticos o rangos disponibles en la literatura para cada cultivo son muy importantes para su empleo como guía para planes de fertilización para evitar síntomas de deficiencia por parte de las plantas que comprometan su productividad.

Investigadores dedicados a la nutrición vegetal concuerdan en diecisiete nutrientes esenciales en las plantas, clasificados en macronutrientes y micronutrientes, esto dependiendo de la concentración que se encuentra en la planta. Los considerados macronutrientes son: nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), y ocho micronutrientes: cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), boro (B), molibdeno (Mo), cloro (C) y níquel (Ni) (Marschner y Rengel, 1995). El sodio (Na) no es considerado como elemento esencial, sin embargo, se le menciona como beneficioso en algunas

plantas como las cactáceas y perjudicial en otros (Cabezas, 2010). La deficiencia o el exceso de estos elementos pueden comprometer desde la productividad hasta la sobrevivencia de las plantas cultivadas, por lo que es necesario identificar los síntomas que presentan ante estas situaciones, así como conocer las funciones de estos elementos en la planta.

Existe poca información a nivel mundial sobre los requerimientos nutricionales de *L. corniculatus* L. (Kelling y Matocha, 1990). Mucha de la información desarrollada en los países que está establecido el cultivo se ha concentrado en la fertilización fosfatada y al encalado de leguminosas (Casanova y Barbazán, 2005), en tanto, el requerimiento de micronutrientes ha sido estudiada con menos frecuencia.

Debido a la variación de concentración de los nutrientes por la edad de la planta, la parte analizada y las condiciones ambientales se tienen que establecer pautas según su aprovechamiento, para el caso de nutrientes en pasturas Jones y Case (1990) propusieron que la parte más apropiada es la parte aérea de la planta al inicio de la floración (10 %), y con ellas realizar la comparación con datos existentes de concentraciones críticas, para el caso de *L. corniculatus* L. Barbazán, Ferrando y Zamalvide (2008) proponen compararlas con la alfalfa (*Medicago sativa*), sin embargo, estos mismos autores han obtenido datos sobre el contenido de macro y micronutrientes de cultivos de *L. corniculatus* con aprovechamiento intensivo en Uruguay que pueden utilizarse de referencia para estudios realizados en otras regiones agroecológicas.

Cuadro 1. Concentración mínima de macro y micronutrientes de *Medicago sativa* y *Lotus corniculatus* L.

Macro y micronutrientes	Cultivo	Concentración mínima	Autor (es)
Nitrógeno	<i>M. sativa</i>	2.0 %	Kelling y Matocha, 1990

Fósforo	<i>L. corniculatus</i>	2.68 %	Zamalvide, Ferrando y Barbazán, 2008 Pinkerton et al., 1997
	<i>M. sativa</i>	0.24 %	y Kelling y Motocha, 1990
Magnesio	<i>L. corniculatus</i>	0.22 %	Zamalvide, Ferrando y Barbazán, 2008
	<i>M. sativa</i>	0.20 %	Kelling y Motocha, 1990
Potasio	<i>L. corniculatus</i>	0.31 %	Zamalvide, Ferrando y Barbazán, 2008
	<i>M. sativa</i>	0.73 %	Remón Eraso y García Ciudad, 1982
Calcio	<i>L. corniculatus</i>	1.93 %	Zamalvide, Ferrando y Barbazán, 2008
	<i>M. sativa</i>	0.40 %	Cornforth y Sinclair, 1984
Sodio	<i>L. corniculatus</i>	1.06 %	Zamalvide, Ferrando y Barbazán, 2008
	<i>M. sativa</i>	0.038 %	Remón Eraso y García Ciudad, 1982
Cobre	<i>L. corniculatus</i>	5 mg kg ⁻¹	Kelling y Motocha, 1990 y Cornforth y Sinclair, 1984
	<i>M. sativa</i>	9.0 mg kg ⁻¹	Zamalvide, Ferrando y Barbazán, 2008
Hierro	<i>M. sativa</i>	44 mg kg ⁻¹	Kelling y Motocha, 1990 y Cornforth y Sinclair, 1984

Manganeso	<i>L. corniculatus</i>	97 mg kg ⁻¹	Zamalvide, Ferrando y Barbazán, 2008
	<i>M. sativa</i>	24 mg kg ⁻¹	Kelling y Motocha, 1990 y Cornforth y Sinclair, 1984
	<i>L. corniculatus</i>	82 mg kg ⁻¹	Zamalvide, Ferrando y Barbazán, 2008
	<i>M. sativa</i>	12 mg kg ⁻¹	Kelling y Motocha, 1990 y Cornforth y Sinclair, 1984
Zinc	<i>L. corniculatus</i>	25 mg kg ⁻¹	Zamalvide, Ferrando y Barbazán, 2008

Al ser un forraje, el principal objetivo en su implementación es una alta calidad, este rubro está conformado por su composición química, la cual señala que los forrajes de mayor calidad nutritiva son los que presentan mayor proporción de componentes no estructurales (proteínas, azúcares y almidón) respecto de los componentes ligados a las paredes celulares (celulosa, hemicelulosa y lignina) de menor calidad (Díaz y Callejo, 2004).

1.5.10 Evaluación productiva en México

En el caso del estudio de *L. corniculatus* L. en México, García et al. (2014) evaluaron el potencial agronómico de 12 genotipos de *L. corniculatus* L. establecidos en el Estado de México, región con clima templado, donde se concluyó que reúne buenas características agronómicas, llegando a producir en promedio hasta 7,400 kg MS ha⁻¹ al año con porcentajes de digestibilidad de hasta el 76-79 % y del 18 al 22.6 % de proteína cruda. De los 12 genotipos evaluados se encontró que 10 de ellos tuvieron un mayor potencial productivo y de calidad. Tales datos de productividad servirán para comparar los resultados obtenidos en el proyecto de investigación al evaluar la adaptabilidad de *L.*

corniculatus L. a las condiciones medioambientales de la Comarca Lagunera y su productividad.

Por otro lado, Álvarez et al. (2018a) ha desarrollado estudios con la evaluación de su comportamiento productivo dependiente de estrategias de cosecha y su respuesta productiva en función de la cantidad de luz interceptada y la identificación de estrategias óptimas para su cosecha (Álvarez et al., 2020), aunque solo en pocos genotipos. Tal situación hace necesario el desarrollo de información del comportamiento de *L. corniculatus* L. en diferentes regiones agroecológicas de México con el objetivo final de desarrollar paquetes tecnológicos que permitan el establecimiento de este cultivo con menores requerimientos hídricos, comparados a los de la alfalfa y mitigar en parte la sobreexplotación del acuífero.

1.6 Literatura citada

- Acuña, P. H. (1998). Comparación de variedades de tres especies del género *Lotus* (*L. corniculatus* L., *L. uliginosus* y *L. tenuis* Wald et Kit). *Agricultura Técnica* 58, 7-14.
- Álvarez V., P., García D., G., Guerrero R., J., Mendoza P., S. I., Ortega C., M. y Hernández G., A. (2018a). Comportamiento productivo de *Lotus corniculatus* L. dependiente de la estrategia de cosecha. *Agrociencia* 52 (8), 1081-1093.
- Álvarez V., P., García de los Santos, G., Ortega C., M. E., Mendoza P., S. I. y Joaquín C., S. (2020). Forage accumulation in *Lotus corniculatus* L. as a function of harvest strategy. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 11(4), 1087-1100. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11i4.4950>
- Álvarez V., P. Hernández G., A., García D., G., Guerrero R., J. D., Mendoza P., S. I., Ortega C., M. E., Rojas G., A. R. y Wilson G., C. Y. (2018b). Potencial Forrajero de *Lotus corniculatus* L. con diferentes estrategias de manejo. *Agroproductividad* 11(5), 24-28.
- Arzani, H., Basiri, M., Khatibi, F. y Ghorbani, G. (2006). Nutritive value of some Zagros mountain rangeland species. *Small Ruminant Research* 65 (1-2), 128-135. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2005.05.033>
- Aspiazú, I., Sediya, T., Ribeiro, J. R., Silva, A. A., Concenco, G., Galon, L., Ferreira, E. A., Silva, a. f., Borges, E. T. y Araujo, W. F. (2010). Eficiencia fotosintética y de uso del agua por malezas. *Planta Daninha Vicosa-MG* 28(1), 87-92.

- Banco Mundial. (2021). *El agua en la agricultura*. <https://www.bancomundial.org/es/topic/water-in-agriculture>
- Barry, T. N., Kemp, P. D., Ramírez Restrepo, C. A. y López Villalobos, N. (2003). Sheep production and agronomic performance of *Lotus corniculatus* under dryland farming. *Research and Practice Series* 11, 109-115. <https://doi.org/10.33584/rps.11.2003.3003>
- Bates, T.E. (1971). Factors affecting critical nutrient concentrations in plants and their evaluation: A review. *Soil Science* 112 (2),116-129.
- Bolzon S., M. T., Scheffer B., S. M. y Dall A., M. (2004). Caracterização Morfofisiológica de Genótipos de Cornichão (*Lotus corniculatus* L.). *Revista Brasileira de Zootecnia* 33(6), 1654-1661. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982004000700003>
- Briones, O., Búrquez, A., Martínez Yrizar, A., Pavón, N. y Perroni, Y. (2018). Biomasa y productividad en las zonas áridas mexicanas. *Madera y Bosques* 24 (especial), 1-19. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401898>
- Casanova O. y M. Barbazán. (2005). Alternativas de mejoramiento de campo natural en suelo sobre Basamento Cristalino en Uruguay. In III Congreso Nacional sobre manejo de pastizales naturales. Paraná, Entre Ríos. Argentina, pp. 144.
- Cabezas, O. L. (2010). *Sodio en plantas CA C. C4 y CAM*. Características generales y uso en programas de desarrollo de tierras áridas y semiáridas: Homenaje del doctor Julio López Gorgé, 151.
- Canals, R., Peralta, M. J. y Zubiri, E. (2009). *Vicia sativa* L.: Veza No. 2010. Disponible en: https://www.unavarra.es/herbario/pratenses/htm/Medi_sati_p.htm
- Cárdenas, R. (2011). *Lotus*, nueva leguminosa forrajera para los sistemas lecheros de clima frío y zonas templadas. *Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Editorial Produmedios*, 20-24 p.
- Cárdenas R., E. A., Carulla, J., Riveros, Á. y Pimentel, J. C. (2007). Evaluación agronómica y productiva de una colección núcleo de variedades comerciales de *Lotus* para clima frío en Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias* 20, 652-653.
- Castillo, A. (2012). *Generación de híbridos interespecíficos de L. uliginosus x L. corniculatus y evaluación de la respuesta a déficit hídrico*. [Tesis de Doctorado, Universidad de la República de Uruguay]. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/3933/1/uy24-16039.pdf>
- CONAGUA. (2018). *Estadísticas del agua en México*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf

- CONAGUA. (2020). *Disponibilidad media anual de acuíferos*. <https://sigaims.conagua.gob.mx/dma/acuiferos.html>
- Correndo, A. A., García, O. F. (2017). Concentración de nutrientes en planta como herramienta de diagnóstico: Cultivos extensivos. *Archivo Agronómico* 14, 1-8
- Crumbacher L. (2012). *Lotus Corniculatus* L. Red de Herbarios del Noroeste de México. Disponible en: <https://herbanwmex.net/portal/taxa/index.php?taxon=Lotus+corniculatus&formsubmit=Search+Terms>
- Cuitiño, M.J. (2012). Variedades criollas de *Lotus corniculatus* L. multiplicados por productores: rendimiento de semilla y componentes que lo determinan. *Revista INIA* 31(5), 21-25.
- Di Benedetto, A. y Tognnerri, J. (2016). Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: su aplicación a cultivos intensivos. *Revista de investigaciones agropecuarias*, 42(3), 258-282.
- Díaz B., V. y Callejo R., A. (2004). Calidad del forraje y del heno. *Conservación de Forrajes I* 120, 55-64
- Díaz, P, Borsani, O., Márquez, A. y Monza, J. (2005). Osmotically induced proline accumulation in *Lotus corniculatus* leaves is affected by light and nitrogen source. *Plant Growth Regulation* 46, 223-232. DOI 10.1007/s10725-005-0860-7
- Difante, S. G., Do Nascimento Jr. D., Bautista-Euclides, V. P., Da Silva, S. C., Barbosa, A. R. y Velásquez C., W. (2009). Sward structure and nutritive value of Tanzania guineagrass subjected to rotacional stocking managements. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 38(1), 9-199. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982009000100002>
- Enríquez Q. J. F. y Romero, M. J. (1999). Tasa de crecimiento estacional a diferentes edades de rebrote de 16 ecotipos de *Brachiaria* spp. en Isla, Veracruz. *Agrociencia* 33(2), 141-148.
- Escaray, J. F., Menendez, B. A., Garriza, A., Pieckenstaina, L. F., Estrella, J. M., Castagnoa N. L., Carascoc, P., Sanjuand, J. y Ruiza, A. O. (2012). Ecological and agronomic importance of the plant genus *Lotus*. Its application in grassland sustainability and the amelioration of constrained and contaminated soils. *Plant Science* 182, 212-133.
- FIRCO. (2017). ¿Sabes qué son los Cultivos Alternativos en el Campo Mexicano? <https://www.gob.mx/firco/es/articulos/sabes-que-son-los-cultivos-alternativos-en-el-campo-mexicano?idiom=es>
- Formoso, F. (1993). *Lotus corniculatus; I. Performance forrajera y características agronómicas asociadas*. Unidad de Difusión e Información Tecnológica del INIA.

- Fulkerson, W. J., Neal, J.S., Clark, C. F., Horadagoda, A., Nandra, K. S. y Barchia, I. (2006). Nutritive value of forage species grown in the warm temperate climate of Australia for dairy cows: Grasses and legumes. *Livestock Science* 107(2-3), 253-264. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2006.09.029>
- García B., D. V., Guerrero R., J. D., García D., G. y Lagunes R., S. (2014). Rendimiento y calidad de forraje de genotipos *Lotus corniculatus* L., en el estado de México. *Nova Scientia* 7(13), 170-189. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S200707052015000100010&script=sci_arttext
- Guillen, R. y Widdup, K. (2008). Program of improvement in *Lotus corniculatus* L.: Base Germplasm characterization. *Lotus Newsletter* 38 (2), 1-67. <http://www.inia.org.uy/sitios/lnl/vol382/guillen1.pdf>
- Gunn., C. R., Wiersema, H. J., Ritchie A. C. y Kirkbride. (1992). *Families and general of spermatophytes recognized by the Agricultural Research Service*. Technical Bulletin 1796: 476 p.
- Gutiérrez Arenas, A. F., Hernández Garay, A., Vaquera Huerta, H., Zaragoza Ramírez, J. L., Luna Guerrero, M. J., Reyes Castro, S. y Gutiérrez Arena, D. A. (2018). Análisis de crecimiento estacional de trébol blanco (*Trifolium repens* L.). *Agroproductividad* 11(5), 62-68.
- Hernández G., A., Matthew, C. y Hodgson, J. (2000). The influence of defoliation height on dry-matter partitioning and CO₂ exchange of perennial ryegrass miniature sward. *Grass Forage Science* 55(4), 1-5. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2494.2000.00234.x>
- Hernández-Hernández, F., López-Cruz, I. L., Guevara-González, R. G., Rico-García, E., Ocampo-Velásquez, V. R., Herrera-Ruiz, G., González-Chavara, M. M., & Torres-Pacheco, I. (2011). Simulación del crecimiento y desarrollo de pimiento (*Capsicum annum* L.) bajo condiciones de invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2(3), 385-397.
- IICA. (2010). LOTASSA: Un puente entre la genómica y las pasturas del siglo XXI. Uruguay: PROCISUR. Disponible en: <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/8168/BVE19040281e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- INIA. (2010). *Lotus corniculatus* como leguminosa forrajera perenne. <http://www.inia.org.uy/productos/cvforrajeras/lcorniculatuses.html>
- INATEC. (2016). *Manual del Protagonista: Nutrición Animal*. Gobierno de Reconciliación y Unidad Nacional. Disponible en: <https://www.biopasos.com/documentos/087.pdf>
- Ixtaina, V. Y. y Mujica, M. M. (2010). Respuesta del vigor de plántula de poblaciones de *Lotus tenuis* a variaciones contrastantes de disponibilidad de agua, luz y nutrientes. *Agrociencia* 44 (1), 31-41. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S140531952010000100003&script=sci_abstract&tlng=en

- Jones J.B. y V.W. Case. (1990). Sampling, handling, and analyzing plant tissue samples. *Soil testing and plant analysis*. 3er ed. R. L. Westerman. Soil Science Society of America. USA. 389-427. <https://doi.org/10.2136/sssabookser3.3ed.c15>
- Kelling K.A. y J.E. Matocha. (1990). Plant analysis as an aid in fertilizing forage crops. In *Soil testing and plant analysis*. 3er ed. R. L. Westerman. Soil Science Society of America, pp. 603-643. <https://doi.org/10.2136/sssabookser3.3ed.c23>
- Lagler J., C. (2003). Lotus: Un género que no acaba en dos especies. *Revista Forrajes y Granos*. Buenos Aires, Argentina, pp 72-76.
- MacAdam, J. W., Griggs, T. C., Beuselinck, P. R. y Grabber, J. H. (2006). Birdsfoot trefoil, a valuable tannin-containing legume for mixed pastures. *Forage and Grazinglands*. doi: 10.1094/FG-2006-0912-01-RV
- Malavolta, E., Vitti, G. C., & Oliveira, S. A. D. (1997). Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba. 319 pp.
- Marschner, P y Rengel, Z. (1995). Nutrient availability in soils. In: Marschner, H. (Ed.). *Mineral Nutrition of higher plant*. Academic Press, pp: 315-502. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819773-8.00003-4>
- Matthews P., N.P., Harrington, K.C., Hampton, J.G. (1999). *Management of grazing systems*. In: White, J.; Hodgson, J. (Eds.). *New Zealand: pasture and crop science*. Auckland: Oxford University Press. pp: 153 - 174.
- Mazuela A., P. C. (2013). Agricultura en zonas áridas y semiáridas. *Revista de Agricultura en Zonas Áridas* 31(2), 3-4. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292013000200001&lng=en&nrm=iso&tlng=en
- Mazzanti A., Castaño, J., Sevilla G., Orbea, J. (1992). *Características agronómicas de especies y cultivares de gramíneas y leguminosas forrajeras adaptadas al sudoeste de la provincia de Buenos Aires*. Centro Regional Buenos Aires Sur. EEA Balcarce. INTA, 73 p.
- McGraw, J. B., Garbutt, K. (1990). The analysis of plant growth in ecological and evolutionary studies. *Trends in Ecology and Evolution* 5(8), 251-254. [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(90\)90065-L](https://doi.org/10.1016/0169-5347(90)90065-L)
- Mendoza-Pérez, C., Ramírez-Ayala, C., Ojeda-Bustamante, W. y Flores-Magdaleno, H. (2017). Estimación del índice de área foliar y rendimiento de chile poblano cultivado en invernadero. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*. (9)1, 37-50. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2017.04.009>
- Min, B. R. y Hart, S. P. (2003). Tannins for suppression on internal parasites. *Journal of Animal Science* 81 (14_2), 102-109. https://doi.org/10.2527/2003.8114_suppl_2E102x
- Montes C., F. J., Castro R., R., Aguilar B., G., Sandoval T., S. y Solís O., M. M. (2016). Acumulación estacional de biomasa aérea de alfalfa var. Oaxaca

