


Balance hídrico estacional y respuesta en el rendimiento y composición bioquímica de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit



Abigail Castro-González ^a

Maribel Montero-Lagunes ^b

Francisco Indalecio Juárez-Lagunes ^{a*}

Javier Francisco Enríquez-Quiroz ^b

José Manuel Martínez-Hernández ^a

^a Universidad Veracruzana. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, 91710, Veracruz, Ver. México.

^b Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Campo Experimental La Posta, Veracruz, México.

*Autor de correspondencia: juarezf@hotmail.com

Resumen:

El objetivo fue evaluar el efecto del balance hídrico estacional (BHE) sobre el rendimiento y composición bioquímica de *Leucaena leucocephala*. Se establecieron tres parcelas de 5 x 5 m en clima cálido sub-húmedo (Aw_1). Se hicieron nueve cortes de muestreo cada 42 días en siete estaciones del año clasificadas por su BHE (mm día^{-1}) como: “Nortes” -0.18 (N, dic-ene); Seca -2.39 (S, feb-abr); Lluvia inicio 1.77 (LI, abr-may); Lluvia plena 4.89 (LP, jun-jul); Lluvia extrema 8.32 (LE, jul-ago); Lluvia tardía 3.74 (LT, ago-sep); Lluvia residual -1.46 (LR, sep-dic). Se determinó rendimiento de materia seca y composición bioquímica (MS, cenizas, EE, FDN, FDA, lignina, PC, NNP, PIDN y PIDA), a partir de la cual se estimaron las fracciones de carbohidratos y de proteínas solubles en rumen. El diseño estadístico fue bloques completamente al azar con siete tratamientos. Las medias se compararon por Tukey ($P \leq 0.05$). El rendimiento de MS (kg ha^{-1}) disminuye a 152^d en N y S

con BHE-, y aumenta a 1497^b en LP y LT con BHE+. La proteína verdadera soluble (PVS, %PC) aumenta a 73.1^a en N y S con BHE- y disminuye a 69.8^b en LP y LT con BHE+. Los carbohidratos no fibrosos (CNF, %Carbohidratos totales) disminuyen a 44.4^b en N y S y aumentan a 54.7^a en LP y LT. Se concluye que en N y S con BHE- los CNF disminuyen y la PVS aumenta, acentuando el desbalance energía: proteína en rumen para síntesis de proteína microbiana.

Palabras clave: Leguminosa arbustiva, Fracciones de carbohidratos, Fracciones de proteína.

Recibido: 30/05/2024

Aceptado: 07/08/2024

Introducción

En el trópico de América, particularmente en las planicies costeras, los cambios de temperatura y de horas luz no son tan relevantes sobre el rendimiento y composición bioquímica de los forrajes como es la cantidad y distribución de las lluvias, así como la evaporación, las cuales definen las estaciones de lluvias con balance hídrico positivo y de sequía con balance hídrico negativo. En la región tropical del Golfo de México (con base en la distribución del balance hídrico estacional que integra los efectos de la precipitación pluvial, evaporación, humedad relativa, nubosidad y temperatura a lo largo del año), se han caracterizado tres estaciones climáticas: sequía (marzo a mayo), lluvias (junio a noviembre) y “nortes” (diciembre a febrero)⁽¹⁾. El balance hídrico estacional (BHE), es una herramienta agronómica para evaluar la cantidad de agua (en mm d⁻¹) disponible para un cultivo⁽²⁾. Este cálculo toma en consideración la precipitación pluvial como fuente de entrada, y la salida representada por la evaporación. De esta manera, el BHE permite evaluar de forma sencilla la cantidad de agua disponible para la planta. En su fase de crecimiento los forrajes tropicales son afectados por las variaciones diarias de humedad con impacto en el rendimiento y su composición bioquímica⁽³⁾. Por lo que, medir el balance hídrico durante el período de crecimiento entre corte y corte de un forraje a lo largo de un ciclo anual daría información de la respuesta en rendimiento y su composición bioquímica para estimar las variaciones estacionales de la calidad nutritiva para rumiantes.

Al-Mefleh y Tadros⁽⁴⁾ evaluaron el rendimiento de *Leucaena leucocephala* bajo diferentes niveles de evapotranspiración (ET) en regiones áridas. Reportan que irrigando a un 50 % de ET se obtiene la respuesta más eficiente, en cuanto a manejo del agua y en rendimiento de hoja (676.3 kg MS ha⁻¹). El hecho de que *Leucaena leucocephala* mantenga forraje verde aun en períodos prolongados de BHE negativos es que es una leguminosa arbustiva con raíces

muy profundas como estrategia para evitar la sequía y no exponer el protoplasma a potenciales de agua extremadamente negativos⁽⁵⁾. Hsiao⁽⁶⁾ señala que los parámetros más sensibles al mínimo estrés hídrico son el crecimiento celular, la síntesis de la pared celular y de proteína, por lo que el rendimiento se reduce notablemente. Durante sequías prolongadas *Leucaena leucocephala* no deriva energía irreversible y costosa hacia lignificación, cutinización o silicificación, sino a sustancias energéticamente más baratas como taninos y alcaloides⁽⁷⁾, lo que le permite responder ipso facto en rendimiento a condiciones de BHE positivo. Un paso previo obligado para estimar calidad nutritiva es determinar la composición bioquímica. Con los análisis químicos apropiados se tendrá mayor precisión en la predicción de la calidad nutritiva de un forraje^(8,9). El perfil de análisis propuesto por Higgs *et al*⁽¹⁰⁾ permite hacer estimaciones de calidad nutritiva de los alimentos para rumiantes muy precisas utilizando las ecuaciones del Cornell Net Carbohydrate and Protein System (CNCPS). Se entiende por calidad nutritiva del forraje a la disponibilidad de sus nutrientes para apoyar las funciones de mantenimiento y producción de los animales que alimenta⁽¹¹⁾. Los principales determinantes de la calidad nutritiva de los forrajes son la disponibilidad de nitrógeno (proteína) y de carbohidratos⁽¹²⁾. El aporte de nitrógeno de las leguminosas tropicales ha estado pobremente descrito, donde el solo valor de proteína cruda no es suficiente para explicar la disponibilidad del nitrógeno para síntesis de proteína microbiana por el microbioma ruminal. Para ello se requiere desagregar la proteína en sus diferentes fracciones bioquímicas de acuerdo a su solubilidad y a la población microbiana que las utiliza: El nitrógeno no proteico, que es de solubilidad inmediata y utilizado en forma de NH₃ principalmente por bacterias que degradan carbohidratos fibrosos, la proteína verdadera soluble que es de solubilidad rápida e intermedia utilizada como aminoácidos principalmente por bacterias proteolíticas y utilizadoras de carbohidratos no fibrosos, estas fracciones de proteína se utilizan para síntesis de proteína microbiana (principal fuente de proteína para el rumiante), la proteína insoluble o de escape que es digerida en abomaso y duodeno, y es absorbida como aminoácidos por el animal, y la proteína indigestible que se excreta en las heces⁽¹³⁾. Mientras no se describan estas fracciones proteicas en los forrajes, particularmente en las leguminosas arbóreas, no se podrá estimar su disponibilidad para optimizar la eficiencia en la síntesis ruminal de proteína microbiana.

