



DOI: 10.29298/rmcf.v17i97.1637

Artículo de investigación

Ecuaciones para la estimación de biomasa de *Tiquilia canescens* (DC.) A. T. Richardson en matorrales desérticos

Equations for biomass estimation of *Tiquilia canescens* (DC.) A. T. Richardson in desert shrublands

Pedro Jurado Guerra¹, Gabriel Sosa Pérez¹, José Luis García Pérez^{1*}, Alan Álvarez Holguín²

Fecha de recepción/Reception date: 8 de febrero de 2026.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 4 de mayo de 2026.

¹Campo Experimental La Campana, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México.

²Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Zootecnia y Ecología. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: garciap.luis@inifap.gob.mx

*Corresponding author; e-mail: garciap.luis@inifap.gob.mx

Resumen

Tiquilia canescens es una planta arbustiva de los matorrales desérticos del norte de México, debido a su abundancia puede desempeñar un papel importante en la captura y almacén de carbono. Sin embargo, no existen funciones alométricas para estimar su biomasa. El objetivo fue generar ecuaciones para estimar la biomasa aérea, radicular y total de *T. canescens*. Se realizaron mediciones alométricas en 49 plantas presentes en matorrales desérticos de los municipios Aldama y Coyame del Sotol, Chihuahua. Se evaluó el ajuste de los modelos lineal, alométrico potencial linealizado y exponencial linealizado para predecir la biomasa. Con base en estadísticos de ajuste como mayores R^2 ajustadas y menores criterios de información de Akaike (AIC), las variables con mayor capacidad predictiva de la biomasa total fueron el diámetro largo de copa (DLC, 47.9 ± 18.0 cm), el diámetro basal corto del tallo (DCT, 20.3 ± 11.7 mm) y la cobertura aérea (CA, $1\,754.4 \pm 1\,342.8$ cm²). El modelo potencial linealizado presentó el mejor ajuste (menor RECM y mayor Pseudo- R^2). Se realizó una validación cruzada para probar la capacidad predictiva de las ecuaciones. Las expresiones finales para estimar la biomasa aérea, radicular y total de *T. canescens* incluyeron solamente el DLC, las cuales fueron robustas, y confiables para su uso en matorrales desérticos de Chihuahua y sitios ecológicamente similares del norte-centro de México.

Palabras Clave: Desierto Chihuahuense, ecuaciones alométricas, hierba de la virgen, matorral micrófilo, matorral rosetófilo, modelos lineales.

Abstract

Tiquilia canescens is a shrub found in the desert scrublands of northern Mexico; because it is so abundant, it may play an important role in carbon sequestration and storage. However, there are no allometric functions for estimating its biomass. The objective of this study was to design equations to estimate the aboveground, root and total biomass of *T. canescens*. Allometric measurements were taken on 49 plants found in desert scrublands in the *Aldama* and *Coyame del Sotol* municipalities, state of *Chihuahua*. The fit of the linear, linearized potential allometric, and linearized exponential models for predicting biomass was evaluated. Based on fit statistics such as higher adjusted R^2 values and lower Akaike Information Criteria (AIC) values, the variables with the greatest predictive power for total biomass were the long crown diameter (LCD, 47.9 ± 18.0 cm), the short basal stem diameter (SBSD, 20.3 ± 11.7 mm), and the canopy cover (CC, $1\,754.4 \pm 1,342.8$ cm²). The linearized potential model provided the best fit (lower RMSE and higher Pseudo- R^2). Cross-validation was performed to test the predictive power of the equations. The final equations for estimating the aboveground, root, and total biomass of *T. canescens* included only the LCD, and these equations were robust and reliable for use in the Chihuahuan Desert scrubs and ecologically similar sites in North-central Mexico.

Keywords: Chihuahuan Desert, allometric equations, woody crinklemat, microphyllous scrub, rosette-forming scrub, linear models.

Introducción

Los matorrales xerófilos del norte de México son ecosistemas de gran importancia económica y ambiental, representan el tipo de vegetación más grande del país porque cubren 40 % del territorio nacional (Rzedowsky, 2006). Estos matorrales, utilizados principalmente para la ganadería, se caracterizan por crecer en suelos pobres, con escasa precipitación y una alta degradación (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2016). En esos ecosistemas, las principales asociaciones vegetales, por la superficie que ocupan, son el matorral micrófilo donde dominan *Larrea tridentata* (DC.) Coville (gobernadora) y *Flourensia cernua* DC. (hojasén); además del matorral rosetófilo, con predominio de *Agave lechuguilla* Torr. (lechuguilla) y *Dasyllirion wheeleri* S. Watson ex Rothr. (sotol) (Granados-Sánchez et al., 2011).