- criolla (*Medicago sativa* L.). *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* (7) 4, 539-552.
- Neri Guzmán, Medina, C. y Ortega, M. A. (2019). Cultivos alternativos como un mecanismo para el desarrollo de zonas áridas: El caso de jojoba en el Altiplano Potosino. *Revista Internacional de estadística y geografía* 10 (1), 44-63.
- Newton Martin, T., Monçon Fipke, G., Minussi Winck, J. E. y Marchese, J. A. (2021). ImageJ software as an alternative method for estimating leaf area in oats. *Acta Agronómica* 69(3), 162-169. <https://doi.org/10.15446/acag.v69n3.69401>
- Olivares, A. (2009). La morfofisiología de especies forrajeras como base del manejo de pastizales. *Santiago de Chile: Universidad de Chile*, 3-8
- Oliveira J., C. O. y Paim, N. R. (1990). Teste de progenie em linhas de selecao materna de duas espécies do gênero *Lotus*. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 25(3), 461-467.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2012). *El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura*. Mundi-Prensa. <https://www.fao.org/3/i1688s/i1688s.pdf>
- Peralta, J. y E. González. (2009). Leguminosas de Navarra. *Leguminosas de Navarra: Lotus L.* Herbario de la Universidad Pública de Navarra. Disponible en: http://www.unavarra.es/herbario/leguminosas/htm/Lotus_L.htm
- Pérez H., A., Quero C., A. R., Escalante E., J. A., Rodríguez G., M. T., Garduño V. y Miranda J., L. (2018). Biomasa y análisis de crecimiento de cultivares de sorgo forrajero en Valles Altos. *Agronomía Costarricense* 42(2), 107-117. <http://dx.doi.org/10.15517/rac.v42i2.33782>
- Poorter, H. (2002). Plant growth and carbon economy. *Encyclopedia of life science*, 1-6.
- Popovic, S., Stjepanovic, M., Grljusic, S., Cupic, T., & Tucak, M. (2001). Protein and fiber contents in alfalfa leaves and stems. *Quality in Lucerne and Medics for Animal Production* (Eds.: I. Delgado and J. Lloveras), 45, 215-218.
- PROCISUR. (2010). *LOTASSA: Un puente entre la genómica y las pasturas del siglo XXI*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Ramírez B., B. A., González E., A., Salas G., J. M. y García S., J. A. (2019). Tarifas eficientes para el agua de uso agrícola en la Comarca Lagunera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10(3), 539-550. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i3.1295>
- Ramírez R., J. L., Zambrano B., A., Campuzano, J., Verdecia A., D. A., Chacón M., E., Arceo B., Y., Labrada C., J. y Uvidia C., H. (2017). El clima y su

- influencia en la producción de los pastos. *Revista electrónica de veterinaria*, 18(6), 1-12. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/636/63651420007.pdf>
- Ramírez R., C. A., Barry, T. N., López-Villalobos, N., Kemp, P. D. y Harvey, T.G. (2006). Use of *Lotus corniculatus* containing condensed tannins to increase reproductive efficiency in ewes under commercial dryland farming conditions. *Animal Feed Science and Technology* 121(1-2), 23-43. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2005.02.006>
- Remón, E. J., y García, C. A. (1982). Composición del forraje de dos cultivares de *L. corniculatus* L. cosechado en diferentes momentos vegetativos. *Pastos* 12(2), 309-315.
- Reta S., D. G., Castellanos G., P. C., Olague R., J., Quiroga G., H. M., Serrato C., J. S. y Gaytán M., A. (2013). Potencial forrajero de cuatro especies leguminosas en el ciclo de verano en la Comarca Lagunera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4(5), 659-671.
- Reta S., D. G., Serrato C., J. S., Quiroga G., H. M., Figueroa V., U. y Gaytán M., A. (2017). Potencial forrajero de cultivares de canola primaverales e invernales en la Comarca Lagunera, México. *Revista Mexicana de Fitogenética* 40(2), 227-233. <https://doi.org/10.35196/rfm.2017.2.227-233>
- Santacoloma V., L. E., Granados-Moreno, J. E. y Aguirre-Forero, S. E. (2017). Evaluación de variables agronómicas, calidad del forraje y contenido de taninos condensados de la leguminosa *Lotus corniculatus* en respuesta a biofertilizante y fertilización química en condiciones agroecológicas de trópico alto andino colombiano. *Entramado*, 13(1), 222-233. <https://doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25136>
- Scharenberg, A., Arrigo, Y., Gutzwiller, A., Soliva, C. L., Wyss, U., Kreuzer, M. y Dohme, F. (2007). Palatability in sheep and in vitro nutritional value of dried and ensiled sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) birdsfoot trefoil (*Lotus corniculatus*), and chicory (*Cichorium intybus*). *Archives of Animal Nutrition* 61(6), 481-496. <https://doi.org/10.1080/17450390701664355>
- Seaney, R. R. y Henson, P. R. (1970). Birdsfoot trefoil. *Advances in Agronomy*, 22, 119-157.
- SIB. (2021). *Lotus corniculatus*. Disponible en: <https://sib.gob.ar/especies/lotus-corniculatus>
- Steenbjerg, F. (1954). Weathering of minerals as indicated by plants. *Journal Soil Science* 5(2), 205-213. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1954.tb02188.x>
- Steiner, J. J. y García D., G. (2001). Adaptative ecology of *Lotus corniculatus* L. genotypes: I. Plant morphology and RAPD marker characterizations. *Crop Science* 41(2), 552-563. <https://doi.org/10.2135/cropsci2001.412552x>
- Velasco Z., M. E., Hernández, G. A. y González H. V. A. (2007). Cambios en componentes del rendimiento de una pradera de ballico perenne, en

- respuesta a la frecuencia de corte. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30(1), 78-87.
- Villegas A., Y., Hernández, G. A., Pérez, P. J., López, C. C., Herrera, H. J. G., Enríquez, Q. J. G. y Gómez, V. A. (2004) Patrones estacionales de crecimiento de dos variedades de alfalfa (*Medicago sativa*). *Técnica Pecuaria en México* 42(2); 145-158.
- Walworth, J.L. y M.E. Sumner. (1987). *The Diagnosis and Recommendations Integrated System (DRIS)*. In: Stewart, B.A. (Ed.). *Soil Science* Vol 6. Springer-Verlag. USA,149-188.
- White, M. A., Asner, G. P., Nemani, R. R., Privette, J. L., & Running, S. W. (2000). Measuring fractional cover and leaf area index in arid ecosystems. Digital camera, radiation transmittance, and laser altimetry methods. *Remote Sensing of Environment*, 74(1), 45-57.
- Woodward, S. L., Laboyrie, P. J. y Jansen, E. B. (2000). *Lotus corniculatus* and condensed tannins: Effects on milk production by dairy cows. *Asian-australian Journal of animal Science* 13, 521-525.
- Zamalvide, J., Ferrando, M. y Barbazán, M. (2008). 1.4: Relevamiento nutricional de Lotus. In Bermúdez R. y Ayala, W. (Eds.). *Seminario de Actualización técnica: fertilización fosfatada de pasturas en la región este*. (pp. 31-36). Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria.
- Zaragoza E., J., Hernández G., A., Pérez P., J., Osnaya G., F., Martínez H., P., González M., S. y Quero C., A. (2009). Análisis de crecimiento estacional de una pradera asociada alfalfa-pasto Ovillo. *Técnica Pecuaria en México* 47(2),173-188.

CAPITULO II

Atributos agronómicos de adaptabilidad, crecimiento y productividad de *Lotus corniculatus* L. en respuesta al déficit hídrico en el Norte de México

2.1 RESUMEN

El objetivo de este estudio fue evaluar la adaptabilidad y respuesta al déficit hídrico de diferentes accesiones y variedades del trébol *Lotus corniculatus* L. mediante indicadores de sobrevivencia, crecimiento y productividad en condiciones semi controladas de malla-sombra. Se usó un diseño experimental de bloques al azar en arreglo de parcelas divididas con tres repeticiones. Las parcelas grandes fueron los contenidos de humedad en el suelo: óptimo (COHS: 26 % $\pm$ 1.5) y subóptimo (CSHS: 22 % $\pm$ 1.5); las parcelas chicas fueron las accesiones identificadas con las claves: 255301, 227318, 255305, 202700, 226792, 232098 y las variedades Estanduela Ganador (EG), San Gabriel (SG), Gran San Gabriel (GSG) y Procel 804. Solo sobrevivieron cinco de los 10 materiales fitogenéticos evaluados en este estudio, correspondientes a las accesiones: 255301, 255305, 202700, 226792 y la variedad EG. Las estaciones de verano (V) y verano-otoño (V-O) fueron las de mejor crecimiento con una longitud de tallos que varió de 19.1 a 23 cm al final de cada corte de cosecha de forraje fresco, sin diferencia estadística entre los materiales fitogenéticos en el COHS, pero en CSHS las accesiones más sobresalientes fueron la 202700 y 255301, principalmente la primera. Las accesiones 202700 y 255305 fueron las de mejor respuesta en cobertura vegetal y peso de biomasa fresca acumulada (PMFA) con valores de 1,649.0 cm² y 583.7 g planta⁻¹ en CSHS y de 1,661.2 cm² y 740.1 g planta⁻¹ en COHS, respectivamente. La hoja fue el principal aportador de la biomasa fresca total, lo cual es un indicador indirecto de buena calidad de forraje por ser el órgano de la planta de mayor contenido nutrimental. La accesión 202700 sugiere ser la mejor opción en condiciones de déficit hídrico, pero habrá que validar esta información en condiciones de campo.

Palabras clave: Uso eficiente del agua, forraje, ganadería, trébol forrajero, fisiología del estrés.

2.2 INTRODUCCIÓN

El cambio climático y el impacto ambiental es una de las causas de la degradación de los recursos naturales, adicional a la acción antrópica, lo cual compromete la estabilidad de los agroecosistemas y la consecuente

productividad agroalimentaria ante la creciente población mundial (Martin et al., 2018). La agricultura es la actividad productiva de mayor demanda de recursos e insumos, especialmente del recurso hídrico, con un consumo del 85 % del agua disponible para usos productivos (Neri y Medina, 2019).

La zona norte de México, que conforma la mayor extensión territorial de zonas áridas del país, el problema del agua es el más recurrente en tiempo y espacio, por la escasez de lluvia con sequías cada vez más intensas y frecuentes (Pedrozo, 2022). Por causa de la sequía, los cuerpos de agua son deprimidos y la recarga del acuífero es cada vez menor, frente a la sobreexplotación del recurso hídrico con efectos negativos por la deficiente cantidad y calidad del agua disponible para los diversos usos domésticos y productivos (Azpilcueta et al., 2018).

Adicionalmente, en la región de estudio, la mayoría de los cultivos de riego establecidos son de altos requerimientos hídricos y poco eficientes en el uso de agua, lo cual genera un alto impacto social, económico y ecológico (Ramírez et al., 2019). Cultivos principalmente forrajeros para abasto de la ganadería estabulada, tales como alfalfa (*Medicago sativa* L.) y algunas gramíneas como el maíz (*Zea mays* L.) y sorgo (*Sorghum vulgare* L.) (García-Bonilla et al., 2014). También se incluye cultivos frutícolas como el nogal (*Carya illinoensis* L.) u hortícolas, como el tomate (*Lycopersicon esculentum* L.), chile (*Capsicum annuum* L.), melón (*Cucumis melo* L.) y sandía (*Citrullus* spp.), los cuales son de alta productividad, pero con altos requerimientos hídricos (Ramírez et al., 2019).

Con este antecedente, la línea de investigación y generación de conocimiento de cultivos alternativos para la agricultura marginal es una alternativa que se está explorando para mitigar el impacto social, económico y ambiental que los sistemas intensivos tradicionales de producción han generado por décadas. Cultivos alternativos nativos o introducidos de alta competitividad productiva pero menos demandantes de agua, puede ser una alternativa viable al problema de la escasez hídrica a nivel regional (Pedroza-Sandoval et al., 2022; Bacarrillo-López et al., 2021). En los últimos años ha tomado especial relevancia el

establecimiento de especies leguminosas, las cuales tienen diversas propiedades de adaptación a condiciones marginales y contribuyen a una agricultura y sistemas agroalimentarios sostenibles (Voisin et al., 2014)

Diferentes especies de trébol forrajero se están explorando en diferentes regiones, mediante programas de investigación y desarrollo tecnológico que puedan competir con cultivos como la alfalfa (*Medicago sativa* L.), en la perspectiva de mantener la calidad y cantidad productiva con un uso más eficiente del agua (Ventura et al., 2020). Existen aproximadamente 200 especies de trébol del género *Lotus*, entre ellas el comúnmente llamado trébol pata de pájaro (*Lotus corniculatus* L.), que es una leguminosa forrajera de origen mediterráneo europeo y africano, que cuenta con una alta capacidad de adaptación a diferentes ambientes, como el déficit hídrico, deficiencias nutrimentales, bajas temperaturas y tolerancia a suelos con pH ácido o con altos niveles de aluminio y manganeso (Guillen y Widdup, 2008).

El rendimiento y calidad nutricional de *L. corniculatus* L. es comparable con la alfalfa, la cual es el cultivo forrajero por excelencia, pero con uso eficiente del agua demasiado bajo, o bien comparable con la productividad calidad forrajera del trébol *Trifolium repens* L. (Marley et al., 2006)

El trébol pata de pájaro ya se lleva a cabo de manera exitosa en países con veranos secos y marcada estacionalidad, como es el caso de Nueva Zelanda y Uruguay, donde ha mostrado ventajas como cultivo forrajero (Barry et al., 2003). Se ha identificado como una especie productiva con tolerancia al déficit hídrico por efecto de la sequía (IICA, 2010). Sin embargo, el establecimiento generalizado de este cultivo no ha sido sencillo de resolver, por la complejidad de su reproducción por semilla y el crecimiento relativamente lento que dificulta su capacidad de expansión en sistemas intensivos de producción (Ixtaina y Mujica, 2010).

Actualmente se estudian diferentes técnicas de manejo de esta especie forrajera que permita superar algunas desventajas en ambientes adversos, como los

propiciados por temperaturas extremas, suelos superficiales y de baja fertilidad y el déficit hídrico por la escasez de lluvia (Mazuela, 2013). El objetivo de este estudio fue evaluar diferentes genotipos de *L. corniculatus* L. en su capacidad de adaptación, crecimiento y producción de forraje en dos contenidos de humedad del suelo bajo condiciones semi-controladas de malla sombra en el norte de México.

2.3 MATERIALES Y MÉTODOS

2.3.1 Ubicación geográfica del área de estudio

El experimento se llevó a cabo en la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo, en Bermejillo, Durango, México, ubicado en las coordenadas geográficas 25.8° LN y 103.6° LW a 1,130 m. El área corresponde a un clima seco desértico, con lluvias en verano e invierno fresco, la precipitación pluvial media anual es 258 mm y la evaporación potencial media anual de 2,000 mm; temperatura media anual de 21 °C, máxima de 33.7 °C y mínima de 7.5 °C (Medina et al., 2005).

2.3.2 Diseño y conducción experimental

Se usó un diseño experimental de bloques al azar en parcelas divididas, con tres repeticiones. Las parcelas grandes fueron dos contenidos de humedad en el suelo: óptimo (26 % $\pm$ 1.5) y subóptimo (22 % $\pm$ 1.5) establecidos con base a la curva de abatimiento de humedad (Figura 1) determinada con el método de la olla de membrana de establecido por Richard (1948).

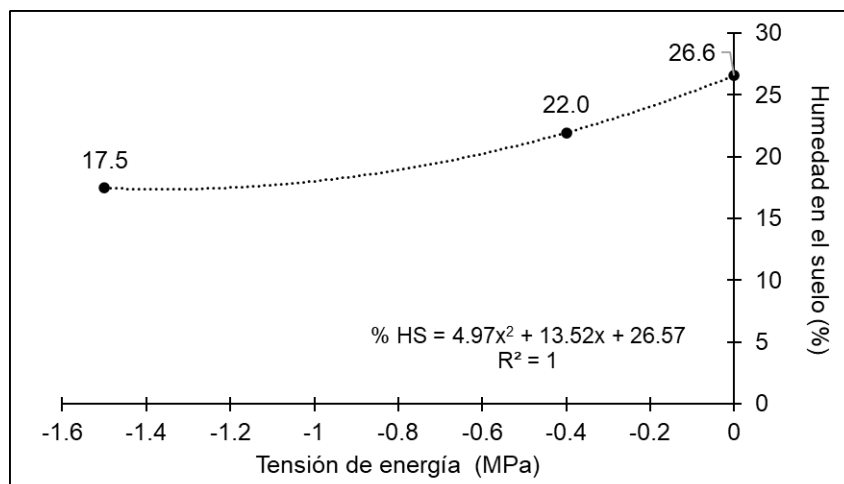


Figura 1. Curva de abatimiento de humedad de la mezcla de suelo utilizada para las accesiones y variedades de *L. corniculatus* L. Donde: %HS= Porcentaje de humedad del suelo; x, es la tensión energía negativa en MPa, considerando que CC y PMP correspondieron a una tensión de energía de 0 y -1.5 MPa, respectivamente.

Con base en lo anterior se calculó que la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) correspondieron a 26.5 % y 17.5 %, respectivamente; las parcelas chicas se constituyeron con las diez accesiones y variedades de *Lotus corniculatus* L. proporcionados por el Colegio de Posgraduados Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México (Cuadro 2).

La unidad experimental fue una planta por maceta, ésta última de plástico rígido de 20 Kg de capacidad. A cada maceta se le agregaron 18 Kg de una mezcla de sustrato en una proporción 50:30:20 correspondiente a suelo:composta:arena, respectivamente. Las características del sustrato corresponden a una textura franco-arenosa en proporción de 52:22:26 % de arena, arcilla y limo, respectivamente, con un pH de 8.69, CE de 10.76 dS m⁻¹ y densidad aparente de 1.46 g cm⁻³. Previo al trasplante, cada accesión/variedad se desarrolló en una bolsa de plástico negro de 1 Kg de capacidad durante 90 días y una vez trasplantada en la maceta se tuvo un periodo de adaptación de 62 días después de establecido el experimento (DDEE) con riego constante a CC, procediendo a dar un corte de estandarización del follaje. Dentro de la malla sombra se colocó un termómetro higrómetro digital marca ORIA que tomó registro de la temperatura (máxima y mínima) y de la humedad relativa durante el periodo de evaluación. El

experimento se estableció en condiciones de malla sombra de marzo 2021 a mayo de 2022.

Cuadro 2. Relación de accesiones y variedades de *Lotus corniculatus* L. usados en el experimento con la identificación correspondiente.