Por ello surge la necesidad de evaluar la calidad de *Leucaena leucocephala* en términos de fracciones de proteína y carbohidratos que permitan conocer la disponibilidad de estos nutrientes para la alimentación más eficiente de bovinos en el trópico. Por otra parte, de acuerdo con Muñoz *et al*⁽¹⁾ en el trópico, la estación del año es el principal factor que afecta la calidad nutritiva del forraje. Además, factores climáticos como variaciones en la precipitación pluvial y temperatura pueden modificar la composición bioquímica de *Leucaena leucocephala*⁽¹⁴⁾. Al-Mefleh *et al*⁽⁴⁾ reportan rendimientos de *L. leucocephala* de 306, 676, 724, 839 y 1,173 kg MS ha⁻¹ a Evapotranspiración (ET) de: 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 y 1.25. Sugiriendo que a 0.50 de ET *L. leucocephala* usa más eficientemente el agua para

crecimiento. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto del balance hídrico estacional sobre el rendimiento y la calidad nutricional de *L. leucocephala*.

Material y métodos

Área de estudio

La investigación se realizó en el Campo Experimental “La Posta” (INIFAP) en Paso del Toro, Veracruz, localizado a 19° 02' LN y 96° 08' LO y a 16 msnm. El clima es cálido sub-húmedo (Aw_1)⁽¹⁵⁾, con temperaturas media, máxima y mínima son de 25.4, 31.3 y 19.5 °C, respectivamente, precipitación pluvial de 1,337 mm y evaporación de 1,379 mm. El suelo predominante es del tipo vertisol, pH 5.4, textura franco-arenosa y con 2.6 % de materia orgánica.

Material vegetativo

El material vegetativo fue *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit cv. Cunningham de 1.5 m de altura establecido en tres parcelas de 5 x 5 m cada una. Cada parcela tenía cuatro arbustos con distancia de 2 x 2 m. Se colectaron hojas y tallos tiernos comestibles (hasta de 5 mm de diámetro aprox.). Los cortes de las muestras de forraje se realizaron cada 42 días, de agosto de 2011 a julio de 2012.

Datos meteorológicos

Los datos de precipitación pluvial y evaporación fueron registrados por la estación climática “El tejár” Veracruz, México⁽¹⁶⁾ ubicado a 5 km del CE. La Posta. Los datos de precipitación y evaporación utilizados para este estudio fueron los promedios correspondientes a los períodos de rebrote de *Leucaena leucocephala* agrupados y calculados por las fechas de corte.

Estación del año definida por balance hídrico estacional (BHE)

El BHE (mm día^{-1}) considera la precipitación pluvial (mm día^{-1}) como única entrada de agua y la evaporación (mm día^{-1}) como la salida de agua. El cálculo se realizó a partir de la diferencia de precipitación pluvial menos evaporación (Figura 1). El BHE por fecha de corte se determinó diariamente a partir del día del corte de muestreo hasta el día previo al siguiente corte de muestreo (42 días). Las fechas de los cortes fueron: 15 de agosto, 26 de septiembre, 07 de noviembre y 19 de diciembre del 2011, y 30 de enero, 23 de abril y 16 de julio del 2012. Los resultados de BHE diario fueron promediados cada 42 días con el fin de obtener

un valor representativo de cada fecha de muestro. Los promedios de BHE (mm día^{-1}) se agruparon en siete estaciones del año como: “Nortes” -0.18 ± 0.67 (dic-ene); Seca -2.39 ± 0.26 (feb-abr); Lluvia inicio 1.77 ± 2.49 (abr-may); Lluvia plena 4.89 ± 2.66 (jun-jul); Lluvia extrema 8.32 ± 3.20 (jul-ago); Lluvia tardía 3.74 ± 2.34 (ago-sep); Lluvia residual -1.46 ± 0.39 (sep-dic). Siendo las estaciones del año los siete tratamientos (Figura 2).

Figura 1: Balance hídrico estacional (BHE) por fecha de muestro de forraje de *Leucaena leucocephala* durante el ciclo 2011-2012