Los múltiples servicios que brindan estos ecosistemas desérticos son fundamentales para el bienestar, la salud, los medios de vida y la supervivencia de casi 60 % de la población de México (Briones *et al.*, 2020). En el matorral rosetófilo se encuentran plantas de uso industrial como el sotol y la lechuguilla (Rzedowski, 2006) y otras como la hierba de la virgen (*Tiquilia canescens* (DC.) A. T. Richardson), que sin un gran valor económico tiene un papel ecológico importante, especialmente para el almacenamiento y captura de carbono. No obstante, la influencia de los matorrales desérticos en el contexto del cambio climático ha sido poco investigada en el norte de México (Briones *et al.*, 2018).

Los problemas para la estimación de los almacenes de carbono de la vegetación xerófila son su alta diversidad de arbustos y la escasa investigación sobre las especies presentes. Existen algunas ecuaciones generales para calcular la biomasa en arbustos (Conti *et al.*, 2019; Paz-Pellat *et al.*, 2021), así como algunas ecuaciones alométricas específicas para determinar la biomasa de la gobernadora, candelilla (*Euphorbia antisiphilitica* Zucc.) y lechuguilla (Flores-Hernández *et al.*, 2020; Hernández-Ramos *et al.*, 2019; Ludwig *et al.*, 1975). Sin embargo, no se han registrado trabajos similares para *T. canescens*. Este arbusto perenne de 0.25 a 0.5 m de altura, muy ramificado desde su base, y con valor forrajero regular (Melgoza-Castillo *et al.*, 2016; Mellado *et al.*, 2005); su gran abundancia en el Desierto Chihuahuense (Moore & Jansen, 2007) podría representar un considerable almacén de carbono. El objetivo de este trabajo fue generar ecuaciones alométricas para estimar la biomasa aérea, radicular y total de *T. canescens* en matorrales desérticos de Chihuahua, México.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en dos sitios, uno en el municipio Aldama y otro en el municipio Coyame del Sotol, en el estado de Chihuahua, México (Figura 1). Ambos se ubican en la parte central-oriental del estado, dentro de la Provincia de Sierras y Llanuras del Norte. El clima es seco-semicálido, con temperatura de 18 °C y precipitación anual de 300 mm (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI], 2010a, 2010b). Los suelos dominantes son calcisoles y leptosoles de tipo aluvial, pertenecientes a la región hidrológica del Bravo-Conchos. La vegetación en Aldama corresponde a un matorral micrófilo (gobernadora y hojasén), y en Coyame predomina el matorral rosetófilo (lechuguilla y sotol), los dos se encuentran en lomeríos bajos.