Núm.	Código/Nombre de las accesiones/variedades	Lugar de procedencia	Hábito de crecimiento
2	255301	Francia	Semi erecto
3	227318	Francia	Semi erecto
5	255305	Italia	Semi erecto
6	202700	Uruguay	Erecto
7	226792	Canadá	Semi erecto
8	232098	Alemania	Postrado o rastrero
9	Estanzuela Ganador	Uruguay	Erecto
10	San Gabriel	Uruguay	Erecto
11	Gran San Gabriel	Uruguay	Erecto
12	Procedel 804	Uruguay	Erecto

El riego se realizó cada cuatro días y los contenidos de humedad del suelo se midieron por gravimetría, para lo cual, el peso de las macetas en el COHS se mantuvo en 23.9 Kg, en tanto que, el CSHS correspondió a un peso de 23.0 kg agregando un promedio de 0.6 L de agua por riego en ambos contenidos de humedad, con lo cual se restablecía el COHS a 27.5 % (ligeramente superior a CC) y CSHS a 23.5 %, como límites superiores de humedad del suelo, dejando disminuir ambos valores a 24.5 % y 20.5 %, respectivamente. Se tuvo un margen

de 3.5 % (20.5 – 17.5) como rango de humedad aprovechable para que la planta no llegara a PMP.

Pasado el periodo de adaptación se realizó un corte de follaje de homogenización a las unidades experimentales, iniciando las mediciones en el mes de abril del 2021. Se realizaron en total 7 cortes, el primero en julio del 2021 y el último en mayo del 2022. Para la realización de los cortes se consideraron periodos de crecimiento según las estaciones del año y periodos intermedios: primavera-verano (P-V), verano (V), verano-otoño (V-O), otoño (O), invierno (I), invierno-primavera (I-P) y primavera (P). El intervalo de tiempo entre cortes fue de 45 días, a excepción del periodo de I, el cual se prolongó a 90 días debido al lento crecimiento de la planta por las bajas temperaturas.

2.3.3 Variables evaluadas

2.3.3.1 Sobrevivencia

Las plantas de cada repetición se monitorearon por semana, a partir del trasplante hasta la finalización del periodo de experimentación, el registro consistió en clasificarlas como planta viva o seca. El registro fue en porcentaje con base en el cociente de plantas machitas respecto de las plantas vivas y multiplicado por 100 por accesión/variedad de cada contenido de humedad en las tres repeticiones

2.3.3.2 Longitud de tallo

Se midió al día del corte con una regla graduada a partir del cogollo de la planta, tanto para las accesiones/variedades de porte erecto, como de porte postrado.

2.3.3.3 Cobertura Vegetal

Se midió el diámetro de cada planta con una cinta métrica, y se calculó la cobertura con la siguiente ecuación:

$$COBV = \pi r^2 \quad (1)$$

Donde: COBV= Cobertura Vegetal (cm²) y r= radio de la copa del macollo (cm).

2.3.3.4 Eficiencia del uso del agua

Es el producto del cociente entre la tasa de fotosíntesis (μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) y la tasa de transpiración (mmol H₂O m⁻²s⁻¹), variables medidas con el analizador de gases infrarrojos (IRGA, por sus siglas en inglés) Modelo LI-6400XT (LI-COR®, Inc. Lincoln, Nebraska, USA); la medición se realizó entre las 9:00 y 11:00 h, considerando un área de hoja de 3.38 cm².

2.3.3.5 Producción de Biomasa

Posteriormente a las mediciones en maceta se realizó el corte a una altura de 6 cm sobre el suelo, el forraje colectado se colocó en bolsas de papel etiquetadas, las cuales se trasladaron al laboratorio de fisiología del estrés vegetal de la URUZA-UACH para su análisis. Se pesó el material fresco colectado y se sumó por periodos para obtener al final del experimento la biomasa fresca acumulada (g planta⁻¹).

2.3.3.6 Composición morfológica

Se tomaron 10 tallos al azar por repetición, estos fueron separados en inflorescencias, el material muerto, las hojas y los tallos y se llevaron a secado a una estufa de aire forzado Marca HAFO® (modelo 1600, USA) a una temperatura de 60° C durante 24 horas. Trascurrido este tiempo, se registró el peso seco para determinar el porcentaje de contribución al rendimiento, para lo cual se utilizó la siguiente fórmula:

$$PCM = \frac{COMP*100}{R} \quad (2)$$

Donde:

PCM= Porcentaje por componente morfológico (%)

COMP= Submuestra del componente

R= Rendimiento (g MS)

2.3.4 Análisis estadístico

La base de datos se procesó con uso del Software Statistical Analysis System (SAS, 2009) versión 9.0 con el cual se realizó un análisis de varianza y prueba de rango múltiple de medias Tukey ($P \leq 0.05$) para identificar el efecto de tratamiento. Adicionalmente se utilizó el Programa Excel versión 6.0 para análisis de regresión.

2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Datos climáticos. De acuerdo con el reporte de temperaturas (Figura 2), se identificó una media máxima de 30 °C y promedio de mínimas de 20 °C. con máxima de 46.9 °C y mínima de -4.6 °C. La humedad relativa media registrada osciló entre 44 y 73 %, con mínima entre 5-10 % en los meses de mayo a julio, y máxima de 100% en los periodos de lluvia distribuidos en los meses de julio, agosto y septiembre, ambas variables durante el período de abril de 2021 a mayo de 2022. Lo anterior indica que, aun cuando el experimento fue en condiciones de malla sombra, se registraron valores extremos, en términos de temperaturas y humedad relativa.

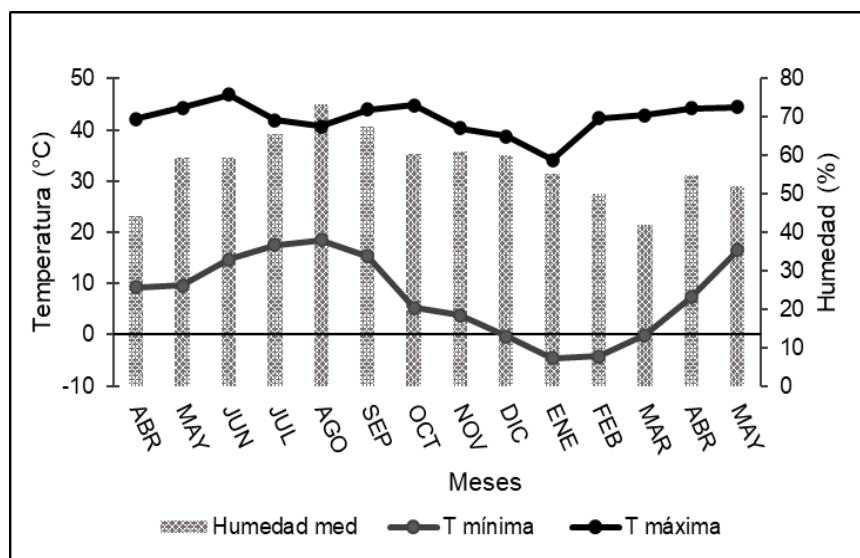


Figura 2. Temperatura media, máxima, mínima y humedad relativa mensual registradas en malla sombra con accesiones y variedades de *L. corniculatus* L. de abril 2021 a mayo 2022, Bermejillo, Dgo.

Porcentaje de sobrevivencia de plantas. Esta variable fue la de mayor impacto durante el periodo de adaptación de *L. corniculatus* L. (62 DDEE) y antes del primer corte de follaje (P-V), con un registro del 100 % de plantas marchitas de las variedades: SG, GSG y Procel 804, las cuales no sobrevivieron a las condiciones ambientales arriba descritas. Las tres variedades de *L. corniculatus* L. no sobrevivientes son procedentes de Uruguay, donde prevalece un ambiente subtropical húmedo y clima templado y por tanto más benigno que el de las zonas áridas del norte de México. Estos resultados no son coincidentes con lo reportado por García- Bonilla et al. (2014), quienes indican una respuesta favorable de adaptación, crecimiento, desarrollo y productividad de estas variedades, pero en ambiente moderadamente templado. Adicionalmente, durante el periodo de crecimiento P-V y V-O, las accesiones 232098 y 227318, registraron una marchitez del 83 y 77%, respectivamente, por lo que, también fueron descartadas en las evaluaciones subsiguientes (Figura 1). Con base en lo anterior, en las fases subsiguientes del experimento se realizó con los cinco materiales genéticos sobrevivientes correspondientes a las accesiones 255301, 602700, 222792 y 255305 y la variedad Estanzuela Ganador. De acuerdo con Tyree et al. (2003), en un proceso de adaptación, las primeras etapas de desarrollo de la planta

resultan ser críticas, lo que es coincidente con los resultados obtenidos en el presente estudio, respecto de los cinco materiales genéticos de *L. corniculatus* L. que no logaron sobrevivir.

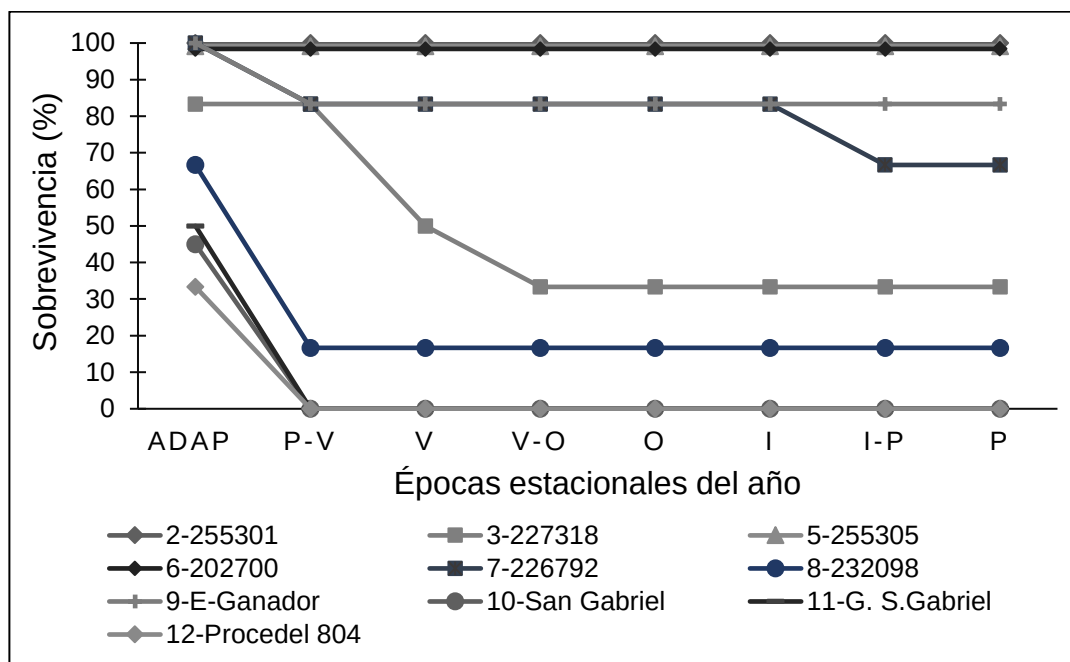


Figura 3. Porcentaje de supervivencia de plantas de las accesiones y variedades de *L. corniculatus* L. evaluados en condiciones de malla-sombra en el norte de México. ADAP, es período de adaptación de las plantas durante el trasplante a las macetas; P, es primavera; V, es verano; O, es otoño y; I, es invierno. Con periodo de evaluación de abril 2021 a mayo 2022. Bermejillo, Dgo.

Longitud de tallos. La longitud de tallos no varió significativamente ($P \leq 0.05$) en los diferentes materiales genéticos de *L. corniculatus* L. evaluados en el COHS con valores que variaron numéricamente de 20.3 a 22 cm, en tanto en el CSHS se observó un mejor comportamiento de la accesión 202700 con un valor de 23 cm, lo que sugiere tolerancia al déficit hídrico (Cuadro 3). Lo anterior significa que, aunque son diferentes en el hábito de crecimiento, todos desarrollan tallos erectos o postrados en la misma tasa de crecimiento bajo un régimen óptimo de humedad. En estudios realizados por Álvarez-Vázquez et al. (2018a) reportaron crecimientos que variaron de 23 a 24 cm del trébol en verano; en tanto que, García-Bonilla et al. (2014) reportaron alturas promedio de 10 cm, pero en invierno con temperaturas mínimas de 0 °C y menor periodo de crecimiento. Ambos estudios establecidos en la región centro de México con clima templado.

Cobertura vegetal. La cobertura vegetal fue significativamente mayor ($P \leq 0.05$) en la accesión 255305 con un valor de $1,661.2 \text{ cm}^2$ en COHS; mientras que el 202700 lo fue en CSHS con $1,649.0 \text{ cm}^2$. En consecuencia, se obtuvo la más alta PBFA ($P \leq 0.05$) en ambas accesiones con valores de $740.1 \text{ g planta}^{-1}$ en COHS y $583.7 \text{ g planta}^{-1}$ en CSHS, respectivamente. La PBFA es producto del metabolismo de la planta, el cual es un proceso dependiente de varios factores ambientales, en este caso del contenido de humedad en el suelo y el potencial genético de cada accesión y variedad. No hubo diferencias en la eficiencia del uso del agua (EUA) entre los materiales genéticos evaluados en este estudio en ninguno de los dos contenidos de humedad del suelo, lo que significa que dichos materiales genéticos se comportan de manera similar dentro de cada contenido de humedad, aunque con valores promedios de mayor EUA en CSHS (4.5), respecto a COSH (3.8), sin considerar el efecto del genotipo (Cuadro 3).

Una moderada EUA en condiciones de déficit hídrico, promueve una mayor tolerancia a este tipo de estrés (Luna-Flores et al., 2012), lo cual pudiera estar relacionado a la capacidad de sobrevivencia de los materiales genéticos que se mantuvieron en crecimiento y desarrollo ante condiciones de las temperaturas extremas registradas en el área de estudio, si se considera que la mayor parte de estos materiales proviene de regiones de clima templado. Esta tolerancia depende en gran medida de las características propias de la especie, relacionadas a la capacidad de optimización de los procesos de asimilación de carbono y moderados niveles de transpiración (Medrano et al., 2007). Reportes del IICA (2010) indican que *L. corniculatus* L. presentó los valores más altos de conductancia estomática y los potenciales hídricos mayores ante condiciones de estrés hídrico, lo cual sugiere que esta especie incrementa su EUA ante condiciones de déficit hídrico, sin diferencia significativa entre accesiones y variedades.

Cuadro 3. Crecimiento y desarrollo de diferentes accesiones y variedades de *L. corniculatus* L. bajo riego óptimo y subóptimo.

Accesión/ Variedad	Longitud de tallos (cm)		Cobertura vegetal (cm ²)		PBFA (g planta ⁻¹)		EUA (mmolCO ₂ mmol H ₂ O ⁻¹)	
	COHS	CSHS	COHS	CSHS	COHS	CSHS	COHS	CSHS
255301	20.5 a	21.6ab	1299.7 b	1252.8 ab	605.8 ab	410.6b	3.9 a	4.3 a
255305	22.0 a	19.5 b	1661.2 a	1244.3 ab	740.1 a	497.6ab	3.6 a	4.1 a
202700	21.8 a	23.0 a	1530.0 ab	1649.0 a	571.3 b	583.7 a	3.7 a	4.7 a
226792	20.3 a	19.1 b	1249.0 b	1121.5 b	554.7 b	497.7ab	4.1 a	4.2 a
Est. Gan.	21.2 a	19.7 b	1334.1 ab	1117.1 b	640.4 ab	486.5ab	3.7 a	4.2 a
Promedio	21.2	20.6	1414.8	1326.0	622.2	495.2	3.8	4.5

Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales. A/V, es accesiones/variedad; PBFA es producción de biomasa fresca acumulada; COHS, es contenido óptimo de humedad del suelo (26 % $\pm$ 1.5), CSHS, es contenido subóptimo de humedad del suelo (22 % $\pm$ 1.5); EUA, es eficiencia en el uso del agua, referido al cociente entre la asimilación de CO₂ ($\mu\text{mol s}^{-1} \text{ m}^{-2}$) y agua transpirada ($\text{mol s}^{-1} \text{ m}^{-2}$).

Dinámica temporal de crecimiento de la planta. La longitud de los tallos en las plantas registró un comportamiento dinámico a través de las épocas estacionales del año. Los valores más altos correspondieron a los periodos de V-O, donde se observaron valores de 25.7 cm para el CSHS y 29.1 cm para el COHS. Estos resultados coinciden con los reportados por García-Bonilla et al. (2014) al evaluar los 10 materiales genéticos de este estudio de *L. corniculatus* L. pero en condiciones de clima templado, donde los valores más altos de la altura de planta se registraron en periodos con temperaturas superiores a 30 °C y menores a 14°C. Estos autores también señalan que la temperatura óptima de crecimiento de *Lotus* es de 22 °C, que corresponden a temperaturas promedio que se presentan en la mayor parte del año en la región del presente estudio. Sin

embargo, en esta zona se presentan temperaturas extremas que no ocurren en las zonas con clima templado.

La cobertura vegetal al día del corte en el periodo V-O, observó un comportamiento muy similar en ambos contenidos de humedad, con valores de 2,363.2 cm² y 2,300.7 cm² para COHS y CSHS, respectivamente. Los valores más bajos de esta variable se presentaron en los periodos de P-V (443.2 y 396.2 cm²) e I (992.8 y 960.6 cm²) en ambos contenidos de humedad, respectivamente; el comportamiento en la estación invernal se relaciona a la respuesta general de las plantas expuestas a bajas temperaturas, que tienden a disminuir su crecimiento y productividad con una actividad metabólica mínima a nivel solo de sobrevivencia (Arias, 2015). Las bajas temperaturas y una condición de déficit hídrico como fue en CSHS, se asociaron para una respuesta de baja actividad de desarrollo y crecimiento de la planta (Engelbrecht, 2001), provocando la reducción de altura de planta, raíces, área foliar y producción de biomasa (Farooqi et al., 1994).

En consecuencia, en términos de PBFA en CSHS en los periodos de V-O y P fueron los más productivos y el de invierno el de más baja productividad, sin embargo, en I-P y P se presentó a una producción similar en ambas condiciones de humedad. La EUA también presentó una dinámica temporal, correspondiente a O e I como las estaciones del año que presentaron los valores más altos en ambos contenidos de humedad del suelo (Figura 4). Lo anterior sugiere que la planta posee tolerancia al estrés hídrico y que los mecanismos de respuesta de EUA también se expresan en condiciones de bajas temperaturas (IICA, 2010).