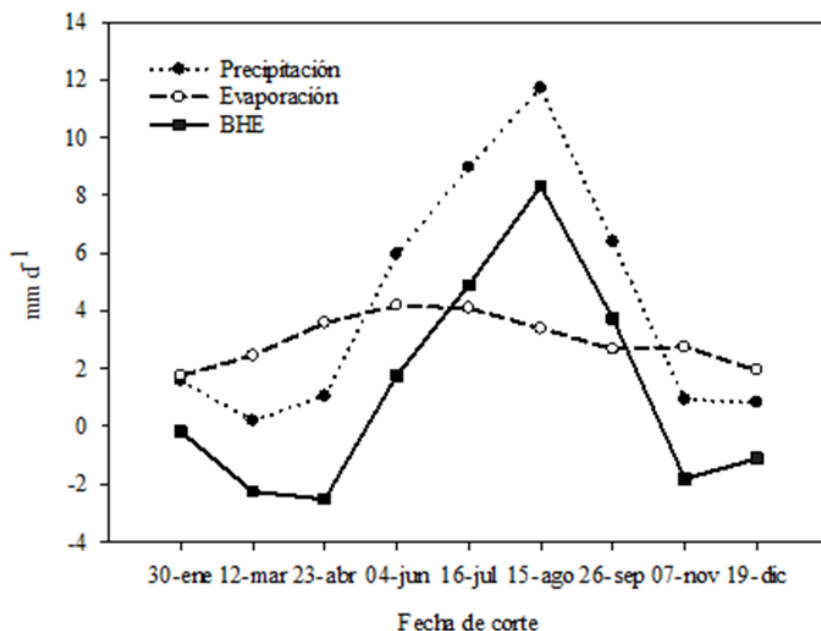
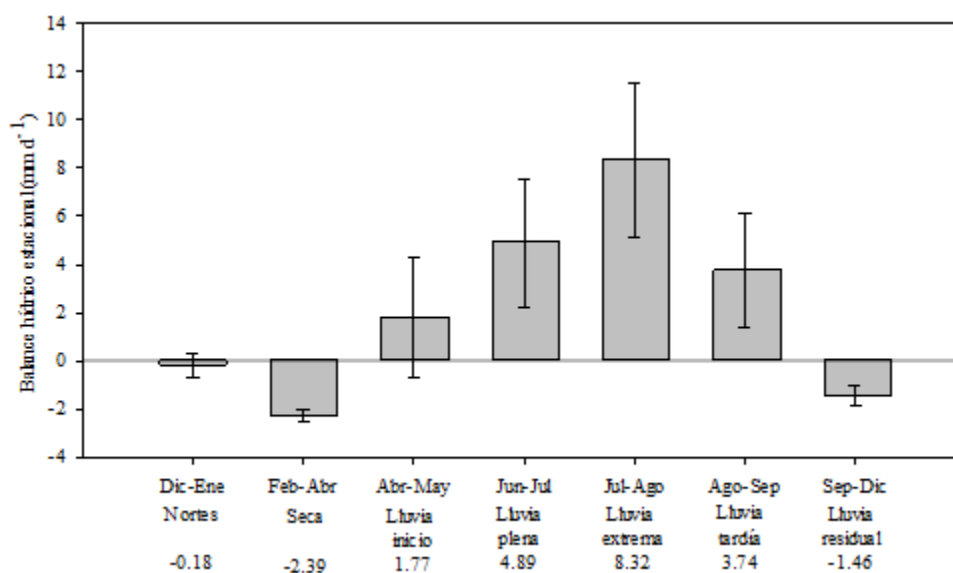


Figura 2: Balance hídrico estacional, estaciones y meses correspondiente a las fechas de corte



Evapotranspiración (ET)

El cálculo se realizó a partir de la diferencia de precipitación pluvial (mm día^{-1}) menos evaporación (mm día^{-1}), con un coeficiente de cultivo de $0.82^{(17)}$.

Rendimiento de materia seca

La estimación de este parámetro se realizó mediante la cosecha de biomasa total disponible de árbol a una altura de 1.5 m en cada intervalo de corte, se cosechó todo el follaje de los árboles que constituía crecimiento nuevo (hojas y tallos tiernos, menores a 5 mm de diámetro). El forraje cosechado en cada fecha de corte por tratamiento se secó en una estufa de aire forzado a 100°C por 24 h. El material seco se pesó en una balanza analítica y determinó la producción de materia seca (MS) por cada corte, para estimar el rendimiento de MS el número de arbustos se calculó por hectárea basado en la distancia dentro y entre las filas, resultando en una densidad de siembra de $1,600$ arbustos ha^{-1} .

Composición bioquímica

Las muestras se secaron en estufa de aire forzado a 55°C hasta peso constante. Se molieron en molino tipo Wiley con malla de 2 mm. Procedimientos estándar del AOAC⁽¹⁸⁾ se usaron para medir contenidos de MS, cenizas (CEN), extracto etéreo (EE) y proteína cruda (PC). Las fracciones de nitrógeno se determinaron por las técnicas descritas por Licitra *et al*⁽¹³⁾: Nitrógeno no proteico (NNP); proteína soluble (PS); proteína en paredes celulares (PIDN); proteína indigestible (PIDA); fibra detergente neutra (FDN) y fibra detergente ácido (FDA) por Van Soest⁽⁷⁾, lignina por Goering y Van Soest⁽¹⁹⁾.

Fracciones de carbohidratos

Los carbohidratos totales y las fracciones de carbohidratos disponibles se estimaron con las ecuaciones 1, 2 y 3.

$$\text{Carbohidratos totales (CT, \%MS)} = 100 - \text{PC} - \text{EE} - \text{cenizas} - \text{lignina} \quad (1)$$

$$\text{Carbohidratos no fibrosos (CNF, \%MS)} = 100 - \text{Cenizas} - \text{EE} - \text{PC} - (\text{FDN libre de PC}) \quad (2)$$

$$\text{Carbohidratos fibrosos (CF, \%MS)} = (\text{FDN libre de PC}) - \text{lignina} \quad (3)$$

Fracciones de proteínas

La estimación de las fracciones de proteína se presenta como esquema en el Cuadro 1.

Cuadro 1: Equivalencias de las fracciones bioquímicas proteicas con las fracciones nutricionales proteicas

Fracciones bioquímicas	Fracción nutricionales
Nitrógeno * 6.25	Proteína cruda
NNP	Nitrógeno no proteico (solubilidad inmediata)
PC – PIDN	PS es un paso para obtener la proteína verdadera soluble (PVS)
PS – NNP	PVS (solubilidad rápida e intermedia)
PIDN - PIDA	Proteína verdadera en FDN (solubilidad lenta)
PIDA	Proteína indigestible (insoluble)

PIDN= proteína insoluble en detergente neutro; PIDA= proteína insoluble en detergente ácido.

Diseño experimental y análisis estadístico

Las variables de rendimiento, composición bioquímica, fracciones de carbohidratos y proteínas disponibles se sometieron a análisis de varianza para un diseño de bloques completamente al azar con siete tratamientos y tres repeticiones por tratamiento. Se utilizó el procedimiento GLM del programa SAS versión 9.1⁽²⁰⁾. Las medias de cuadrados mínimos de los tratamientos fueron estimadas con la opción LSMEANS, mientras que las comparaciones entre ellas se realizaron mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Adicionalmente se utilizó el programa Sigma Plot versión 15.0⁽²¹⁾ para análisis de regresión y elaboración de gráficas.

Resultados y discusión

Balance hídrico estacional (BHE)

El BHE, aunque influye determinantemente sobre las estaciones del año y el comportamiento de las plantas, las otras variables fisiográficas condicionan el efecto del BHE, particularmente el estado hídrico del suelo, la temperatura, humedad y luminosidad. El BHE negativo durante las épocas de "Nortes" y Seca se relaciona con una disminución en la temperatura ambiental y la luminosidad. En contraste, el BHE positivo en las temporadas de Lluvia plena y tardía se asocia con temperaturas y niveles de luminosidad mayores. Durante las Lluvia inicio, a pesar de que el BHE es positivo, el suelo permanece deshidratado y compactado debido a los seis meses previos de sequía. En el caso de las Lluvia residual, aunque el BHE es negativo, el suelo retiene humedad residual, resultado de seis meses consecutivos de precipitaciones. Por último, en la estación de Lluvia extrema, se observa un exceso de lluvia, humedad, temperatura y luminosidad.

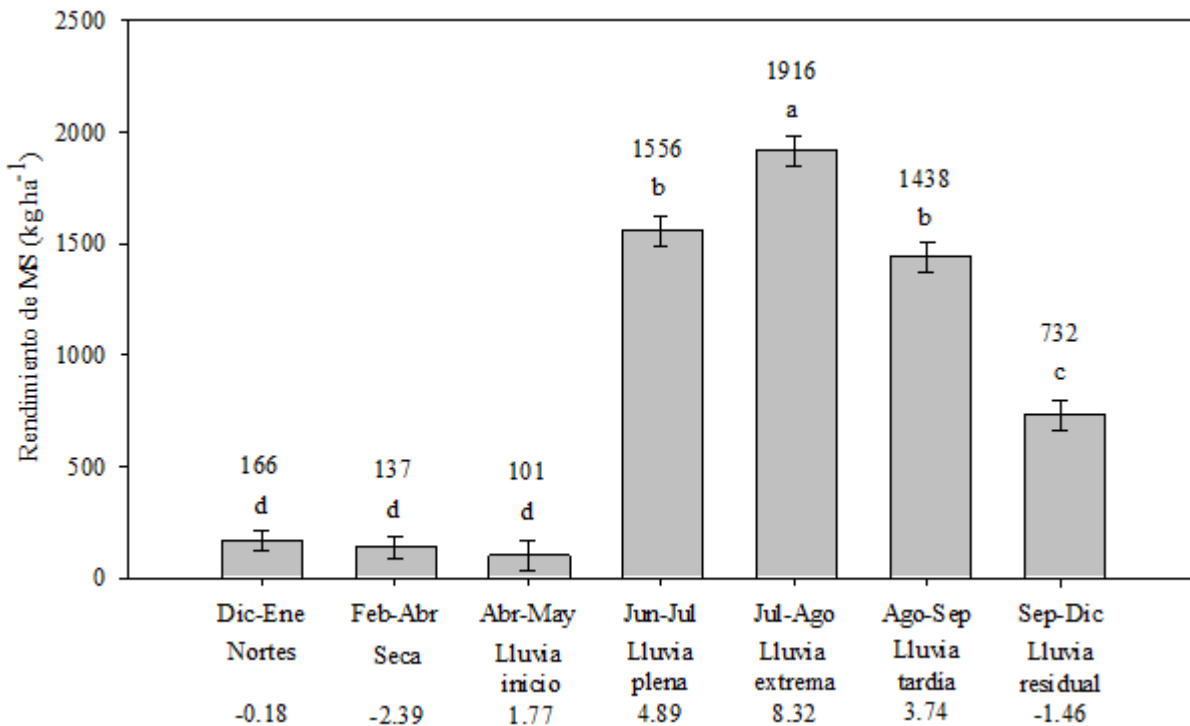
En su conjunto, las respuestas en rendimiento, composición bioquímica y calidad nutricional de *Leucaena leucocephala* son difíciles de explicar. De manera organizada se harán

comparaciones entre estaciones de interés, así: “Nortes” y Seca vs Lluvia plena y tardía; lluvia inicio vs Lluvia residual; y lluvia extrema se discutirá aparte.

Rendimiento de MS

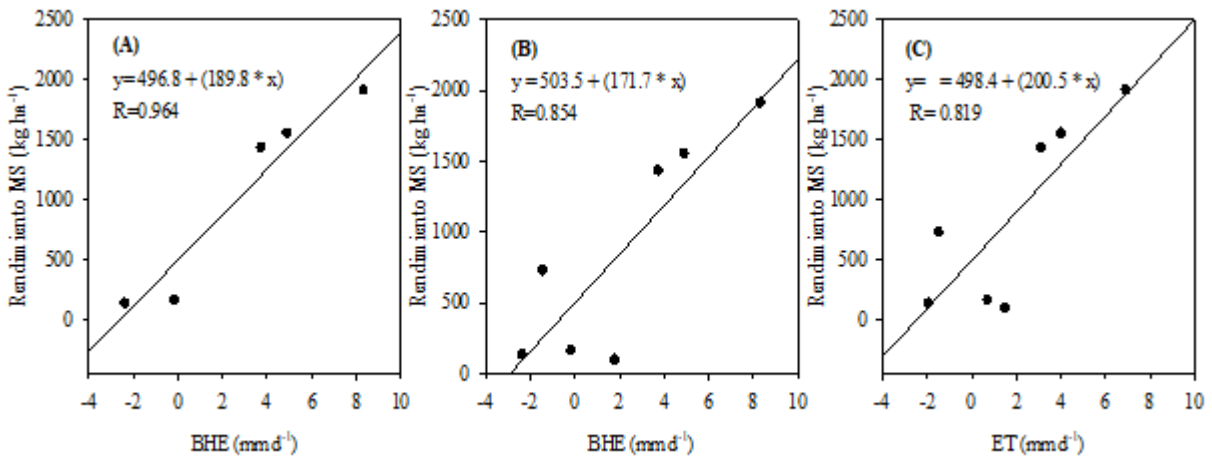
En las estaciones de lluvia plena y tardía, con más de 3 mm de precipitación promedio diario durante la etapa de crecimiento de *Leucaena leucocephala* la producción de MS rebasó los 1,000 kg ha⁻¹ (Figura 3), y en las estaciones de “Nortes” y Seca con BHE negativo el rendimiento de MS es de apenas de 150 kg ha⁻¹ aproximadamente. En la estación de Lluvia inicio el BHE ambiental es positivo (1.77 mm día⁻¹) pero solo permite rendimientos de MS de 100 kg ha⁻¹, se presume que el estrés hídrico del suelo y su compactación pudieran estar limitando el rendimiento. Durante el período de lluvia residual, aunque el BHE ambiental es negativo (-1.46 mm día⁻¹), es posible que la humedad residual en el suelo esté permitiendo rendimientos de MS de alrededor de los 750 kg ha⁻¹. Cuando el BHE es mayor a 8 mm el rendimiento casi llega a los 2,000 kg ha⁻¹. Potenciado quizás por temperatura, humedad y luminosidad altas propias del verano.