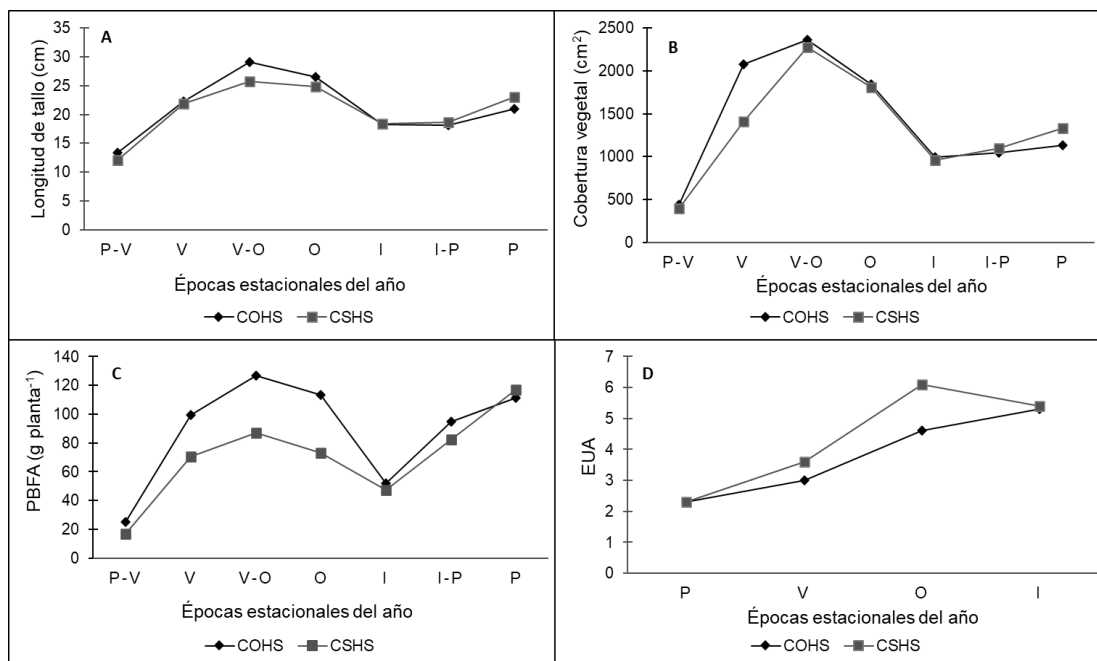


Figura 4. Dinámica temporal de la longitud de tallo (A), cobertura vegetal (B), producción de biomasa fresca acumulada (PBFA) (C) y, Eficiencia en el uso del agua (EUA) (D) de *L. corniculatus* L. en diferentes épocas estacionales del año en contenido óptimo (COHS) y subóptimo (CSHS) de humedad del suelo, durante el período de abril de 2021 a mayo de 2022, Bermejillo, Dgo.

Componentes del rendimiento. El aporte de los componentes al rendimiento del forraje de los materiales genéticos evaluados fue variable según la época estacional del año, pero similar entre ellos en ambos contenidos de humedad del suelo (COHS y CSHS). El rango del aporte de la hoja fue de 50 a 80 %, el de tallo de 15 a 40% y de tallos secos de 1-10 %. Para el caso de las inflorescencias se tuvieron porcentajes del 0.5-4 %, pero solo en el 202700 y EG en los periodos de P-V en el COHS y en V en ambos contenidos de humedad, respectivamente. El periodo de invierno fue el de menor aportación de la hoja al rendimiento con un rango del 46 al 60%, a excepción de la accesión 226792, el cual mantuvo un aporte del 60 y 70 % en el COHS y CSHO, respectivamente (Figura 5), lo que sugiere que este último material genético es el de mayor tolerancia al frío al mantener una adecuada actividad fotosintética y metabólica, independientemente del contenido de humedad del suelo (26 % y 22 %).

Las accesiones 255301 y 226792 presentaron los valores más altos de aporte de hoja con un 60-80 %, de tallos 15-25 % y de tallos secos del 0-5 % al día del

corte; la accesión 202700 fue la que presentó los valores más bajos en esta variable con valores del 45-55 %, de tallos 20-45 %, de tallos secos 0-30 % e inflorescencias de 0-4 % (Figura 5). Los porcentajes obtenidos coinciden con los reportados por Álvarez et al. (2018b) en la evaluación productiva de la accesión 202700, en la cual el componente hoja representó del 53 % en el rendimiento anual, seguido del tallo con 32 %, material muerto del 8 % y maleza 7 %; que también fueron similares a lo reportado por los mismos autores en otro estudio, donde la hoja aportó el 56 %, tallos el 30.5 %, material muerto 8.5 % y malezas 4.5 % (Álvarez-Vázquez et al., 2018a). En el caso del presente estudio, la presencia de material muerto fue mayor en los periodos de invierno, I-P y P.

Estos resultados indican efectos estacionales sobre el crecimiento del forraje y la variación de sus componentes, principalmente de la hoja, influenciada por las condiciones ambientales como la variación de la temperatura, más que el contenido de humedad en el suelo, lo cual coincide con Festo et al. (2003) quienes reportaron que las hojas incrementan su aparición cuando hay temperaturas de entre 20 y 35.2 °C, pero disminuyen cuando superan los 35 °C. Adicionalmente, García-Bonilla et al. (2014) encontraron que *L. corniculatus* L. tiene un mínimo crecimiento en temperaturas cercanas a los 0 °C.

La importancia de la producción de hoja en forrajes mayor al 50 % radica en que son la parte más nutritiva y digestible de las plantas forrajeras, y su calidad disminuye según aumenta su grado de madurez (Díaz y Callejo, 2004). En el caso *L. corniculatus* L. García-Bonilla et al. (2014) reportaron un contenido de 18.89 a 22.68 % de proteína cruda en hoja. En este estudio, también se observó una importante aportación de tallos secos de hasta el 10 % al día del corte en los periodos de invierno y primavera, lo cual podría afectar la calidad del forraje, ya que la edad de la planta es un factor determinante en la distribución de la materia seca en sus tejidos; con el aumento de la edad de la planta, se incrementa la proporción de tallos y material senescente, disminuyendo la formación de hojas (Tafolla-Arellano et al., 2013). Por lo tanto, se sugiere que en *L. corniculatus* L.

se reduzcan los periodos entre cortes a menos de 45 días en verano y otoño y menos de 90 días en invierno.

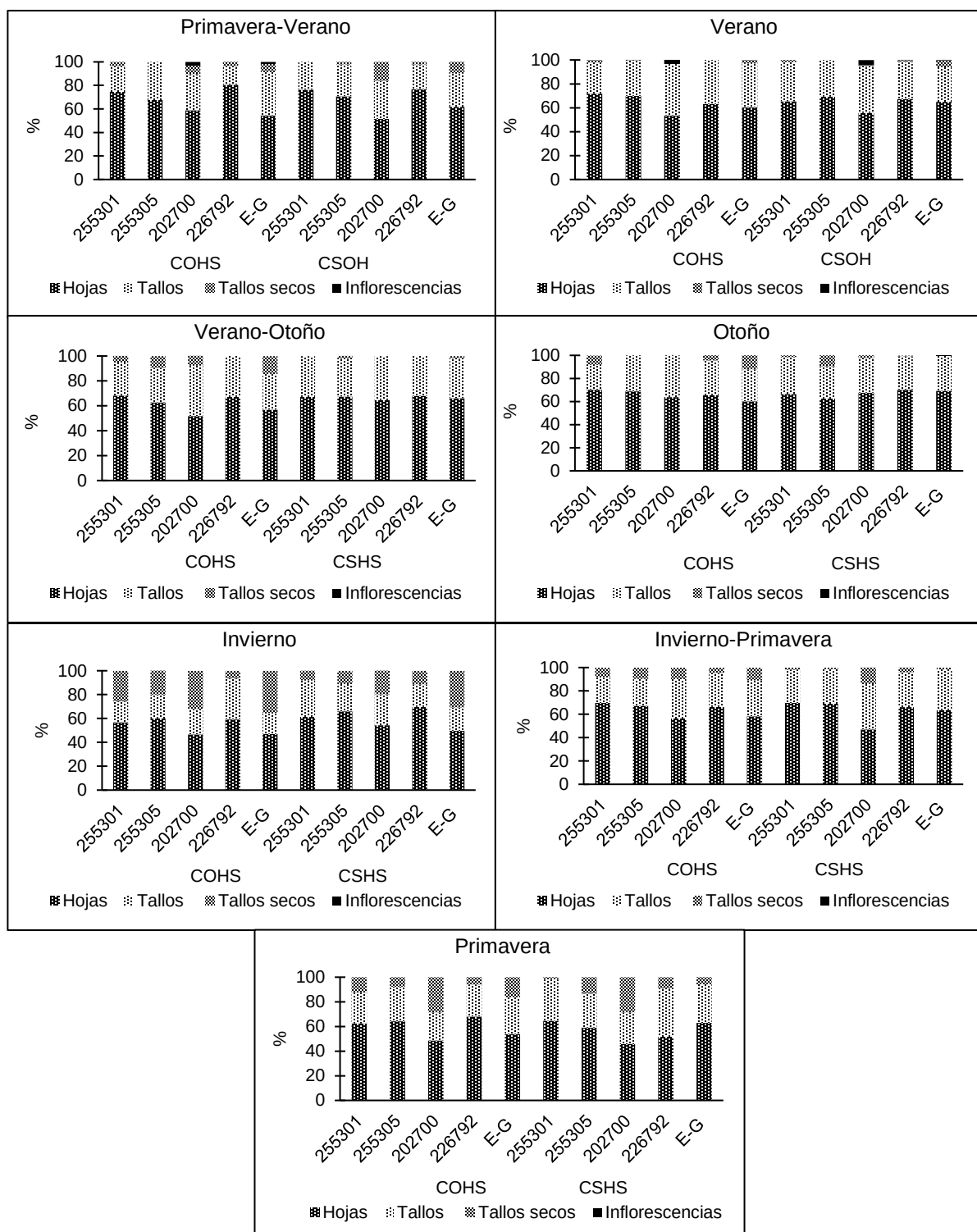


Figura 5. Composición morfológica de diferentes materiales genéticos de *L. corniculatus* L. según la época estacional del año en condiciones óptimas (COHS) y subóptimas (CSHS) de riego.

2.5 CONCLUSIÓN

De diez materiales genéticos de *L. corniculatus* evaluados, solo cinco sobrevivieron durante el período de evaluación, correspondientes a las accesiones 255301, 255305, 202700 y 226792 y la variedad EG, con una mejor longitud de tallo en 202700 y 255301 bajo condiciones óptimas (COHS) y subóptimas (CSHS) de humedad del suelo, respectivamente; en tanto que la mayor cobertura vegetal fue en las accesiones 202700 y 255305 en CSHS (1649.0 cm²) y COHS (1661.2 cm²), respectivamente. En consecuencia, estas mismas accesiones fueron las de mejor respuesta en producción de biomasa fresca, teniendo como principal componente de rendimiento a la hoja. El verano y otoño fueron las mejores épocas estacionales en la producción de biomasa fresca; la accesión 226792, mostró un regular comportamiento de producción en la estación de invierno. La accesión 202700 es la mejor opción en condiciones de déficit hídrico, pero habrá que validar esta información en condiciones de campo.

2.6 LITERATURA CITADA

- Álvarez-Vázquez, P., García de los Santos, G., Guerrero-Rodríguez, J., Mendoza-Pedroza, S. I., Ortega-Cerilla, M. y Hernández-Garay A. (2018a). Productive performance of *Lotus corniculatus* L. dependent on harvest strategy. *Agrociencia* 52(8), 1081-1093. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952018000801081&script=sci_arttext&tlng=en
- Álvarez-Vázquez, P. Hernández-Garay, A., García de los Santos, G., Guerrero-Rodríguez, J. D., Mendoza-Pedroza, S. I., Ortega-Cerilla, M. E., Rojas-García, A. R. y Wilson-García, C. Y. (2018b). Potencial Forrajero de *Lotus corniculatus* L. con diferentes estrategias de manejo. *Agroproductividad* 11(5), 24-28. http://ri.uagro.mx/bitstream/handle/uagro/2575/ART_18146_18_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Arias, N. S. (2015). *Respuestas morfo-fisiológicas a bajas temperaturas y disponibilidad de agua en variedades de Olea europaea L.* [Tesis doctoral]. Universidad Nacional del Comahue. <http://doi.org/10.13140/RG.2.1.4248.8803>

- Azpilcueta-Pérez, M.E., Pedroza-Sandoval, A., Trejo-Calzada, R., Sánchez-Cohen, I. y Jacobo-Salcedo, Ma. Del R. 2018. Chemical residuality in maize (*Zea mays* L.) fields irrigated with deep well water. *Revista Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 5(13): 111-117. DOI: <https://doi.org/10.19136/era.a5n13.1311>
- Bacarrillo-López, R., Pedroza-Sandoval, A., Inzunza-Ibarra, M. A., Flores-Hernández, A. y Macías-Rodríguez, F. J. (2021). Productividad de forraje de variedades de nopal (*Opuntia* spp.) bajo diferentes regímenes de humedad del suelo. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 8(3): 1-10. <http://doi.org/10.19136/era.a8n3.2878>
- Barry, T. N., Kemp, P. D., Ramírez Restrepo, C. A. y López Villalobos, N. (2003). Sheep production and agronomic performance of *Lotus corniculatus* under dryland farming. *Research and Practice Series* 11, 109-115. <https://doi.org/10.33584/rps.11.2003.3003>
- Díaz B., V. y Callejo R., A. (2004). Calidad del forraje y del heno. *Conservación de Forrajes* 120, 55-64. https://oa.upm.es/34352/1/INVE_MEM_2004_186668.pdf
- Engelbrecht, B. M. J. (2001). Drought resistance in seedlings of 28 tropical woody plant species. In *Euro-Workshop: Functional Groupings of Tropical Trees*. Netherlands.
- Farooqi, A. H. A., Shukla, Y. N., Sharma, S. y Bansal, R. P. (1994). Relationship between gibberellin and cytokinin activity and flowering in *Rosa damascena* Mill. *Plant Growth Regulat* 14, 109-113. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00025210>
- Festo, J. M., Sabed, N. A. y Jeremy, A. R. (2003). The impact of temperature on leaf appearance in bamba groundnut landraces. *Crop Science* 43 (4), 1375-1379. <http://doi.org/10.2135/cropsci2003.1375>
- García-Bonilla, D. V., Guerrero Rodríguez, J. D., García de los Santos, G. y Lagunes Rivera, S. (2014). Rendimiento y calidad de forraje de genotipos *Lotus corniculatus* L., en el Estado de México. *Nova Scientia* 7(13), 170-189. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S200707052015000100010&script=sci_arttext
- Guillen, R. y Widdup, K. (2008). Program of improvement in *Lotus corniculatus* L.: Base Germplasm characterization. *Lotus Newsletter* 38(2), 66-68. <http://www.inia.org.uy/sitios/lnl/vol382/guillen1.pdf>
- IICA (2010). LOTASSA: Un puente entre la genómica y las pasturas del siglo XXI. Uruguay: PROCISUR.

- Ixtaina V.Y. y Mujica M.M. 2010. Seedling vigor response of *Lotus tenuis* populations to contrasting variations of water and nutrient availability, *Agrociencia* 44(1), 31 – 41. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S140531952010000100003&script=sci_abstract&tlng=en
- Luna-Flores, W., Estrada-Medina, H., Jiménez-Osornio, J. J. M., y Pinzón-López, L. L. 2012. Efecto del estrés hídrico sobre el crecimiento y eficiencia del uso del agua en plántulas de tres especies arbóreas caducifolias. *Terra Latinoamericana*. 30(4), 343-353. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792012000400343&lng=es&tlng=es.
- Marley, C., L., R. Fychan, y R. Jones. 2006. Yield, persistency and chemical composition of *Lotus* species and varieties (birdsfoot trefoil and greater birdsfoot trefoil) when harvested for silage in the UK. *Grass Forage Science* 61(2), 134-145. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2006.00516.x>
- Martin M. L., Rivera A. J. y Castizo R. R. 2018. Cambio climático y desarrollo sustentable. Informe La Rábida, Huelva. 2018 p. <https://www.fundacioncarolina.es>
- Mazuela A., P. C. (2013). Agricultura en zonas áridas y semiáridas. *Revista de Agricultura en Zonas Áridas* 31(2), 3-4. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-34292013000200001&script=sci_arttext
- Medina G., G., G. Díaz P., J. López H., J. A., Ruíz, C. y Marín M. S. (2005). *Estadísticas climatológicas básicas del estado de Durango (Periodo 1961 – 2003)*. Libro Técnico No. 1. Campo Experimental Valle del Guadiana, CIRNOC-INIFAP.
- Medrano H., Bota, J., Cifre, J., Flexas, J., Ribas-Carbó, M. y Gulías, J. (2007). Eficiencia del uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas* 43, 63-84. <https://www.redalyc.org/pdf/176/17604304.pdf>
- Neri, G. M. C. y Ortega, M. A. (2019). Cultivos alternativos como un mecanismo para el desarrollo de zonas áridas: El caso de jojoba en el Altiplano Potosino. *Revista Internacional de estadística y geografía* 10 (1), 44-63. <https://biblat.unam.mx/es/revista/realidad-datos-y-espacio-revista-internacional-de-estadistica-y-geografia/articulo/cultivos-alternativos-como-un-mecanismo-para-el-desarrollo-de-zonas-aridas-el-caso-de-la-jojoba-en-el-altiplano-potosino>
- Pedroza-Sandoval, A., Sifuentes-Rodríguez, N. S., Trejo-Calzada, R., Zegbe-Domínguez, J. A., Minjares-Fuentes, R., Samaniego-Gaxiola, J. A. (2022). Leaf production and gel quality of *Aloe vera* (L.) Burm. F. under irrigation

- regimens in northern Mexico. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*. 24, 139-149. <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.2.181>
- Ramírez, B. B. A., González, E. A., Salas G. J. M. y García S. J. A. (2019). Tarifas eficientes para el agua de uso agrícola en la Comarca Lagunera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10(3), 539-550. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i3.1295>
- Richards, L. A. (1948). Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. *Soil Science*, 66(2). <https://doi.org/10.1097/00010694-194808000>
- SAS, Institute. 2009. SAS/STAT® 9.2. *Use's Guide Release*. Cary, NC: SAS Institute Inc. USA.
- Tafolla-Arellano, Julio C., González-León, Alberto, Tiznado-Hernández, Martín E., Zacarías García, Lorenzo y Báez-Sañudo, Reginaldo. (2013). Composición, fisiología y biosíntesis de la cutícula en plantas. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 36(1), 3-12. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802013000100001&lng=es&tlng=es.
- Tyree, M. T., B. M. Engelbrecht, G. Vargas y T. A. Kursar. 2003. Desiccation tolerance of five tropical seedlings in Panama: Relationship to a field assessment of drought performance. *Plant Physiol*. 132(3), 1439-1447. <https://doi.org/10.1104/pp.102.018937>
- Ventura, R. J., Hernández, M. E., Santiago, O. M. A., Wilson, G. C. Y., Maldonado, P. Ma. De los A. y Rojas, G. A. R. 2020. Rendimiento de trébol blanco asociado con pasto ovillo a diferentes frecuencias de pastoreo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 11(SPE24), 1-12. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i24.2353>
- Voisin, A. S., Guéguen, J., Huyghe, C., Jeuffroy, M. H., Magrini, M. B., Meynard, J. M., Mougél, C., Pellerin, S. y Pelzer, E. (2014). Legumes for feed, food, biomaterials and bioenergy in Europe: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 361-380. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-013-0189-y>

CAPÍTULO III

Indicadores de productividad de *Lotus corniculatus* L. en respuesta al déficit hídrico en el Norte de México

3.1 RESUMEN

El objetivo de este estudio fue evaluar la productividad de cuatro accesiones y una variedad del trébol *L. corniculatus* L. con potencial forrajero en el Norte de México con respecto a indicadores productivos: Índice de Área Foliar (IAF), Materia Seca Acumulada (MS), Tasa de Crecimiento promedio del forraje (TC) y la relación hoja-tallo, en condiciones de malla sombra. Se usó un diseño experimental de bloques al azar con tres repeticiones en parcelas divididas. Las parcelas grandes fueron los contenidos de humedad en el suelo: óptimo (COHS: 26 %±1.5) y subóptimo (CSHS: 22 %±1.5); las parcelas chicas fueron las accesiones y variedad del trébol identificadas con el código/nombre: 255301, 255305, 202700, 226792 y Estanduela Ganador (EG). Si hubo diferencia en el comportamiento productivo de las accesiones evaluadas por contenido de humedad donde la 255305 sobresalió en el COHS con una IAF de 4.7, una MS acumulada de 131.8 g planta⁻¹ y una TC de 0.43 g MS planta⁻¹ d⁻¹, en tanto, en el CSHS lo fue la accesión 202700 con un IAF de 3.2, una MS acumulada de 94.9 g planta⁻¹ y una TC de 0.30 g MS planta⁻¹ d⁻¹, en cuanto a la relación hoja-tallo las accesiones 255301 y 226792 tuvieron las medias más altas. El comportamiento productivo de los periodos de corte fue dinámico, siendo el de verano y otoño los más productivos y el de invierno el menor en ambos contenidos de humedad. Sólo en el caso de la relación hoja-tallo los valores más altos se registraron en invierno. Tales resultados sugieren un desarrollo óptimo del forraje evaluado en condiciones subóptimas de humedad edáfica servirán de referencia para evaluaciones futuras en condiciones de campo.