Figura 3: Rendimiento de MS (kg ha⁻¹) por corte de 42 días en cada estación del año clasificada por balance hídrico estacional (BHE)



Al regresar el BHE sobre el rendimiento de MS de *Leucaena leucocephala* (Figura 4), se aprecian tasas de crecimiento positivas con relación al BHE. A excepción de los períodos de transición al inicio (abr-may) y al final de las lluvias (sep-dic). Sin considerar estos períodos de transición, los rendimientos de MS (kg ha^{-1}) de *L. leucocephala* fueron de: 137, 166, 1,438, 1,556 y 1,916 para los BHE (mm día^{-1}) de: -2.39, -0.18, 3.74, 4.89 y 8.32. Estos BHE equivalen a evapotranspiración (ET) (mm día^{-1}) de: -1.51, 0.20, 3.24, 4.14 y 6.80 utilizando la ecuación $y = 0.7756x + 0.3436$; $r^2 = 0.93$ donde: $x = \text{BHE}$; $y = \text{ET}$. Al-Mefleh *et al*⁽³⁾ reportan rendimientos de *L. leucocephala* de 306, 676, 724, 839 y 1173 a ET de: 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 y 1.25, rangos que caen dentro de ET de 0.7 a 3.1 del presente estudio.

Figura 4: Regresión del balance hídrico estacional (BHE, mm d^{-1}) sobre el rendimiento de MS (kg ha^{-1}) de *Leucaena leucocephala*



(A) se excluyeron los valores de transición (abr-may) y (sep-dic) en donde la condición hídrica del suelo influye sobre el rendimiento. (B) se incluyen las 7 estaciones del año clasificadas por BHE. (C) se regresa el rendimiento de MS sobre la evapotranspiración (ET, mm d^{-1}).

Composición bioquímica

Todas las variables bioquímicas se ven afectadas por el BHE. Se observa una tendencia a que las variables bioquímicas se diluyen con BHE+ y se concentran con BHE- (Cuadro 2). Es posible que este comportamiento esté asociado al rendimiento de MS de la planta. A excepción de EE y lignina que se concentran con BHE+ y se diluyen con BHE-. Es probable que estas variables estén en consonancia con el metabolismo de la planta y sirvan de secuestro de carbono y de hidrógeno. Nitrógeno total (%MS) es considerablemente alto en las estaciones de Nortes y Seca con BHE- en comparación con las estaciones de Lluvia plena y tardía con BHE+. Pudiendo estar asociado este comportamiento a mayor crecimiento y

metabolismo con BHE+ que diluye y agota este nutriente en contraste con BHE- con menor crecimiento y tasa metabólica, que concentra y reserva al nitrógeno⁽²²⁾. En general, el déficit hídrico (BHE-) mejora la calidad del forraje debido a que los nutrientes se concentran, el desarrollo de la planta se ralentiza o cesa y se reduce la transpiración⁽²²⁾.

Cuadro 2: Composición bioquímica de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit cv. Cunningham por época del año clasificada por balance hídrico estacional (BHE)

Mes	Dic- Ene	Feb- Abr	Abr- May	Jun- Jul	Jul- Ago	Ago- Sep	Sep- Dic		
Época	Nortes	Seca	LL-in	LL-pl	LL-ex	LL-ta	LL-re	CME	Valor P
BHE, mm d⁻¹	-0.18	-2.39	1.77	4.89	8.32	3.7	-1.46		
Cen	7.7 ^a	7.2 ^{ab}	6.7 ^{abc}	5.5 ^c	6.9 ^{abc}	5.9 ^{bc}	7.4 ^{ab}	0.64	0.0016
EE	3.2 ^{bc}	2.6 ^c	5.7 ^a	3.5 ^{bc}	4.5 ^{ab}	3.8 ^{bc}	2.8 ^c	0.53	<.0001
PC	28.6 ^a	28.4 ^a	25.8 ^b	20.4 ^d	27.0 ^b	22.7 ^c	21.8 ^{cd}	0.57	<.0001
NNP	6.5 ^a	5.8 ^{ab}	4.7 ^{ab}	5.3 ^{ab}	6.1 ^a	5.6 ^{ab}	4.1 ^b	0.78	0.0080
FDN	40.8 ^b	37.9 ^c	33.2 ^d	35.8 ^{cd}	36.3 ^c	41.7 ^{ab}	44.2 ^a	1.17	<.0001
FDA	23.8 ^a	24.2 ^a	24.8 ^a	27.5 ^a	25.9 ^a	22.2 ^a	25.9 ^a	2.87	0.3691
PIDN	1.6 ^b	1.5 ^b	0.8 ^c	0.7 ^c	1.6 ^b	1.4 ^b	2.5 ^a	0.16	<.0001
PIDA	0.4 ^{bc}	0.5 ^{abc}	0.7 ^a	0.4 ^{bc}	0.8 ^a	0.3 ^c	0.8 ^a	0.13	0.0009
Lig	9.9 ^c	7.6 ^c	11.3 ^b	12.1 ^{ab}	11.5 ^b	11.6 ^b	14.9 ^a	1.30	<.0001

LL-in lluvia inicio; LL-pl= lluvia plena; LL-ex= lluvia extrema; LL-ta= lluvia tardía; LL-re= lluvia residual. Cen= cenizas; EE= extracto etéreo; PC= proteína cruda; NNP= nitrógeno no proteico; FDN= fibra detergente neutro; FDA= fibra detergente ácido; PIDN= proteína insoluble en detergente neutro; PIDA= proteína insoluble en detergente ácido; Lig= lignina. CME= cuadrado medio del error.