Palabras clave: productividad, contenido de humedad, trébol forrajero.

3.2 INTRODUCCIÓN

En México el 76 % del volumen de agua está destinado a las actividades agrícolas y pecuarias (CONAGUA, 2018), pero estas no siempre se realizan de manera adecuada ya que se han establecido cultivos con altos requerimientos hídricos en zonas con poca disponibilidad del recurso como en las regiones áridas y semiáridas, donde las sequías han producido pérdidas económicas considerables en la producción al exponerse diversas comunidades vegetales a periodos extensos de déficit hídrico, que son la principal causa de bajos

rendimientos de los cultivos económicamente importantes y en el deterioro de las tierras destinadas para pastoreo (Castillo, 2012).

En el norte del país, la región de la Comarca Lagunera conformada por municipios de Durango y Coahuila persisten problemas referentes a la escasez de agua y la sobreexplotación de los mantos acuíferos (CONAGUA, 2018) al establecerse cultivos como la alfalfa y maíz para cubrir la demanda de forrajes del sector ganadero, ya que son cultivos de baja densidad económica y precio pero que requieren de volúmenes considerables de agua para su producción (García et al., 2014; Reta et al., 2013).

En la búsqueda de cultivos alternativos que tengan un menor requerimiento hídrico se ha evaluado la productividad de cultivos con potencial forrajero como la canola (*Brassica napus* L.) y chícharo (*Pisum sativum* L.) en el ciclo otoño-invierno y soya (*Glycine max* L.) en primavera verano, con un buen rendimiento, y productividad del agua, pero con menor calidad de forraje comparada con la de alfalfa (*Medicago sativa* L.) (Reta et al., 2017), tal característica implica continuar con la búsqueda de cultivos que ofrezcan una mejor calidad de forraje y también un menor consumo de agua.

Entre una gran variedad cultivos alternativos de leguminosas forrajeras con potencial de desarrollo destacan diferentes especies de *Lotus*, principalmente *L. corniculatus* L., empleada para mejorar el rendimiento de los pastizales en países con veranos secos y marcada estacionalidad como Nueva Zelanda, Uruguay y Chile donde se ha caracterizado como una especie tolerante y productiva en tiempos de sequía (PROCISUR, 2010; Barry et al., 2003) al expresar diferentes adaptaciones agronómicas, respecto a otras leguminosas, como tolerancia a la sequía, bajas temperaturas, inundación, suelos ácidos y con altos niveles de Al y Mn (Guillen y Widdup, 2008)

El alto rendimiento de *L. corniculatus* varia de entre los 4,799 y 13,300 kg de MS ha⁻¹ con una y calidad nutricional de 18.9% y 21.8 % de proteína cruda base seca, característica similares o superiores a la alfalfa y al trébol blanco (*Trifolium repens* L.) (García et al., 2014). Además, su concentración de taninos condensados no produce timpanismo en rumiantes de pastoreo y protegen la degradación de

proteínas en el rumen (MacAdam, 2013). Sin embargo, entre las desventajas que presenta está su lento establecimiento inicial como cultivo y poca tolerancia a aprovechamientos intensos y cosechas frecuentes, afectando en su persistencia (Ixtaina y Mujica, 2010; Maroso et al., 2007).

Una de las propiedades de esta forrajera perenne es su capacidad para reiniciar un nuevo crecimiento después del corte o pastoreo realizado y rebrote que depende de factores ambientales, morfofisiológico que afectan su la tasa de crecimiento del forraje (Brougham, 1956), tales factores son importantes de identificar y evaluar para tener un acercamiento en cuanto al comportamiento productivo de los forrajes en regiones agroecológicas en la cuales varían la temperatura, humedad, le fertilidad del suelo, la luz y el manejo (Difante et al., 2009).

En la actualidad se estudian diferentes técnicas para el manejo de esta especie que permita superar algunas desventajas ambientes determinados como las zonas áridas, donde la deficiencia de agua, las temperaturas extremas y suelos de baja fertilidad son característicos (Manzuela, 2013). El objetivo de este estudio fue evaluar, mediante diferentes indicadores agronómicos la productividad de materiales genéticos de *L. corniculatus* L. bajo condiciones óptimas y subóptimas de humedad del suelo en condiciones de malla sombra en el Norte de México.

3.3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.3.1 Ubicación geográfica del área de estudio

El experimento se llevó a cabo en la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo, en Bermejillo, Durango, México, ubicado en las coordenadas geográficas 25.8° LN y 103.6° LW a 1,130 m. El área corresponde a un clima seco desértico, con lluvias en verano e invierno fresco, la precipitación pluvial media anual es 258 mm y la evaporación potencial media anual de 2,000 mm; temperatura media anual de 21 °C, máxima de 33.7 °C y mínima de 7.5 °C (Medina et al., 2005).

3.3.2 Diseño y conducción experimental

Se usó un diseño experimental de bloques al azar en parcelas divididas, con tres repeticiones. Las parcelas grandes fueron dos contenidos de humedad en el

suelo: óptimo (26 % ± 1.5) y subóptimo (22 % ± 1.5) establecidos con base a la curva de abatimiento de humedad (Figura 6) determinada con el método de la olla de membrana de establecido por Richard (1948).

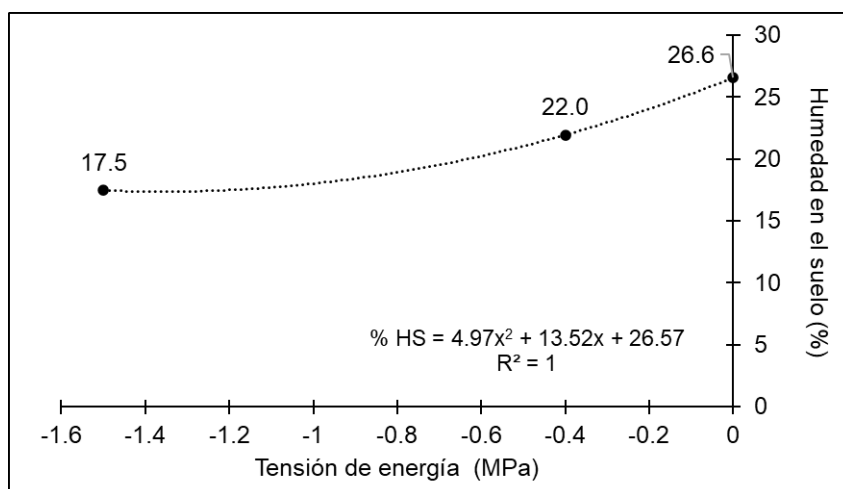


Figura 6. Curva de abatimiento de humedad de la mezcla de suelo utilizada para las accesiones y variedades de *L. corniculatus* L. Donde: %HS= Porcentaje de humedad del suelo; x, es la tensión energía negativa en MPa, considerando que CC y PMP correspondieron a una tensión de energía de 0 y -1.5 MPa, respectivamente.

Con base en lo anterior se calculó que la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) correspondieron a 26.5 % y 17.5 %, respectivamente; las parcelas chicas se constituyeron con las diez accesiones y variedades de *Lotus corniculatus* L. proporcionados por el Colegio de Posgraduados Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México (Cuadro 4).

La unidad experimental fue una planta por maceta, ésta última de plástico rígido de 20 Kg de capacidad. A cada maceta se le agregaron 18 Kg de una mezcla de sustrato en una proporción 50:30:20 correspondiente a suelo:composta:arena, respectivamente. Las características del sustrato corresponden a una textura franco-arenosa en proporción de 52:22:26 % de arena, arcilla y limo, respectivamente, con un pH de 8.69, CE de 10.76 dS m⁻¹ y densidad aparente de 1.46 g cm⁻³. Previo al trasplante, cada accesión/variedad se desarrolló en una bolsa de plástico negro de 1 Kg de capacidad durante 90 días y una vez trasplantada en la maceta se tuvo un periodo de adaptación de 62 días después de establecido el experimento (DDEE) con riego constante a CC, procediendo a

dar un corte de estandarización del follaje. Dentro de la malla sombra se colocó un termómetro higrómetro digital marca ORIA que tomó registro de la temperatura (máxima y mínima) y de la humedad relativa durante el periodo de evaluación. El experimento se estableció en condiciones de malla sombra de marzo 2021 a mayo de 2022.

Cuadro 4. Relación de accesiones y variedades de *Lotus corniculatus* L. usados en el experimento con la identificación correspondiente.

Núm.	Código/Nombre de las accesiones/variedades	Lugar de procedencia	Hábito de crecimiento
2	255301	Francia	Semi erecto
5	255305	Italia	Semi erecto
6	202700	Uruguay	Erecto
7	226792	Canadá	Semi erecto
9	Estanzuela Ganador	Uruguay	Erecto

El riego se realizó cada cuatro días y los contenidos de humedad del suelo se midieron por gravimetría, para lo cual, el peso de las macetas en el COHS se mantuvo en 23.9 Kg, en tanto que, el CSHS correspondió a un peso de 23.0 kg agregando un promedio de 0.6 L de agua por riego en ambos contenidos de humedad, con lo cual se restablecía el COHS a 27.5 % (ligeramente superior a CC) y CSHS a 23.5 %, como límites superiores de humedad del suelo, dejando disminuir ambos valores a 24.5 % y 20.5 %, respectivamente. Se tuvo un margen de 3.5 % (20.5 – 17.5) como rango de humedad aprovechable para que la planta no llegara a PMP.

Pasado el periodo de adaptación se realizó un corte de follaje de homogenización a las unidades experimentales, iniciando las mediciones en el mes de abril del 2021. Se realizaron en total 7 cortes, el primero en julio del 2021 y el último en mayo del 2022. Para la realización de los cortes se consideraron periodos de crecimiento según las estaciones del año y periodos intermedios: primavera-

verano (P-V), verano (V), verano-otoño (V-O), otoño (O), invierno (I), invierno-primavera (I-P) y primavera (P). El intervalo de tiempo entre cortes fue de 45 días, a excepción del periodo de I, el cual se prolongó a 90 días debido al lento crecimiento de la planta por las bajas temperaturas.

3.3.3 Variables evaluadas

3.3.3.1 Índice de Área Foliar

Se cosecharon 10 tallos completos por planta, a los cuales se les retiró la hoja y se colocaron sobre una hoja blanca etiquetada con la repetición correspondiente, sobre la cual también se colocó una regla graduada para su función como escala. Se tomaron fotografías y procesaron con el programa ImageJ para determinar el área foliar de cada accesión y variedad, y con la ecuación 1 se estimó el Índice de Área Foliar, descrita por Reis et al. (2013) y adecuada a las condiciones del experimento.

$$IAF = \frac{AF*NT}{AT} \quad (1)$$

Donde:

AF= Área foliar de un tallo (cm²)

NT=Número de tallos

AT= Área total de superficie del suelo en cm² (área de la maceta= 962.11 cm²)

3.3.3.2 Producción de materia seca

El forraje cosechado se secó en una estufa de aire forzado marca HAFO® (modelo 1600, USA) a 60° C por 24 horas para estimar la cantidad de materia seca por maceta de los diferentes materiales genéticos en las condiciones de humedad establecidas. Las muestras se pesaron en una balanza analítica y estimaron los rendimientos de materia seca (MS) por planta.

3.3.3.3 Tasa de crecimiento promedio del forraje

La tasa de crecimiento promedio se calculó al dividir la cantidad de forraje cosechado en cada corte por planta entre el tiempo de crecimiento transcurrido, la fórmula utilizada fue:

$$TC = \frac{\text{Cantidad de Forraje (gr MS planta}^{-1}\text{)}}{\text{Días de crecimiento transcurridos}} \quad (2)$$

TC= Tasa de crecimiento promedio (g MS planta⁻¹ d⁻¹)

3.3.3.4 Relación hoja-tallo

De una submuestra representativa de 10 tallos de cada repetición se separaron los componentes hoja y tallo, se pesaron en verde y después se llevaron por separado a una estufa de aire forzado Marca HAFO® (modelo 1600, USA) a 60° C por 24 horas. Posteriormente se calculó la relación hoja-tallo dividiendo el peso seco de la hoja (g MS) entre el peso seco de los tallos (g MS).

3.3.4 Análisis estadístico

La base de datos se procesó con uso del Software Statistical Analysis System (SAS, 2009) versión 9.0 con el cual se realizó un análisis de varianza y prueba de rango múltiple de medias Tukey ($P \leq 0.05$) para identificar el efecto de tratamiento. Adicionalmente se utilizó el Programa Excel versión 6.0 para análisis de regresión.

3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Datos climáticos. De acuerdo con el reporte de temperaturas, se identificó una media máxima de 30 °C y promedio de mínimas de 20 °C con máxima de 46.9 °C y mínima de -4.6 °C en la malla sombra donde se estableció el experimento. La humedad relativa media registrada osciló entre 44 y 73 %, con mínima entre 5-10 % en los meses de mayo a julio, y máxima de 100% en los periodos de lluvia distribuidos en los meses de julio, agosto y septiembre, ambas variables durante el período de abril de 2021 a mayo de 2022. Lo anterior indica que, aun cuando

el experimento fue en condiciones de malla sombra, se registraron valores extremos, en términos de temperaturas y humedad relativa.

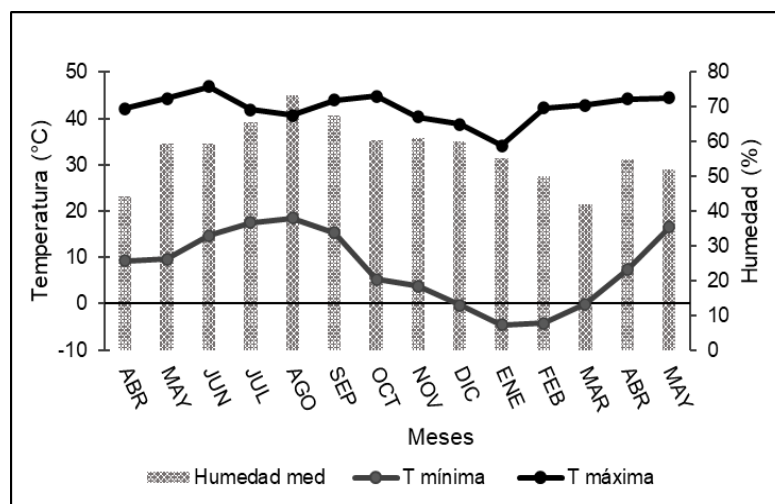


Figura 7. Temperatura media, máxima, mínima y humedad relativa mensual registradas en malla sombra con accesiones y variedades de *L. corniculatus* L. de abril 2021 a mayo 2022, Bermejillo, Dgo.

Índice de Área Foliar. El IAF de las plantas de las accesiones y variedad de *L. corniculatus* L. presentó diferencias ($P \leq 0.05$) en los contenidos de humedad, en donde la accesión 255305 sobresalió en el COHS con 4.7 y el Estanduela Ganador en el CSHS con 3.9 (Cuadro 5), tal indicador se traduce en que las plantas tuvieron un mayor potencial de captación de radiación solar. Warnock et al. (2006) indica que el AF alcanzada por una planta durante su desarrollo define la capacidad de la cubierta vegetal para interceptar la radiación fotosintéticamente activa, fuente primaria para el adecuado desarrollo de tejidos. Como se percibe el IAF se vio afectado por la condición subóptima de humedad al que se sometieron las plantas al presentar una menor cubierta los ejemplares sometidos a condiciones subóptimas de humedad, sin embargo, conocer el comportamiento de diferentes variedades, cultivares o genotipos es necesario ya que pueden exhibir variaciones significativas en su capacidad para interceptar la radiación solar, en este caso, no se encontraron valores previos de este indicador para los materiales genéticos evaluados.

Producción de materia seca. En la producción de MS hubo una diferencia significativa ($P \leq 0.05$) entre los materiales genéticos en el COHS en donde el 255305 tuvo la mayor producción con una MS acumulada de $131.8 \text{ g planta}^{-1}$, el resto de los materiales tuvieron un comportamiento similar entre ellos (Cuadro 5). En tanto, en el CSHS no hubo diferencia entre las accesiones y variedad evaluadas, teniendo como promedio una producción de MS acumulada de 82.4 planta^{-1} . Estos datos difieren de los obtenidos por García et al. (2014) donde la accesión 202700 y la variedad Estanzuela Ganador fueron los más productivos de 12 materiales evaluados, pero en un clima templado subhúmedo y en condiciones de campo.

Tasa de crecimiento del forraje. En cuanto a esta variable se obtuvo diferencia significativa ($P \leq 0.05$) entre las accesiones y variedad evaluadas en COHS la 255305 sobresalió con una tasa de $0.43 \text{ g MS planta}^{-1} \text{ d}^{-1}$, en tanto, en el CSHS no hubo diferencia entre el comportamiento de los materiales genéticos con una tasa promedio de crecimiento de $0.26 \text{ g MS planta}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (Cuadro 5). Tanto el rendimiento como la acumulación de biomasa de los diferentes cultivos se desarrollan de manera dinámica debido a la formación de nuevo tejido (Valentine y Matthew, 1999), el cual es influenciado por las condiciones ambientales y el manejo (Ramírez et al., 2009), en el caso de *L. corniculatus* L. presentó resistencia al estrés hídrico inducido, pero también al térmico.

Relación hoja-tallo. Se obtuvo diferencia significativa ($P \leq 0.05$) entre los materiales genéticos en los contenidos de humedad, donde la accesión 255301 sobresalió en el COHS con una relación de 2.9 y el 226792 en el CSHS con una relación de 2.5, les siguió el 255305 en ambos contenidos de humedad (Cuadro 5). Es deseable que este indicador sea el más alto posible ya que las hojas son el tejido más digestible del forraje y tienen un contenido de proteínas superior a los demás órganos de la planta, atribuyéndose un alto valor nutritivo (Lamb et al., 2007). Los resultados obtenidos de la relación hoja-tallo de las accesiones 255305, 202700 y 226792 en ambos contenidos de humedad son similares a los obtenidos por García et al. (2014) quienes reportan valores de 2.4, 1.7 y 2.3,

respectivamente. Los valores obtenidos de la 255301 y Estanzuela Ganador son más altos que los obtenidos por los autores antes mencionados, quienes reportaron una relación de 2.0 y 1.5 respecto a 2.9 y 1.9 obtenidos en el presente estudio en el COHS.

Cuadro 5. Indicadores de productividad de accesiones/variedad de *L. corniculatus* L. bajo riego óptimo y subóptimo

A/V	IAF		MS acumulada (g planta ⁻¹)		TC (g MS planta ⁻¹ d ⁻¹)		Hoja-Tallo	
	COHS	CSHS	COHS	CSHS	COHS	CSHS	COHS	CSHS
255301	4.1 ab	3.1 ab	98.8 b	74.5 a	0.32 b	0.24 a	2.9 a	2.2 ab
255305	4.7 a	3.3 ab	131.8 a	85.7 a	0.43 a	0.27 a	2.4 ab	2.3 ab
202700	3.0 b	3.6 ab	89.3 b	94.9 a	0.29 b	0.30 a	1.7 b	1.7 b
226792	2.7 b	2.6 b	79.5 b	79.3 a	0.25 b	0.26 a	2.5 ab	2.5 a
Est. Gan.	3.7 ab	3.9 a	90.7 b	78.4 a	0.28 b	0.24 a	1.9 b	2.2 ab
Promedio	3.6	3.3	98.0	82.4	0.32	0.26	2.3	2.2

Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales. A/V, es accesiones/variedad; COHS, es contenido óptimo de humedad del suelo ($26 \% \pm 1.5$), CSHS, es contenido subóptimo de humedad del suelo ($22 \% \pm 1.5$); IAF, es Índice de Área Foliar; MS, es materia seca acumulada; TC, es Tasa de crecimiento promedio del forraje.

Comportamiento estacional de indicadores productivos. El comportamiento de los materiales genéticos dentro los contenidos de humedad evaluados por periodo de corte fue dinámico relacionado a características propias de las estaciones. En el caso del IAF se observaron los datos más altos en el periodo de V-O, seguido del O e I-P en ambos contenidos de humedad, siendo el periodo

de P-V e I con el menor crecimiento, sin embargo, hubo diferencia entre las medias entre COHS y CSHS, siendo el primero el que tuvo mejor comportamiento (Figura 8). Los valores más altos en el IAF se pueden traducir en una mayor producción de biomasa (Escalante, 1999), tales datos coinciden con los obtenidos en relación con la producción de MS acumulada presentada en el Cuadro 5, donde las accesiones y variedad con valores más altos de IAF son los más productivos. Siendo el COHS el que tuvo los valores más altos en comparación al CSHS, a excepción del periodo de P. Los datos de productividad obtenidos coinciden con los de Álvarez et al. (2018) donde los mayores rendimientos medios estacionales se presentaron en P y los menores en O, sin embargo, no en el de V, en donde el presente estudio presentó los valores más altos en el COHS con una media de $21.2 \text{ g planta}^{-1}$, tal comportamiento se relaciona con la presencia de las temperaturas óptimas para el crecimiento de *L. corniculatus* L., García et al. (2014) señalan que es de 22°C en condiciones de campo.

A pesar de que hubo una disminución en la producción de forraje en el periodo de I e I-P, en primavera vuelve a aumentar la producción de MS, lo cual demuestra la resistencia de las plantas a bajas temperaturas (hasta -4°C) y su recuperación pasado el periodo de estrés térmico, Sbrissia et al. (2010) atribuyen estos cambios a las condiciones ambientales en cada estación del año, que en la región son mayores a 40°C , como las registradas dentro la malla sombra.

En el caso de *L. corniculatus* L. el conocimiento de la acumulación del forraje por día y su influencia estacional permitirá realizar estimaciones futuras sobre el rendimiento y la persistencia del forraje durante estos periodos a lo largo de un año y establecer diferentes estrategias de manejo y de aprovechamiento en condiciones de campo. En este caso, la mayor TC se obtuvo en el periodo de V-O y P en ambos contenidos de humedad, en donde el COHS presentó las media más alta con una TC de $0.53 \text{ g MS planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$, a excepción del periodo de P donde el CSHS tuvo el valor más alto con $0.40 \text{ g MS planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$. Por otro lado,

los valores más bajos de la TC se obtuvieron en el periodo de P-V y de I, siendo menores a $0.12 \text{ g MS planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$ (Figura 8).

La respuesta obtenida en la relación hoja-tallo fue la de menor variabilidad entre periodos de corte, en ella la respuesta fue similar entre los dos contenidos de humedad establecidos, solo se observó diferencia en P-V, donde la relación fue más alta en el COHS con 2.8 y en el CSHS de 2.6, seguido del periodo de I y de P. Este comportamiento es similar con el observado por Álvarez et al. (2018) con los valores más altos de la relación hoja-tallo en I y O, seguidos de V y P, con valores de 2.4, 2.7, 2.1 y 2.0, respectivamente. Este indicador permite realizar comparaciones entre diferentes especies para un mismo estado fenológico que permite implementar una secuenciación de uso y aprovechamiento del forraje para obtener el mejor nivel nutricional, ya que la cantidad de hojas está relacionada con la calidad nutritiva del forraje (Araya y Boschini, 2005). Sin embargo, actividades de aprovechamiento como el pastoreo o el corte son un aspecto condicionante de la relación hoja-tallo, por lo que, a mayor intensidad, menor será la proporción de hojas secas con relación a los tallos (Beltrán et al., 2005 y Cruz Hernández et al., 2011).

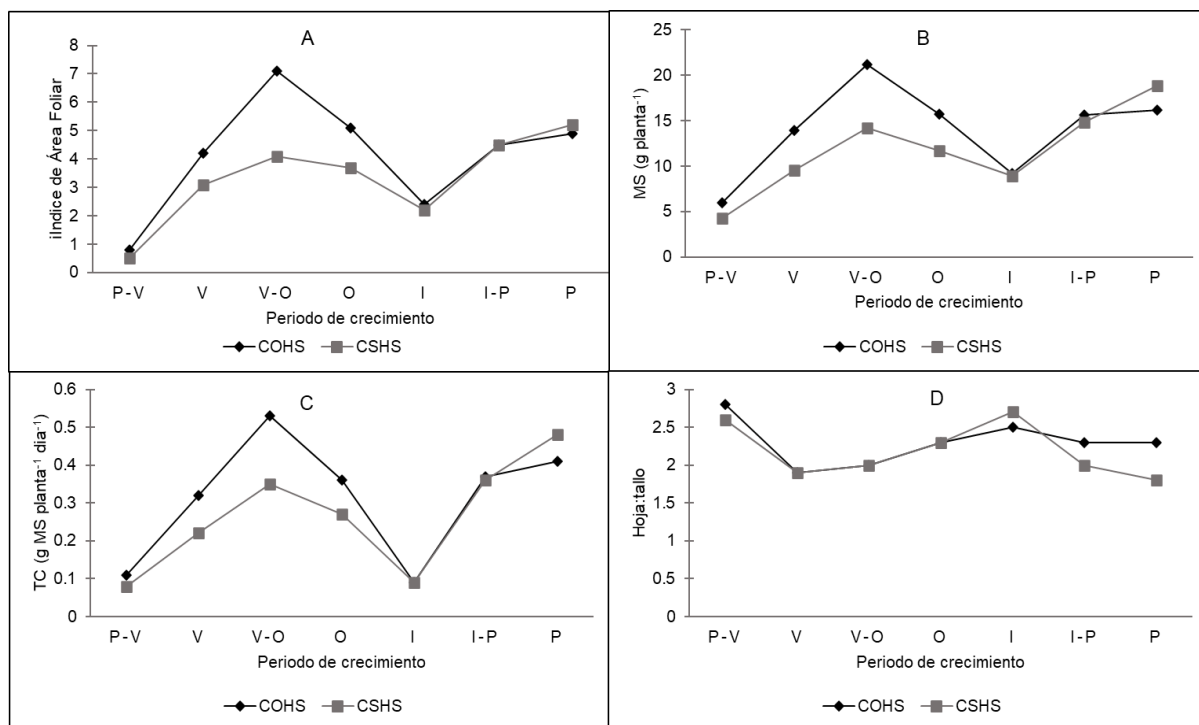


Figura 8. Dinámica temporal de Índice de área foliar (A), Materia seca acumulada (B), Tasa de crecimiento promedio del forraje (TC) (C) y, relación hoja-tallo (D) de *L. corniculatus* L. en diferentes épocas estacionales del año en contenido óptimo (COHS) y subóptimo (CSHS) de humedad del suelo, durante el período de abril de 2021 a mayo de 2022, Bermejillo, Dgo.

3.5 CONCLUSIONES

De los materiales genéticos evaluados la accesión 202700 sobresalió en las condiciones subóptimas de humedad en el suelo demostrando un mayor potencial forrajero en el norte de México, sin embargo, en la variable relación hoja-tallo sobresalieron las accesiones 255301 y 226792. Los periodos en donde se presenta un mejor comportamiento productivo de los materiales genéticos de *L. corniculatus* L. evaluados fue en verano y otoño, seguido de primavera. En sistemas de producción intensivos donde existe una mayor disponibilidad del recurso agua podría establecerse la accesión 255305 que fue la más productiva en cuanto a MS en el COHS, sin embargo, se requiere continuar con la evaluación de los diferentes materiales genéticos en campo ya que pueden

presentar variabilidad en los indicadores de productividad obtenidos en el presente estudio.

3.6 LITERATURA CITADA

- Álvarez Vázquez, P., García de los Santos, G., Guerrero Rodríguez, J., Mendoza Pedroza, S. I., Ortega Cerilla, M. y Hernández Garay A. (2018). Comportamiento productivo de *Lotus corniculatus* L. dependiente de la estrategia de cosecha. *Agrociencia* 52(8), 1081-1093.
- Araya M., Boschini C. (2005). Producción de forraje y calidad nutricional de variedades de *Pennisetum purpureum* en la meseta central de Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana* 16 (1), 37-43.
- Barry, T. N., Kemp, P. D., Ramírez Restrepo, C. A. y López Villalobos, N. (2003). Sheep production and agronomic performance of *Lotus corniculatus* under dryland farming [Producción ovina y rendimiento agronómico de *Lotus corniculatus* en tierras secas]. *Research and Practice Series* 11, 109-115. <https://doi.org/10.33584/rps.11.2003.3003>
- Beltrán S.I., Hernández A.G., García E.M., Pérez P.J., Kohashi J.S., Herrera J.G., Quero A.R., González S.S. (2005). Efecto de la altura y frecuencia de corte en el crecimiento y rendimiento de pasto Buffel (*Cenchrus ciliaris*) en un invernadero. *Agrociencia* 39 (2), 137-147.
- Brougham, R. W. (1956). Effect of intensity of defoliation on regrowth of pasture. *Australian Journal of Agricultural Research*. 7(5), 377-387. <https://doi.org/10.1071/AR9560377>
- Castillo, A. (2012). *Generación de híbridos interespecíficos de L. uliginosus x L. corniculatus y evaluación de la respuesta a déficit hídrico*. [Tesis de Doctorado, Universidad de la República de Uruguay]. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/3933/1/uy24-16039.pdf>
- Comisión Nacional del Agua. (2018). *Estadísticas del agua en México*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf
- Cruz Hernández A., Hernández Garay A., Enríquez Quiroz J.F., Gómez Vázquez A., Ortega Jiménez E., Maldonado García N.M. (2011). Producción de forraje y composición morfológica del Pasto Mulato (*Brachiaria* híbrida 36061), sometido a diferentes regímenes de pastoreo. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 2 (4), 429-443.
- Difante Dos-S.G., Do Nascimento Jr D., Batista-Euclides V.P., Da Silva, S.C., Barbosa A.R., Concalves V.W. (2009). Sward structure and nutritive value

of tanzania guineagrass subjected to rotational stocking managements. *Revista Brasileira de Zootecnia* 38 (1), 9-19. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982009000100002>

Escalante Estrada, J. A. (1999). Área foliar, senescencia y rendimiento del girasol de humedad residual en función del nitrógeno. *Terra Lationamericana* 17(2), 149-157.

García B., D.V., Guerrero R., J. de D., García de los S., G. y Lagunes R., S. A. (2014). Rendimiento y calidad de forraje de genotipos de *Lotus corniculatus* L., en el Estado de México. *Nova Scientia*. 7: 170-189. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S200707052015000100010&script=sci_arttext

Guillen, R. y Widdup, K. (2008). Program of improvement in *Lotus corniculatus* L.: Base Germplasm characterization. *Lotus Newsletter* 38, 1-67. <http://www.inia.org.uy/sitios/lnl/vol382/guillen1.pdf>

Ixtaina, V. Y. y Mujica, M. M. (2010). Respuesta del vigor de plántula de poblaciones de *Lotus tenuis* a variaciones contrastantes de disponibilidad de agua, luz y nutrientes. *Agrociencia* 44, 31-41. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S140531952010000100003&script=sci_abstract&tlng=en

Lamb, J. F., Jung, H. J. G., Sheaffer, C. C., & Samac, D. A. (2007). Alfalfa leaf protein and stem cell wall polysaccharide yields under hay and biomass management systems. *Crop Science*, 47(4), 1407-1415. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.10.0665>

MacAdam, J. W., Islam, A. y Shewmaker, G. (2013). *The benefits of tannin-containing forages, Plants, Soils and Climate*. Utha State University. https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1354&context=extension_curall

Mazuela Águila, P. C. (2013). Agricultura en zonas áridas y semiáridas. *Revista de agricultura en zonas áridas* 31(2), 3-4. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-34292013000200001&script=sci_arttext

Maroso R.P., Scheffer-Basso S.M., Carneiro C.M. (2007). Rebrotas de *Lotus* spp. de diferentes hábitos de crescimento. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 36, 1524-1531. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982007000700010>

Potters, G., Pasternak, T. P., Guisez, Y., Palme, K. J. y Jansen, M.A.K. (2007). Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble? *Trends in Plant Science*, 12(3), 99-105. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2007.01.004>

- PROCISUR. (2010). *LOTASSA: Un puente entre la genómica y las pasturas del siglo XXI*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. <http://repositorio.iica.int/handle/11324/6573>
- Ramírez Barraza, B. A., González Estrada, A., Salas González, J. M. y García Salazar, J. A. (2019). Tarifas eficientes para el agua de uso agrícola en la Comarca Lagunera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10(3), 539-550. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i3.1295>
- Ramírez Reynoso, O., Hernández Garay, A., Cerneiro da Silva, S., Pérez Pérez, J., Enríquez Quiroz, J. F., Quero Carrillo, A. R., Herrera Haro, J. G. y Cervantes Núñez, A. (2009). Acumulación de forraje, crecimiento y características estructurales del pasto Mombaza (*Panicum maximum* Jacq.) cosechado a diferentes intervalos de corte. *Técnica Pecuaria en México* 47(2). 203-213.
- Reis, L. S., de Acevedo, C. A. V., Albuquerque, A. W. y Junior, J. F. S. (2013). Índice de área foliar e produtividade do tomate sob condições de ambiente protegido. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 17(4), 386-391. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000400005>
- Reta S., D. G., Castellanos G., P. C., Olague R., J., Quiroga G., H. M., Serrato C., J. S. y Gaytán M., A. (2013). Potencial forrajero de cuatro especies leguminosas en el ciclo de verano en la Comarca Lagunera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4(5), 659-671
- Reta S., D. G., Serrato C., J. S., Quiroga G., H. M., Figueroa V., U. y Gaytán M., A. (2017). Potencial forrajero de cultivares de canola primaverales e invernales en la Comarca Lagunera, México. *Revista Mexicana de Fitogenética* 40(2), 227-233. <https://doi.org/10.35196/rfm.2017.2.227-233>
- SAS, Institute. 2009. SAS/STAT® 9.2. *Use's Guide Release*. Cary, NC: SAS Institute Inc. USA.
- Sbrissia, A., F., Da Silva, S. C., Sarmento, O. L. D., Molan, L. K. E. F., Andrade, M., Goncalves, A. C. y A. V. Lupinacci. (2010). Tillering dynamics in palisadegrass swards continuously stocked by cattle. *Plant Ecology*, 206, 349-359.
- Valentine, I. y Matthew, C. (1999). *Plant growth, development and yield*. In: White J, Hodgson J. editors. NZ Pasture and Crop Science. Auckland, New Zealand: Oxford University Press, 11-27.
- Warnock, R., Valenzuela, J., Trujillo, A. Madriz, P. y Gutiérrez, M. (2006). Área foliar, componentes del área foliar y rendimiento de seis genotipos de caraota. *Agronomía Tropical* 56(1), 21-42

CAPÍTULO IV

Comportamiento estacional del estado nutrimental de *Lotus corniculatus* L. en el norte de México

4.1 RESUMEN

El objetivo fue evaluar el contenido nutrimental de cuatro accesiones y una variedad del trébol *L. corniculatus* L. con potencial forrajero en el Norte de México, de manera estacional. Se determinó el contenido de en hoja de: nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn) y de sodio (Na) de plantas establecidas en condiciones de malla sombra. Se usó un diseño experimental de bloques al azar con tres repeticiones en parcelas divididas. Las parcelas grandes fueron los contenidos de humedad en el suelo: óptimo (COHS: 26 % $\pm$ 1.5) y subóptimo (CSHS: 22 % $\pm$ 1.5); las parcelas chicas fueron las accesiones y variedad del trébol identificadas con el código/nombre: 255301, 255305, 202700, 226792 y Estanduela Ganador (EG). El comportamiento estacional obtenido se comparó con los niveles críticos establecidos para el cultivo de alfalfa y con los obtenidos en Uruguay en tierras con aprovechamiento intensivo de *L. corniculatus* L., en donde se obtuvo que conforme avanza la edad de la planta la disminución de los nutrientes también, sin embargo, solo el N y P son los que presentaron déficit en invierno, así como de Fe, Mn y Zn, por lo que se debe considerar la suplementación de macros y micronutrientes en futuros establecimientos del cultivo. Se observó que hay una disminución en la capacidad de fijar de nitrógeno atmosférico por parte del trébol provocado por los diferentes tipos de estrés al que se sometieron las plantas como la limitación de humedad en el suelo y características propias, así como las temperaturas extremas registradas durante el experimento.

Palabras clave: Nutrientes, *Lotus corniculatus* L., fisiología del estrés.

4.2 INTRODUCCIÓN

Los tejidos vegetales tienen un contenido del 80 al 85 % de agua, en tanto, el contenido seco está conformado por carbono, hidrógeno y oxígeno en un 90 al 95 %, y el resto corresponde al contenido mineral de las plantas el cual se obtiene desde la solución del suelo a través del sistema radicular (Cabezas, 2010). A pesar del mínimo porcentaje que conforman los elementos minerales en las plantas, son fundamentales para su bienestar y el conocimiento de su contenido

permite conocer su estado nutrimental y la naturaleza de los compuestos orgánicos que existen en diversas partes de la planta (Pérez, 2017), pues diversos factores, principalmente ambientales, influyen en ello, ejemplo de ello son condiciones de estrés hídrico o salinidad que provocan cambios fisiológicos y bioquímicos en el metabolismo de las plantas que determinan su subsistencia, así como su productividad al desarrollar mecanismos de tolerancia a estas condiciones (Lamnz y González, 2013).

En relación con el estrés hídrico es importante resaltar que el agua cumple diferentes funciones en las plantas ya que las reacciones químicas celulares tienen lugar en un medio acuoso, y éstas a su vez penetran a las células vegetales disueltas, ya que en las soluciones se lleva a cabo el intercambio de sustancias nutritivas entre células, órganos y tejidos (Pérez, 2017).