^{abcd} Literal diferente en el mismo renglón indica diferencia estadística Tukey ($P \leq 0.05$).

La FDN tiende a concentrarse con BHE- y diluirse con BHE+. Contrario a lo que sucede con lignina que se diluye con BHE- y se concentra con BHE+. Si se expresara a la lignina como porcentaje de la FDN el sinergismo potenciaría a la indigestibilidad de la FDN en condiciones de BHE+. Varios autores coinciden en que la falta de agua tiende a retardar el desarrollo de la planta y por lo tanto retrasar la madurez, con el resultado de que la digestibilidad se incrementa y el rendimiento de MS se reduce^(23,24,25).

Fracciones de carbohidratos

La disponibilidad de los nutrientes también se afecta por el BHE. Aunque los carbohidratos y las proteínas tienen comportamiento contrastante, debido a que las proteínas se sintetizan a partir de los carbohidratos (a mayor concentración proteica menor concentración de carbohidratos, particularmente los no fibrosos). En condiciones de lluvia plena (4.9 mm d⁻¹) y lluvia tardía (3.7 mm) los carbohidratos totales (CT) muestran los valores más altos. En

estos mismos períodos la PC presenta los valores más bajos (Cuadro 3). En Nortes *Leucaena leucocephala* tiene los CT más bajos y la PC más alta. En condiciones extremas como son final de la estación Seca (abr-may) y el “pico” de la estación de Lluvias (jul-ago) los CT caen significativamente, sin cambios en la PC. Quizás los carbonos busquen otra ruta como pudiera ser hacia cutina o taninos. Y en las condiciones de Lluvia tardía y residual la PC disminuye significativamente, sin cambios en los CT durante el mismo período, quizás por el estado fenológico (madurez) de la planta. La composición de los CT también se modifica por el BHE. Aproximadamente la relación CNF:CF es 50:50. Aunque en los períodos de Lluvias inicial, plena y extrema los CNF (%CT) son más abundantes en una relación 60:40; proporcional e inversamente los CF (%CT) son significativamente más altos en invierno y secas en comparación con Lluvia inicio, plena y extrema. Al coincidir estos carbohidratos fibrosos (celulosa y hemicelulosa principalmente) con menor proporción de lignina, se espera que sean más disponibles para la fermentación ruminal.

Cuadro 3: Calidad nutricional de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit cv. Cunningham por época del año clasificada por balance hídrico estacional (BHE)

Mes	Dic- Ene	Feb- Abr	Abr- May	Jun- Jul	Jul- Ago	Ago- Sep	Sep- Dic	CM	Valor P
Época	Nortes	Seca	LL-in	LL-pl	LL-ex	LL-ta	LL-re		
BHE mmd ⁻¹	-0.18	-2.39	1.77	4.89	8.32	3.7	-1.46		
Carbohidratos									
CT, MS	50.6 ^b	54.1 ^{ab}	50.6 ^b	58.4 ^a	50.1 ^b	56.0 ^a	53.0 ^{ab}	2.18	0.0004
CNF, MS	21.3 ^c	25.4 ^{bc}	29.5 ^b	35.5 ^a	26.9 ^b	27.3 ^b	26.3 ^b	1.91	<.0001
CF, MS	29.3 ^a	28.7 ^{ab}	21.0 ^c	22.9 ^c	23.2 ^c	28.7 ^{ab}	26.7 ^b	0.91	<.0001
CNF, CT	41.9 ^e	46.9 ^{de}	58.4 ^{ab}	60.7 ^a	53.7 ^{bc}	48.7 ^{cd}	49.6 ^{cd}	2.15	<.0001
CF, CT	58.1 ^a	53.1 ^{ab}	41.6 ^{de}	39.3 ^e	46.3 ^{cd}	51.3 ^{bc}	50.4 ^{bc}	2.15	<.0001
Proteínas									
PC, MS	28.6 ^a	28.4 ^a	25.8 ^b	20.4 ^d	27.0 ^b	22.7 ^c	21.8 ^{cd}	0.57	<.0001
NNP, PC	22.6 ^{ab}	20.3 ^{ab}	18.2 ^b	25.9 ^a	22.6 ^{ab}	24.8 ^{ab}	18.9 ^b	2.75	0.0156
PVS, PC	71.8 ^{ab}	74.4 ^{ab}	78.5 ^a	70.7 ^b	71.5 ^{ab}	68.9 ^b	69.4 ^b	2.96	0.0082
F, PC	4.2 ^b	3.5 ^b	0.7 ^d	1.4 ^{cd}	3.1 ^{bcd}	4.8 ^b	8.2 ^a	3.73	<.0001
PI, PC	1.4 ^c	1.8 ^{bc}	2.6 ^{bc}	2.0 ^b	2.8 ^{ab}	1.4 ^c	3.5 ^a	0.47	<.0001

LL-in lluvia inicio; LL-pl= lluvia plena; LL-ex= lluvia extrema; LL-ta= lluvia tardía; LL-re= lluvia residual.

MS=materia seca; CT=carbohidratos totales; CNF= carbohidratos no fibrosos; CF= carbohidratos fibrosos;

PC= proteína cruda; NNP= nitrógeno no proteico; PVS= proteína verdadera soluble; PF= proteína asociada a la fibra potencialmente digestible; PI= proteína indigestible. CM= cuadrado medio del error.

^{abcd} Literal diferente en el mismo renglón indica diferencia estadística Tukey ($P \leq 0.05$).