Investigadores dedicados a la nutrición vegetal concuerdan en que existen diecisiete nutrientes esenciales en las plantas, clasificados en macronutrientes y micronutrientes, esto dependiendo de la concentración que se encuentra en la planta. Los considerados macronutrientes son: nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), y ocho micronutrientes: cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), boro (B), molibdeno (Mo), cloro (C) y níquel (Ni) (Marschner y Rengel, 1995). El sodio (Na) no es considerado como elemento esencial, sin embargo, se le menciona como beneficioso en algunas plantas como las cactáceas (Cabezas, 2010) y se encuentra en tejidos de plantas extractoras de este mineral.

La comparación de datos de análisis de suelos y plantas sobre su contenido nutrimental con concentraciones críticas, estándares o de referencia, permiten inferir la probabilidad de que ocurran limitantes para la producción a causa de déficit o exceso de nutrientes (Barbazán et al., 2008). Este contenido nutricional es variable por planta debido a la influencia de diversos factores, como edad, órganos o partes analizadas y las condiciones ambientales en las que están establecidas.

Jones y Case (1990) y Kelling y Motocha (1990) indican que el inicio de la floración (10 %) y la parte aérea de la planta es el estado de crecimiento y la parte de la planta adecuadas para evaluar el estado nutricional de las pasturas y cultivos forrajeros. Los análisis químicos del tejido vegetal del contenido de nutrientes de las plantas, en conjunto con los del suelo, permiten realizar prescripciones de fertilización (Correndo y García, 2012), estos resultados toman relevancia en cultivos introducidos a regiones con características edafoclimáticas diferentes a las del origen.

A nivel mundial existe escasa información sobre los requerimientos nutricionales de *Lotus corniculatus* L., y mucha de ella fue generada en Uruguay en donde se han centrado en estudiar la respuesta a la fertilización fosfatada y al encalado (Barbazán et al., 2007). Tradicionalmente, el manejo de la nutrición del trébol pata de pájaro se ha restringido a la fertilización de P, mientras que se asume que los requerimientos de N son cubiertos por fijación simbiótica, función característica de la especie, y por la absorción mineral de suelo. Los demás nutrientes son aportados por mecanismos naturales suelo o agregados indirectamente con los fertilizantes, como Ca o S en algunas fuentes fosfatadas (Barbazán et al., 2008).

En la actualidad se siguen explorando técnicas de manejo de esta especie forrajera en diferentes regiones geográficas que han permitido superar desventajas de ambientes específicos como las zonas áridas, donde el clima es adverso, por las temperaturas extremas, los suelos superficiales y de baja fertilidad y la escasez de la lluvia (Manzuela, 2013). Además, no se cuentan con registros del contenido nutrimental de esta forrajera en el país, por lo que el objetivo de este estudio fue la determinación del contenido nutrimental de *L. corniculatus* L. bajo condiciones óptimas y subóptimas de humedad en el suelo en condiciones controladas de malla sombra en el Norte de México a través de las estaciones del año.

4.3 MATERIALES Y MÉTODOS

4.3.1 Ubicación del área de estudio y material vegetal

El experimento se llevó a cabo en la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo, en Bermejillo, Durango, México, ubicado en las coordenadas geográficas 25.8° LN y 103.6° LW a 1,130 m. El área corresponde a un clima seco desértico, con lluvias en verano e invierno fresco, la precipitación pluvial media anual es 258 mm y la evaporación potencial media anual de 2,000 mm; temperatura media anual de 21 °C, máxima de 33.7 °C y mínima de 7.5 °C (Medina et al., 2005).

4.3.2 Diseño y conducción experimental

Se usó un diseño experimental de bloques al azar en parcelas divididas, con tres repeticiones. Las parcelas grandes fueron dos contenidos de humedad en el suelo: óptimo (26 % $\pm$ 1.5) y subóptimo (22 % $\pm$ 1.5) establecidos con base a la curva de abatimiento de humedad (Figura 9) determinada con el método de la olla de membrana de establecido por Richard (1948).

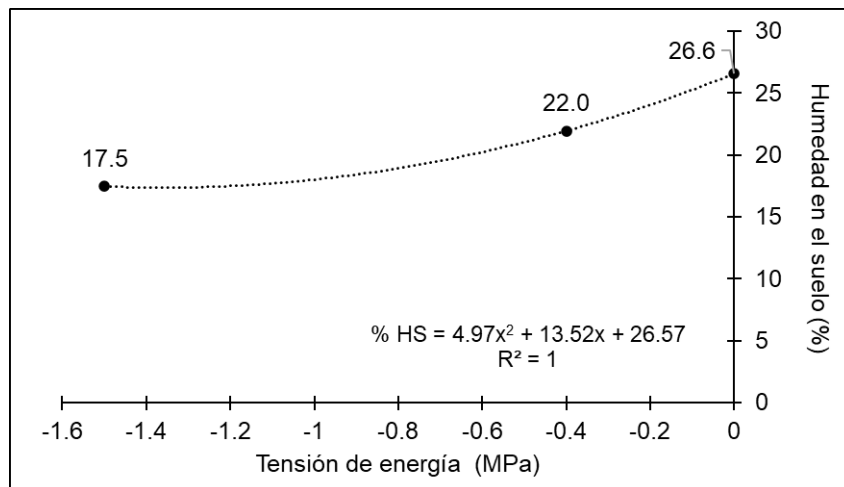


Figura 9. Curva de abatimiento de humedad de la mezcla de suelo utilizada para las accesiones y variedades de *L. corniculatus* L. Donde: %HS= Porcentaje de humedad del suelo; x, es la tensión energía negativa en MPa, considerando que CC y PMP correspondieron a una tensión de energía de 0 y -1.5 MPa, respectivamente.

Con base en lo anterior se calculó que la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) correspondieron a 26.5 % y 17.5 %, respectivamente; las parcelas chicas se constituyeron con las diez accesiones y variedades de *Lotus corniculatus* L. proporcionados por el Colegio de Posgraduados Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México (Cuadro 6).

La unidad experimental fue una planta por maceta, ésta última de plástico rígido de 20 Kg de capacidad. A cada maceta se le agregaron 18 Kg de una mezcla de sustrato en una proporción 50:30:20 correspondiente a suelo:composta:arena, respectivamente. Las características del sustrato corresponden a una textura franco-arenosa en proporción de 52:22:26 % de arena, arcilla y limo, respectivamente. Previo al trasplante, cada accesión/variedad se desarrolló en una bolsa de plástico negro de 1 Kg de capacidad durante 90 días y una vez trasplantada en la maceta se tuvo un periodo de adaptación de 62 días después de establecido el experimento (DDEE) con riego constante a CC, procediendo a dar un corte de estandarización del follaje. Dentro de la malla sombra se colocó un termómetro higrómetro digital marca ORIA que tomó registro de la temperatura (máxima y mínima) y de la humedad relativa durante el periodo de evaluación. El experimento se estableció en condiciones de malla sombra de marzo 2021 a mayo de 2022.

Cuadro 6. Relación de accesiones y variedades de *Lotus corniculatus* L. usados en el experimento con la identificación correspondiente.

Núm.	Código/Nombre de las accesiones/variedades	Lugar de procedencia	Hábito de crecimiento
2	255301	Francia	Semi erecto
5	255305	Italia	Semi erecto
6	202700	Uruguay	Erecto
7	226792	Canadá	Semi erecto
9	Estanzuela Ganador	Uruguay	Erecto

El riego se realizó cada cuatro días y los contenidos de humedad del suelo se midieron por gravimetría, para lo cual, el peso de las macetas en el COHS se mantuvo en 23.9 Kg, en tanto que, el CSHS correspondió a un peso de 23.0 kg agregando un promedio de 0.6 L de agua por riego en ambos contenidos de humedad, con lo cual se restablecía el COHS a 27.5 % (ligemente superior a CC) y CSHS a 23.5 %, como límites superiores de humedad del suelo, dejando disminuir ambos valores a 24.5 % y 20.5 %, respectivamente. Se tuvo un margen de 3.5 % (20.5 – 17.5) como rango de humedad aprovechable para que la planta no llegara a PMP.

Pasado el periodo de adaptación se realizó un corte de follaje de homogenización a las unidades experimentales, iniciando las mediciones en el mes de abril del 2021. Se realizaron en total 7 cortes, el primero en julio del 2021 y el último en mayo del 2022. Para la realización de los cortes se consideraron periodos de crecimiento según las estaciones del año y periodos intermedios: primavera-verano (P-V), verano (V), verano-otoño (V-O), otoño (O), invierno (I), invierno-primavera (I-P) y primavera (P). El intervalo de tiempo entre cortes fue de 45 días, a excepción del periodo de I, el cual se prolongó a 90 días debido al lento crecimiento de la planta por las bajas temperaturas.

4.3.3 Variables evaluadas

4.3.3.1 Determinación Nitrógeno

Para la determinación del N se utilizó el método de Kjeldahl (AOAC), 1984), en el que se utilizaron 0.25 g de muestra seca de hojas de *L. corniculatus* L. en un matraz Erlenmeyer al que se le agregaron 0.25 g de CuSO₄, 2.5 g de K₂SO₄ y 5 ml de H₂SO₄, se dejó reposar por una hora. Posteriormente, las muestras se llevaron a una parrilla de calentamiento en una campana de extracción para su digestión a una temperatura de a 200 a 230°C por 6-8 horas, transcurrido el tiempo se dejaron enfriar por una hora y se les agregó agua tridestilada hasta completar 40 ml. El extracto se llevó a filtrado con el uso de embudos y papel

filtro, para después aforarlo a 50 ml con agua tridestilada. Los extractos se reservaron en frascos etiquetados.

En el primer depósito del destilador microkjeldahl se adicionaron 10 ml de la muestra obtenida más 10 ml de agua tridestilada y 20 ml de tiosulfato de sodio. En el extremo del condensador se colocaron 20 ml de ácido bórico más 3 gotas de indicador de Toshio, se llevó entonces el proceso de destilado hasta obtener 40 ml en la salida del digestor, el cual tuvo un color verde esmeralda. Inmediatamente se llevó a titulación con HCl a 0.01 N, se registró el volumen utilizado.

Para el cálculo del porcentaje de N se utilizó la siguiente fórmula:

$$N (\%) = \frac{(V_{muestra} - V_{blanco})N \text{ ácido} \times 14}{muestra \times 10} \quad (1)$$

Donde:

$V_{muestra}$ = volumen del HCl usado para titular la muestra

V_{blanco} = Volumen de HCl usado para titular el blanco

N = Normalidad del HCl

14 = Peso mili- equivalente del N (mg)

Muestra = Peso de la muestra en gramos

10 = Factor para convertir en porcentaje

4.3.3.2 Determinación de macro y micronutrientes

Para la determinación de micronutrientes se utilizó la metodología de digestión por vía seca (Isaac y Kerber, 1971) en donde se utilizaron 0.25 gramos de material seco de hoja de *L. corniculatus* L. el cual se vació en un matraz Erlenmeyer de 40 ml y agregaron 5 ml la solución conformada por ácido nítrico al 60 % y de ácido perclórico al 70 %, se dejó reposar por una hora. Los matraces

se llevaron a calentamiento en una parrilla eléctrica dentro de una campana de extracción a 130-180 °C por 4 horas hasta obtener 2 ml del extracto, se dejó enfriar y agregó agua tridestilada hasta 40 ml. El extracto se llevó a filtrado con el uso de embudos y papel filtro, para después aforarlo a 50 ml con agua tridestilada. Los extractos se reservaron en frascos etiquetados.

Posteriormente, los extractos se prepararon en tubos de ensayo identificados con el número de planta y llevaron a lectura al Espectrofotómetro de Absorción Atómica Perkin Elmer Modelo AAnalyst 200 para conocer la concentración de Cu, Mn, Zn, Fe, Ca, Mg, K y Na. Para los macronutrientes (Ca, Mg, K y Na) se realizó una dilución de la muestra de 1 ml más 9 ml de agua tridestilada, y la de micronutrientes (Fe, Cu, Zn y Mn) se utilizaron 10 ml de extracto.

Para la determinación del porcentaje de los macros y micronutrientes se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$Ca, Mg, K, Na(\%) = \frac{ppm\ CC \times D_m \times D_v}{10\ 000} \quad (2)$$

$$Fe, Cu, Zn, Mn (\%) = ppm\ CC \times D_m \times D_v \quad (3)$$

Donde:

ppm CC= partes por millón en la curva de calibración

Dm= dilución de la masa (volumen de aforo/g de muestra)

Dv= dilución de volumen (aforo/alícuota) (en caso de realizarse diluciones)

4.3.3.3 Determinación de Fósforo

El método utilizado para determinar el P fue el de azul de molibdeno (Murphy y Riley, 1962). El método se basa en la producción de un complejo de fosfomolibdato en una solución ácida el cual es reducido por ácido ascórbico para formar un color azul. Es muy sensible y la intensidad de color azul varía con la

concentración de P en la solución. Se utilizaron dos soluciones: A y B para el desarrollo de esta metodología y conformar una solución de trabajo.

Para la solución A se disolvieron 60 g de molibdato de amonio en 200 ml de agua tridestilada, se añadieron 1.455 g de tartrato de antimonio y potasio y disolvieron. Se agregaron lentamente 700 ml de ácido sulfúrico concentrado. Se dejó enfriar para posteriormente diluirlo con agua tridestilada a un volumen de 1 L. Para la solución B se disolvieron 132 g de ácido ascórbico en agua tridestilada y completó a un volumen de 1 L. La solución de trabajo se elaboró con 45 ml de la solución A más 800 ml de agua, se mezcló y añadieron 18 ml de la solución B, se completó a un volumen de 1 L y reservó.

La solución estándar de P se conformó con 0.2195 g de fosfato deshidrogenado de potasio, secado a 105 °C por 1 h, se diluyó con agua a 1 L. Posteriormente se tomaron alícuotas de 2.5, 5, 10, 20, 30, 40 y 50 ml y diluyeron en 250 ml para obtener patrones de P a 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 y 10.0 ppm de P (curva patrón). En tubos de ensayo se agregaron 2 ml de extracto de *L. corniculatus* L. obtenido en la metodología anterior de macro y micronutrientes, se agregaron 8 ml de agua y 10 ml de la solución de trabajo, así como a las diluciones patrón. Los tubos de llevaron a reposar 20 minutos en la oscuridad, transcurrido el tiempo de llevaron a lectura al espectrofotómetro con una longitud de onda de 470 nm. Para el cálculo del porcentaje de P se utilizó la siguiente fórmula:

$$P (\%) = \frac{ppm\ CC \times Dm \times Dv}{10\ 000} \quad (4)$$

Donde:

ppm CC= partes por millón en la curva de calibración

Dm= dilución de la masa (volumen de extractante/g de muestra)

Dv= dilución de volumen (aforo/alícuota)

4.3.4 Análisis estadístico

La base de datos se procesó con uso del Software Statistical Analysis System (SAS, 2009) versión 9.0 con el cual se realizó una prueba de rango múltiple de medias Tukey ($P \leq 0.05$). La comparación se analizó entre los materiales genéticos por periodo de corte y contenido de humedad.

4.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Datos climáticos. De acuerdo con el reporte de temperaturas, se identificó una media máxima de 30 °C y promedio de mínimas de 20 °C con máxima de 46.9 °C y mínima de -4.6 °C en la malla sombra donde se estableció el experimento (Figura 10). La humedad relativa media registrada osciló entre 44 y 73 %, con mínima entre 5-10 % en los meses de mayo a julio, y máxima de 100% en los periodos de lluvia distribuidos en los meses de julio, agosto y septiembre, ambas variables durante el período de abril de 2021 a mayo de 2022. Lo anterior indica que, aun cuando el experimento fue en condiciones de malla sombra, se registraron valores extremos, en términos de temperaturas y humedad relativa.

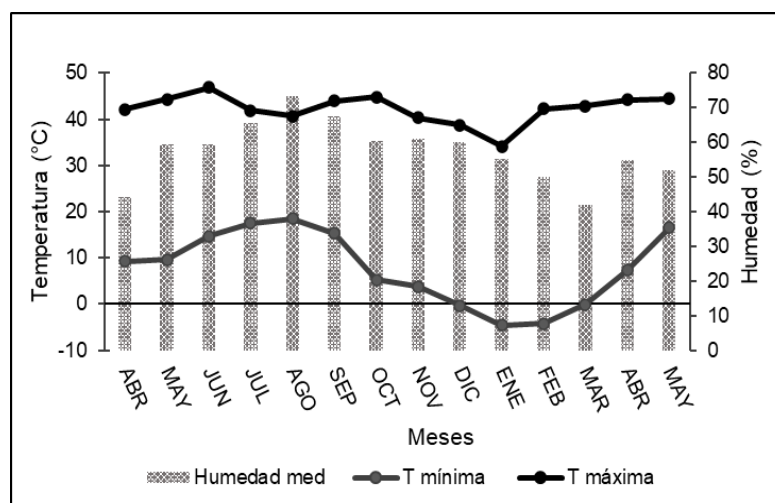


Figura 10. Temperatura media, máxima, mínima y humedad relativa mensual registradas en malla sombra con accesiones y variedades de *L. corniculatus* L. de abril 2021 a mayo 2022, Bermejillo, Dgo.

Composición del sustrato. En el análisis de suelo realizado por el Laboratorio Nacional de Servicios de Análisis de Agua, Suelo, Planta y Atmósfera del INIFAP, se obtuvo que la mezcla de suelo utilizada tuvo una textura franco arcillo arenosa y un pH de 8.69, sin embargo, diversos autores como Durán (1991) señalan que *L. corniculatus* L. se desarrolla adecuadamente en suelos ligeramente ácidos y tolera un amplio rango de acidez, hasta pH menores a 5.5. El contenido de materia orgánica es alto, de 7.37 %, esto debido a la composta orgánica incorporada. Las bases intercambiables (Ca, Mg, K y Na) también se encontraron sobre los rangos óptimos, teniendo concentraciones de 16.20, 4.33m 8.71 y 3.40 mEq 100 g⁻¹. Se clasificó a la mezcla como fuertemente alcalina y salina.

Contenido de Nitrógeno. La concentración promedio de N en las plantas fue de 1.0 % en el COHS y de 1.1 % en el CSHS, teniendo un rango estacional entre 1.19 y 0.79 %, se presentó diferencia ($P \leq 0.05$) entre las estaciones, siendo el periodo de invierno en el que se la mayor concentración de N (1.4 %) y el de verano el de menor (0.79 %), en ambos contenidos de humedad (Figura 11). Ya que no hay información acerca de las concentraciones críticas para Lotus, Barbazán et al. (2008) propuso utilizar el de la concentración de alfalfa que corresponde al 2.0 %. Según los resultados obtenidos, las plantas de *L. corniculatus* L. se encuentran en déficit de N, esto probablemente se deba a una deficiencia en la función biológica de N, por lo que debe considerarse en futuros estudios y en el manejo de ese cultivo.

La fijación de N puede variar entre sitios por factores edáficos como el pH del suelo y la disponibilidad de otros nutrientes como el P, K y la presencia de metales pesados, así como los regímenes de humedad del suelo que afectan considerablemente la fijación biológica en diferentes ecosistemas (Hauck, 1971). Las plantas que crecen bajo el déficit de N presentan una clorosis, principalmente en las hojas maduras, traducándose en plantas raquíticas (Marín et al., 2011). Durante las primeras semanas de crecimiento de las plantas de *L. corniculatus* L. evaluadas la clorosis se presentó alrededor de una semana antes del corte,

esto puede comprometer la calidad del forraje, por lo que es importante su suplementación durante su aprovechamiento.