Fracciones de proteínas

Las fracciones nitrogenadas no fueron muy susceptibles a los efectos del BHE (Cuadro 3). Si bien, consistentemente, la PVS y el NNP representan el 70 % y 20 % de la PC en *Leucaena leucocephala*, y que estas fracciones nitrogenadas son completamente degradadas en el rumen, prácticamente no fluctúan a lo largo del año. Tadros *et al*⁽²⁶⁾ también mostraron que la PC de las hojas de *Leucaena leucocephala* tienden a incrementarse con la irrigación, aunque los valores no fueron diferentes entre los niveles de riego (ET de: 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 y 1.25)⁽²⁶⁾. Particularmente en la estación de Lluvia residual coinciden el menor contenido de PC del cual la menor proporción es proteína soluble (PVS y NNP), y de la porción insoluble (PF) una cantidad considerable es indigestible (PI), catalogando así, a la proteína durante estos cuatro meses, de la peor calidad nutritiva. En las estaciones Nortes y Seca en donde se asocia alta disponibilidad del nitrógeno en el rumen y bajo contenido de carbohidratos solubles o no fibrosos (≤ 50 % de los CT) implica una limitación de energía para incorporar el N ruminal hacia síntesis de proteína microbiana. Lo que condiciona a dos situaciones; limitar el uso de *Leucaena leucocephala* en la alimentación de rumiantes para no exceder el N ureico en sangre o suplementar con carbohidratos solubles en la dieta para incrementar la síntesis de proteína microbiana, y minimizar el desperdicio de N en forma de urea. Castro-González *et al*⁽²⁷⁾ suplementó con *L. leucocephala* a vaquillas consumiendo pasto Taiwán (*Cenchrus purpureus*) para incrementar la síntesis ruminal de proteína microbiana (SRPM) y encontró que con 20 % de *L. leucocephala* en la ración se obtiene la máxima eficiencia. Con mayor cantidad de *L. leucocephala* se incrementa la excreción de N-ureico. Para mayores niveles de *L. leucocephala* en la ración Castro-González *et al*⁽²⁷⁾ sugieren incluir fuentes de CNF para capturar el N aportado por *L. leucocephala* y evitar pérdidas de N en la orina.

En condiciones tropicales el principal factor limitante del rendimiento y determinante de la concentración y variación de los nutrientes del forraje es el BHE que define las estaciones de lluvias y de secas. En este estudio las condiciones de Nortes y Seca así como las de Lluvias plenas y tardía permiten apreciar con claridad los efectos del BHE sobre rendimiento, composición bioquímica y calidad nutricional de *Leucaena leucocephala*, pero hay algunas condiciones en las que la hidratación del suelo como ocurre al final de las estaciones de Seca o de Lluvias influyen significativamente sobre el rendimiento y la calidad nutritiva del forraje, o en las condiciones álgidas del verano con exceso de lluvia, humedad, temperatura y luminosidad que hacen que la respuesta de la planta en rendimiento y calidad sea prácticamente impredecible, asociada esta condición también al fenómeno meteorológico conocido en la región como “*Canícula*”, que comienza unas semanas después del solsticio de verano y dura 40 días. Estas condiciones atmosféricas de extrema sensación térmica son difíciles para las personas y los animales aun cuando pueden buscar sombra. Pero las plantas están enterradas en el suelo y tienen que desarrollar mecanismos de defensa para su

sobrevivencia que pudieran estar a favor o en contra de la calidad nutritiva. En plantas de *Leucaena leucocephala* en crecimiento temprano con aportes de riego diario, cada tercer día o semanal, Jabasingh, 2017⁽²⁸⁾ reportó (en peso fresco g⁻¹) 28.6, 25.6 y 24.3 mg de PC; 11.6, 17.8 y 48.8 mg de carbohidratos solubles; y 11.7, 16.6 y 20 mg de prolina respectivamente; así, la tolerancia a la sequía puede deberse al ahorro gradual de carbohidratos solubles. Investigaciones anteriores señalan el rol protector que los carbohidratos solubles juegan a nivel de sistemas de membrana en general y de membrana mitocondrial en particular⁽²⁹⁾. Los carbohidratos y la prolina, con otras sustancias, contribuyen al fenómeno de modificación hidrolítica, que protege las membranas y sistemas enzimáticos por la reducción de su potencial hidrolítico para compensar el bajo potencial hídrico que se encuentra en las hojas⁽³⁰⁾, por lo anterior se entienden las fluctuaciones de las reservas energéticas entre las épocas de lluvias y sequías.

Conclusiones e implicaciones

En las estaciones de Nortes y Seca con BHE- los CNF disminuyen y la PVS aumenta. En las estaciones de Lluvias plena y tardía con BHE+ los CNF aumentan y la PVS disminuye. En las estaciones al final de la temporada de Seca y al final de la temporada de lluvias, aparentemente las condiciones hídricas del suelo son más determinantes del rendimiento y calidad nutritiva de *Leucaena leucocephala* que el balance hídrico estacional. Las condiciones extremas del verano “canícula” permiten máximo rendimiento de MS sin deterioro de la calidad nutritiva como indicativo de que *Leucaena leucocephala* tiene más potencial como forraje proteico para rumiantes. La composición bioquímica no es indicativa de calidad nutricional porque las fracciones que componen los carbohidratos y las proteínas del forraje son dinámicas, y se conjugan afectando la disponibilidad de estos nutrientes para el animal.

Agradecimientos y conflicto de interés

Trabajo parcialmente financiado por el Megaproyecto “Mejoramiento de la productividad, competitividad y sustentabilidad de la cadena productiva de leche de bovino en México” con clave de registro: SAGARPA-CONACYT-2010-144591. Como parte del subproyecto “Tecnología de alimentación para mejorar la productividad de bovinos lecheros en pastoreo en el trópico mexicano” en su Etapa 1 “Caracterización del valor nutritivo de los forrajes tropicales según la estructura del CNCPS para ganado lechero en pastoreo en trópico mexicano. Sección “Evaluación nutricional de leguminosas arbustivas forrajeras”.