Contenido de Fósforo. La concentración de P promedio obtenida fue de 0.10 % en ambos contenidos de humedad, sin diferencia estadística ($P \leq 0.05$), teniendo un rango de 0.08 a 0.11 %. Los datos obtenidos del contenido de P se encuentran bajo el valor crítico propuesto por Pinkerton et al. (1997) de 0.24 % (Figura 11), tal condición de deficiencia debe atenderse en el proceso de fertilización ya que la sintomatología se ve reflejada en la pérdida del follaje, elemento esencial de las forrajeras.

Los síntomas de deficiencia de P son similares a las de N, principalmente reflejadas en un retardo de su crecimiento, pues las raíces se ven poco desarrolladas. Si este déficit se mantiene constante pueden provocar la acumulación de antocianina en la base de las hojas provocando la pérdida de tallos, en el caso de plantas forrajeras es una gran problemática, pues son los órganos que se aprovechan en los sistemas ganaderos (Marín, 2011).

Contenido de Potasio. La concentración media de K en las plantas fue de 4.4 % en el COHS y de 4.0% en el CSHS, teniendo un rango entre las estaciones de 3.86 a 4.72 % (Figura 11), sin diferencia ($P \leq 0.05$) entre las estaciones evaluadas. Además, los valores se encuentran sobre el valor crítico de 1.4 % proporcionado por Barbazán et al. (2008) por lo que no se requiere su aplicación en futuros estudios en las mismas condiciones de suelo.

De igual manera como el N y el P, el K se moviliza de los órganos viejos a los jóvenes, presentando un amarillamiento ligero en las hojas, posteriormente comienza la aparición de manchas necróticas (Marín, 2011), sin embargo, estos síntomas extremos no se presentaron en los materiales genéticos evaluados a pesar de la deficiencia de N y P.

Contenido de Calcio. La concentración de Ca presentó diferencia ($P \leq 0.05$) entre las estaciones, siendo la de invierno en la que se presentó la mayor

concentración con 4.64 %, y el contenido promedio estacional obtenido fue de 3.5 % en el COHS y de 2.9 % en el CSHS, teniendo un rango entre estaciones de 2.9 a 3.5 % (Figura 11), sin embargo, los valores obtenidos se encuentran sobre el valor crítico propuesto por Cornforth y Sinclair (1984) de 0.40 % por lo que no es necesario considerar su suplementación en futuros estudios.

Contenido de Magnesio. La concentración media de Mg en las plantas fue de 1 % en el COHS y de 0.8 % en el CSHS, teniendo un rango entre estaciones de 0.68 a 1.07 % (Figura 11). Se presentó diferencia ($P \leq 0.05$) entre estaciones siendo el invierno fue en el que se presentaron las concentraciones más altas con 1 % y disminuyeron conforme avanzó la edad de la planta, sin embargo, los valores se encuentran sobre el valor crítico de 0.2% correspondiente al cultivo de alfalfa (Kelling y Motocha, 1990), ya que no hay referencias para Lotus.

Contenido de Sodio. La concentración media de Na en las plantas fue de 0.70 % en el COHS y de 0.39 % en el CSHS, teniendo un rango de 0.24 a 1.19 %, se obtuvo diferencia ($P \leq 0.05$) entre estaciones y contenido de humedad, siendo el periodo de invierno en el que se presentaron las concentraciones más altas, pero solo en COHS, y disminuyeron en el periodo siguiente (primavera) (Figura 11). Los datos obtenidos se encuentran sobre los encontrados por Remón y García (1982) en el análisis a plantas de *L. corniculatus* L. establecidas como cultivo de 0.038 %, sin embargo, las que obtuvo en plantas silvestres fue de 0.41 %, esta diferencia en el contenido tiene que ver con el manejo que se le da las tierras de cultivo enfocadas en su adecuación para cultivos. A pesar de ello, los materiales genéticos evaluados en este estudio sobrevivieron a las condiciones de salinidad de la mezcla utilizada. Es importante señalar que las plantas en COHS fueron las que presentaron mayor concentración de este nutriente en sus tejidos, lo cual podría perjudicar su productividad en aprovechamientos futuros.

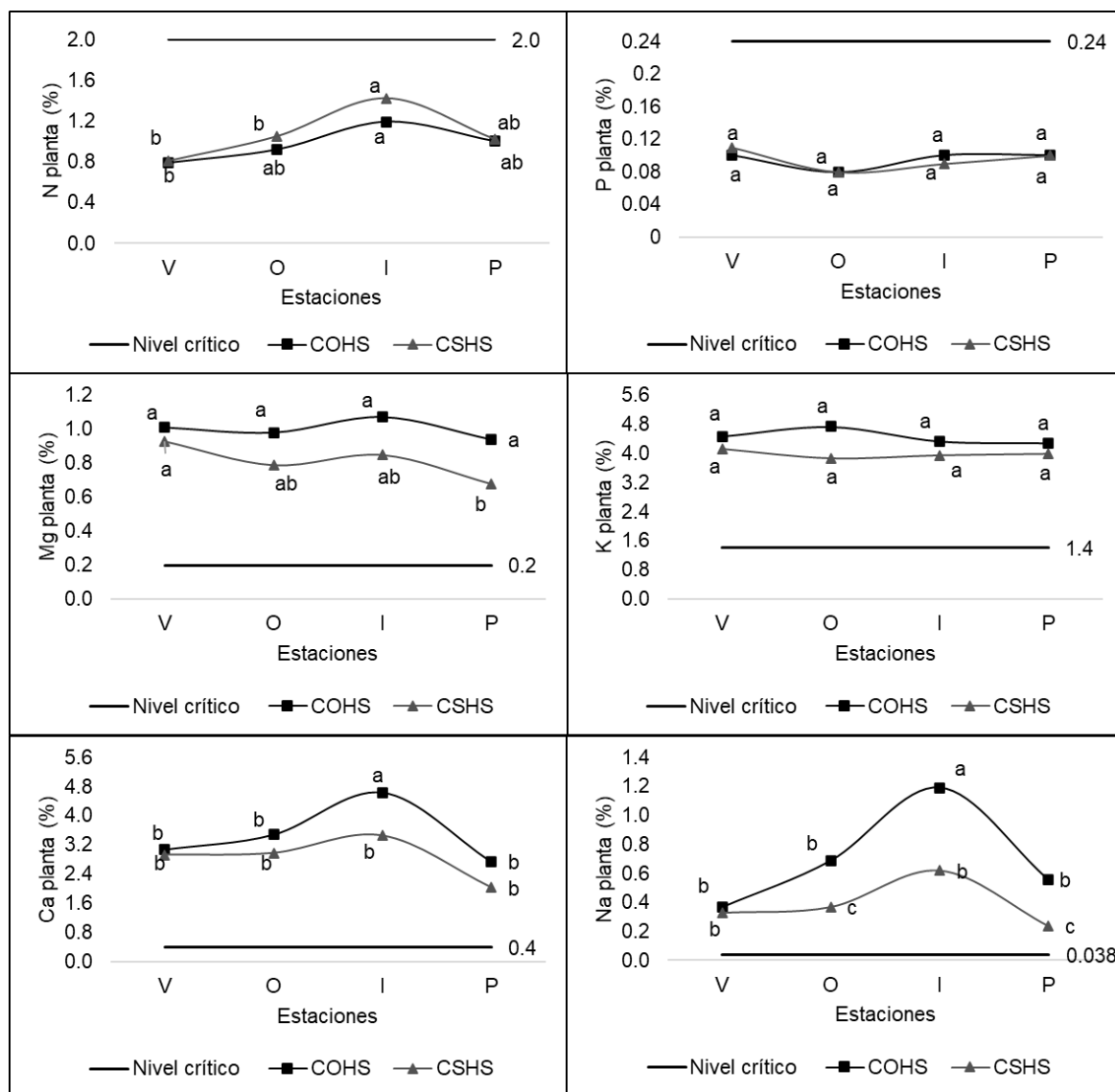


Figura 11. Comportamiento estacional en el contenido de nutrientes en hoja de *L. corniculatus* L. bajo dos contenidos de humedad del suelo en el Norte de México. Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$), cifras con las mismas letras en cada gráfico, son estadísticamente iguales. Donde: COHS, es contenido óptimo de humedad del suelo ($26 \% \pm 1.5$), CSHS, es contenido subóptimo de humedad del suelo ($22 \% \pm 1.5$).

Contenido de micronutrientes. Las concentraciones medias de Cu, Fe, Mn y Zn correspondieron a 10.1, 10.6, 87.5 y 68.4 mg kg⁻¹ en COHS, y de 41.1 y 43.4 y 46.3 y 38.8 en mg kg⁻¹ CSHS, respectivamente (Figura 12). Hubo diferencia ($P \leq 0.05$) entre las estaciones evaluadas, siendo los últimos tres los que disminuyeron en concentración de otoño a primavera, es decir, conforme avanza la edad de la planta, por lo que se debe atender la fertilización en etapas posteriores a cada corte o aprovechamiento realizado, ya que este déficit limita diversos procesos de las plantas, como la fotosíntesis, reflejándose los daños en la productividad. Los datos obtenidos son comparables con las concentraciones críticas señaladas por Kelling y Motocha (1990) y Cornforth y Sinclair (1984) del cultivo de alfalfa, que corresponden para Cu, Fe, Mn y Zn a 5, 44, 24 y 12 mg kg⁻¹. En cuanto a los nutrientes que en altas concentraciones pueden presentar toxicidad (Cu, Mn y Zn) se tomaron de referencia los valores de 20, 300 y 400, respectivamente, proporcionados por Correndo y García (2012).

Los síntomas visibles de déficit de micronutrientes aparecen como clorosis en las hojas jóvenes, pero las nervaduras permanecen verdes, diferenciándose del resto del tejido, además de presentar deformaciones, y a nivel fisiológico afectar en los procesos de redox, importantes para el desarrollo adecuado de la fotosíntesis y la desintoxicación de radicales de oxígeno libres (Marín, 2011). Por otro lado, el exceso de micronutrientes como el Cu, Mn y Zn pueden afectar el desarrollo de órganos importantes como la raíz, provocando crecimiento lateral excesivo, provocando además que compita con la absorción de otros nutrientes con funciones en el proceso de fotosíntesis, respiración y desintoxicación (Kyrby y Rómbeld, 2007). La absorción de Cu por *L. corniculatus* L. aumentó en primavera en ambos contenidos de humedad a una concentración de 13.6 y 15 mg kg⁻¹, valores cercanos al considerado tóxico, de 20 mg kg⁻¹ (Correndo y García, 2012), comprometiendo la sobrevivencia de la planta. El atender oportunamente el déficit nutrimental de forrajes con aprovechamientos intensivos

permite asegurar altos rendimientos y constancia en ellos, además de aportar un forraje de calidad para el consumo del ganado.

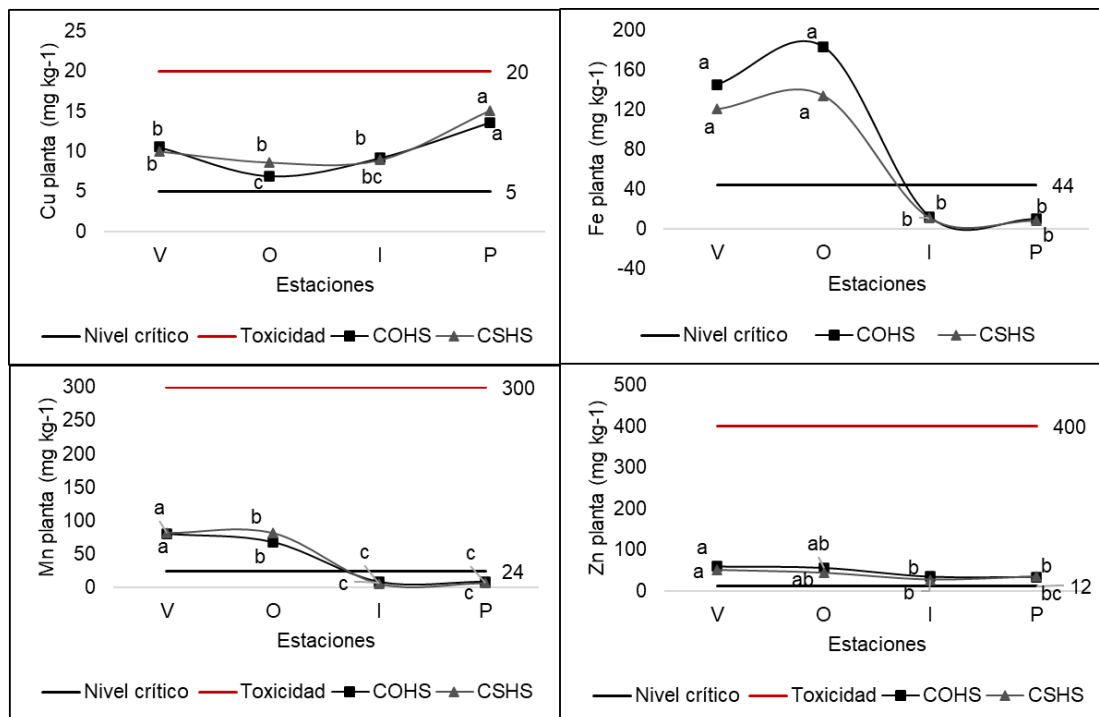


Figura 12. Comportamiento estacional en el contenido de nutrientes de *L. corniculatus* L. bajo dos contenidos de humedad en el Norte de México. Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$), cifras con las mismas letras en cada gráfico, son estadísticamente iguales. Donde: COHS, es contenido óptimo de humedad del suelo ($26 \% \pm 1.5$), CSHS, es contenido subóptimo de humedad del suelo ($22 \% \pm 1.5$).

4.5 CONCLUSIONES

El contenido nutrimental de *Lotus corniculatus* L. no presentó diferencias entre las accesiones y variedad evaluadas, pero si entre estaciones bajo condiciones óptimas y subóptimas de humedad del suelo, mostrando la disminución de este conforme avanzó la edad de la planta. Los nutrientes necesarios por suplementar identificados fueron N, P, Fe, Mn y Zn, por lo que debe considerarse en estudios posteriores. En el caso del Na, tuvo mayor concentración en el COHS, lo cual sugiere tolerancia de esta especie también a los suelos sódicos, característica importante en la propuesta de cultivos alternativos en regiones con suelos salinos, como lo son las zonas áridas de México.

4.6 LITERATURA CITADA

- AOAC (Association of Official Agricultural Chemists). 1984. Official Methods of Analysis. Kjeldahl method (2.062). 14th edition. Washington D.C., USA.
- Barbazán, M., Ferrando, M. y Zamalvide. (2007). Estado nutricional de *L. corniculatus* L. en Uruguay. *Agrociencia* 11(1), 22-34.
- Barbazán, M., Ferrando, M. y Zamalvide. (2008). Diagnóstico nutricional de *L. corniculatus* L. en suelos de Uruguay. *Informaciones Agronómicas* 39, 6-13.
- Cabezas, O. L. (2010). *Sodio en plantas CA C. C4 y CAM*. Características generales y uso en programas de desarrollo de tierras áridas y semiáridas: Homenaje del doctor Julio López Gorgé, 151. <http://hdl.handle.net/10261/29768>
- Cornforth I.S. y A.G. Sinclair. (1984). *Fertilizer and lime recommendations for pastures and crops in New Zealand*. Second Revised Edition. Ministry of Agriculture and Fisheries, Private Bag, Wellington.
- Correndo, A. A., García, O. F. (2017). Concentración de nutrientes en planta como herramienta de diagnóstico: Cultivos extensivos. *Archivo Agronómico* 14, 1-8. <http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/2983F9B934DDE60D852579BA00747DF4/%24FILE/AA14.pdf>
- Durán A. (1991). *Los suelos del Uruguay*. (2 ed.). Editorial hemisferio sur. 398p.
- Hauck, R.D. (1971). Quantitative estimates of nitrogen-cycle-processes: Concepts and review. In: *Nitrogen-15 in Soil Plant Studies*. IAEA, Vienna (p. 65-80).
- Isaac, R. A. y Kerber, J. D. (1971). Atomic Absorption and flame photometry: techniques and uses in soil, plant and water analysis. In: WALSH, L. M. (Ed.). *Instrumental methods for analysis of soil and plant tissues*. Madison: Soil Science Society of America. p.17-37
- Jones J.B. y V.W. Case. (1990). Sampling, handling, and analyzing plant tissue samples. En *Soil testing and plant analysis*. 3er ed. R. L. Westerman. Soil Science Society of America. USA. 389-427.
- Kelling K.A. y J.E. Matocha. (1990). *Plant analysis as an aid in fertilizing forage crops*. In *Soil testing and plant analysis*. Third edition. R. L. Westerman. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. 603-643. <https://doi.org/10.2136/sssabookser3.3ed.c23>
- Kyrby E. y Rómbeld V. (2007). Micronutrientes en la fisiología de las plantas: funciones, absorción y movilidad. *Informaciones agronómicas*. 9-13.

[http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/3FA84D0333FEDEAA852579A0006BF733/\\$FILE/Micronutrientes%20en%20la%20Fisiolog%C3%ADa%20de%20las%20Plantas.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/3FA84D0333FEDEAA852579A0006BF733/$FILE/Micronutrientes%20en%20la%20Fisiolog%C3%ADa%20de%20las%20Plantas.pdf)

Lamnz, P. A. y González, C. M. (2013). La salinidad como problema en la agricultura: la mejora vegetal una solución inmediata. *Cultivos Tropicales* 34 (4), 31-32

Marín S., G. L. (2011). *Sistemas de producción vegetal II*. Proyecto Única. Colombia. Universidad de Caldas-Unión Europea. https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/4781/sistemas_de_produccion_vegetal_2.pdf

Mazuela A., P. C. (2013). Agricultura en zonas áridas y semiáridas. *Revista de Agricultura en Zonas Áridas* 31(2), 3-4. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292013000200001

Marschner, P y Rengel, Z. (1995). Nutrient availability in soils. In: Marschner, H. (Ed.). *Mineral Nutrition of higher plant*. Academic Press, pp: 315-502. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00012-1>

Medina G., G., G. Díaz P., J. López H., J. A., Ruíz, C. y Marín M. S. (2005). *Estadísticas climatológicas básicas del estado de Durango (Periodo 1961 – 2003)*. Libro Técnico No. 1. Campo Experimental Valle del Guadiana, CIRNOC-INIFAP.

Murphy, J. y Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural Waters. *Analytica Chimica. Acta* 27, 31-36. https://www.academia.edu/3720851/A_modified_single_solution_method_for_the_determination_of_phosphate_in_natural_waters

Pérez Leal, F. (2017). *Fisiología Vegetal: Nutrición mineral*. Universidad Nacional de Ucayali, Perú. <http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/3201/000026082L.pdf>

Pinkerton A., F.W. Smith y D.C. Lewis. (1997). *Pasture species. In Plant analysis, an interpretation manual*. (2nd ed.). D.J. Reuter and J. B. Robinson editores. Collingwood, Vic: CSIRO Publishing

Remón, E. J., y García, C. A. (1982). Composición del forraje de dos cultivares de *L. corniculatus* L. cosechado en diferentes momentos vegetativos. *Pastos* 12(2), 309-315.