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Literatura citada:

1. Muñoz-González JC, Huerta-Bravo M, Lara Bueno A, Rangel Santos R, de la Rosa Arana JL. Producción de materia seca de forrajes en condiciones de trópico húmedo en México. Rev Mex Cienc Pecu 2024;(16):3329-41. <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/400>.
2. Hernández NML. La agroclimatología: instrumento de planificación agrícola. Geograph 2017;(30):213-28. https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.1993301819.
3. Owen-Smith N. The comparative population dynamics of browsing and grazing ungulates. In: Gordon IJ, Prins HHT, editors. The ecology of browsing and grazing. Ecological studies. Springer, Berlin, Heidelberg. 2008:149–177. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72422-3_6.
4. Al-Mefleh NK, Tadros MJ. Influence of water quantity on the yield, water use efficiency, and plant water relations of *Leucaena leucocephala* in arid and semi-arid environment using drip irrigation system. Int J Irrig Water Manag 2010;5(1):1–8.
5. Salisbury FB, Ross CW. Plant Physiology. 4th. ed. Pub. Wadsworth. Belmont California, USA: Publishing CO; 1992.
6. Hsiao TC. Plant responses to water stress. Annu Rev Plant Biol 1973;24(24):519–70.
7. Van Soest P. Forage evaluation techniques. In: Nutritional ecology of the ruminant. Ithaca, NY: Cornell University Press.; 1994:108-121. <https://doi.org/10.7591/9781501732355-009>.
8. Cherney DJR. Characterization of forages by chemical analysis. In: Givens DI, *et al*, editors. Forage evaluation in ruminant nutrition. New York, USA. CABI Publishing; 2000:281-300. <https://doi.org/10.1079/9780851993447.0281>.
9. Cherney DJ, Parsons D. Predicting forage quality. In: Kenneth J. *et al*, editor(s). Forages Sci Grassl Agric. vol. II. John Wiley & Sons, Ltd; 2020:687–99. <https://doi.org/10.1002/9781119436669.ch38>.
10. Higgs RJ, Chase LE, Ross DA, Van Amburgh ME. Updating the Cornell Net Carbohydrate and Protein System feed library and analyzing model sensitivity to feed inputs. J Dairy Sci 2015;98(9):6340–60. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-9379>.
11. Shimada MA. Nutrición animal. 4ta ed. México: Trillas; 2017.
12. Katoch R. Forage quality components. In: Katoch R, editor. Tech Forage Qual Anal. Singapore: Springer Nature; 2023:17–32. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6020-8_4.

13. Licitra G, Hernandez TM, Van Soest PJ. Standardization of procedures for nitrogen fractionation of ruminant feeds. *Anim Feed Sci Technol* 1996;57(4):347–58. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(95\)00837-3](https://doi.org/10.1016/0377-8401(95)00837-3).
14. Verdecia DM, Herrera RS, Ramírez JL, Leonard I, Bodas R, Andrés S, *et al.* Effect of age of regrowth, chemical composition and secondary metabolites on the digestibility of *Leucaena leucocephala* in the Cauto Valley, Cuba. *Agrofor Syst* 2020;94(4):1247–53. <http://doi.org/10.1007/s10457-018-0339-y>.
15. García E. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 5ta ed. México. Instituto de Geografía. UNAM; 2004.
16. CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. Base de datos climatológica. 2021.
17. Pereira LS, Paredes P, Espírito-Santo D, Salman M. Actual and standard crop coefficients for semi-natural and planted grasslands and grasses: a review aimed at supporting water management to improve production and ecosystem services. *Irrig Sci* 2023. <https://doi.org/10.1007/s00271-023-00867-6>.
18. AOAC. Official methods of analysis. 15th ed. Arlington, VA, USA: Association of Official Analytical Chemists. 1990.
19. Goering HK, Van Soest PJ. Forage fiber analyses: (apparatus, reagents, procedures, and some applications). Washington, D.C: Agricultural Research Service, USDA. 1970.
20. SAS. SAS User's Guide: Statistics (version 9.1). Cary NC, USA: SAS Inst. Inc. 2002.
21. SigmaPlot. User's Manual: the simplest way to analyze and graph data. Systat Software (version 15.0) Inc, San José, California. 2022.
22. Grant K, Kreyling J, Dienstbach LFH, Beierkuhnlein C, Jentsch A. Water stress due to increased intra-annual precipitation variability reduced forage yield but raised forage quality of a temperate grassland. *Agric Ecosyst Environ* 2014;186:11–22. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.01.013>.
23. Hernández HM, López OS, Jarillo RJ, Ortega E, Pérez ES, Díaz RP *et al.* Rendimiento y calidad nutritiva del forraje en un sistema silvopastoril intensivo con *Leucaena leucocephala* y *Megathyrsus maximus* cv. Tanzania. *Rev Mex Cienc Pecu* 2020;11(1):53-69. <https://cienciaspecuarias.inifap.gob.mx/index.php/Pecuarias/article/view/4565>.
24. Martínez MM, Cruz AR, Bueno AL, Romero LAM, Bravo MH, Gómez MU. Composición nutricional de *Leucaena* asociada con pasto estrella en la Huasteca Potosina de México. *Rev Mex Cienc Agríc* 2016;(16):3343–3355.

25. Casanova-Lugo F, Petit-Aldana J, Solorio-Sánchez FJ, Parsons D, Ramírez-Avilés L. Forage yield and quality of *Leucaena leucocephala* and *Guazuma ulmifolia* in mixed and pure fodder banks systems in Yucatan, Mexico. *Agrofor Syst* 2014;88(1):29–39. <https://doi.org/10.1007/s10457-013-9652-7>.
26. Tadros MJ, Al-Mefleh NK, Chandler P. Morphology, productivity and forage quality of *Leucaena leucocephala* as influenced by irrigation under field conditions. *Agrofor Syst* 2012;86(1):73–81. <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9539-z>.
27. Castro-González A, Montero-Lagunes M, Ríos-Utrera Ángel, Ayala-Burgos AJ, Juárez-Lagunes FI. *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit as protein supply for heifers. *Agro Productividad* 2022. <https://doi.org/10.32854/agrop.v15i7.2324>.
28. Jabasingh C. Water stress condition on early growth and biochemical contents of *Leucaena leucocephala* (Lam.) De Wit. *J Acad Ind Res* 2017;5(11):156-158.
29. Perlikowski D, Czyżniejewski M, Marczak Ł, Augustyniak A, Kosmala A. Water deficit affects primary metabolism differently in two *Lolium multiflorum*/*Festuca arundinacea* introgression forms with a distinct capacity for photosynthesis and membrane regeneration. *Front Plant Sci* 2016;(7):1063. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01063>.
30. Blum A. Osmotic adjustment and growth of barley genotypes under drought stress. *Crop Sci* 1989;29(1):230–3. <https://doi.org/10.2135/cropsci1989.0011183X002900010052x>.