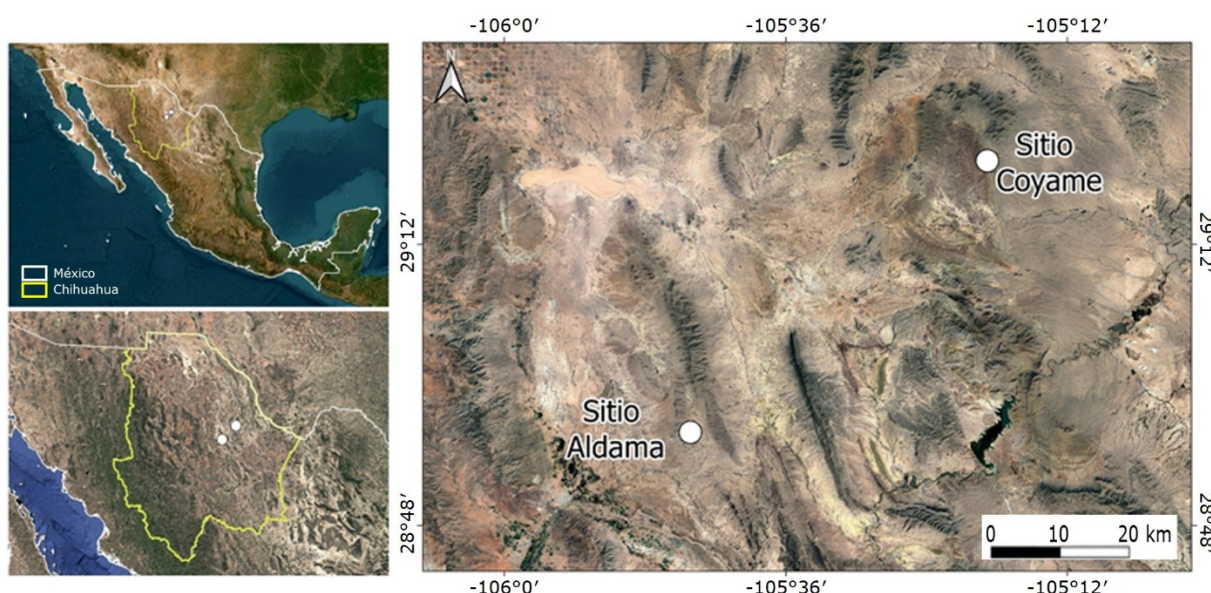


Figura 1. Ubicación de los sitios de muestreo de *Tiquilia canescens* (DC.) A. T. Richardson en matorrales desérticos de Chihuahua, México.

Muestreo de campo

Durante el mes de abril de 2023 se seleccionaron 49 plantas de *T. canescens* de diferentes tamaños para incluir un amplio intervalo de alturas y diámetros. A cada planta se le midió con un flexómetro (*Truper*® modelo ProLock de 5 m) el diámetro largo de copa (*DLC*, cm), el diámetro corto de copa (*DCC*, cm) y la altura total (*Alt*, cm) desde el suelo hasta la punta del arbusto. Enseguida, cada planta se cortó a ras de suelo para obtener la biomasa aérea; con un vernier digital (*Truper*® modelo CAL-6MP) se midió el diámetro largo del tallo basal (*DLT*, mm) y el diámetro corto del tallo basal (*DCT*, mm). Posteriormente, se extrajo la biomasa radicular, para ello se excavó alrededor de la planta lo más profundo posible para recolectar todas las raíces visibles. Se obtuvo la biomasa aérea y de raíces de 22 plantas en Aldama y 27 en Coyame del Sotol.

La biomasa recolectada por planta, se lavó para eliminar el polvo y se deshidrató durante 30 días en un invernadero a temperaturas máximas de 50.9 ± 0.5 °C; después se pasaron a un horno (*Riossa*® modelo HS) a 70 °C hasta alcanzar el peso anhidro. Finalmente, la parte aérea y la raíz de las plantas se pesaron en una balanza digital (*VELAB*® modelo VE 5000), con precisión de 0.1 g. La biomasa total por planta se obtuvo de la suma de la biomasa aérea y la radicular.

A partir de las variables alométricas medidas en campo, en gabinete se generaron las variables cobertura aérea de copa (*CA*), el biovolumen (*Bvol*) y el volumen de *Ludwig* (*VL*). Para la *CA* se asumió que la forma de la copa era elíptica, se utilizaron las ecuaciones de Conti et al. (2013):

$$CA = \pi \left(\frac{DLC}{2} \times \frac{DCC}{2} \right) \quad (1)$$

$$Bvol = CA \times Alt \quad (2)$$

$$VL = \frac{4}{3} \times \pi \times r^2 \times Alt \quad (3)$$

Donde:

CA = Cobertura aérea de la copa en cm^2

DLC = Diámetro largo de la copa en cm

DCC = Diámetro corto de la copa en cm

$Bvol$ = Biovolumen aparente en m^3

Alt = Altura de la planta en cm

VL = Volumen esferoide de *Ludwig* en m^3

r = Radio de la copa en cm

Las variables de $Bvol$ y VL implican un volumen aparente cuando se asume la forma del arbusto al de un cuerpo sólido específico. Para el $Bvol$ se consideró un morfotipo cilíndrico (Blanco-Oyonarte & Navarro-Cerrillo, 2003), para el VL el de un esferoide correspondiente a la mitad superior de la copa (Ludwig et al., 1975). Las variables obtenidas en campo y las generadas en gabinete fueron variables predictoras para estimar la biomasa aérea (BA), radicular (BR) y total (BT).

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de correlación de *Pearson* y un diagnóstico de colinealidad mediante el Factor de Inflación de Varianza (*FIV*) entre las variables predictoras (Neter *et al.*, 1983). Se evaluó la colinealidad con el ajuste de un modelo lineal múltiple con la *BT* como variable independiente, se excluyeron la *BA* y la *BR* porque son componentes de la *BT*. Debido a que se observó alta correlación y multicolinealidad estructural entre variables predictoras, sobre todo en las compuestas, considerando la practicidad en campo y el principio de parsimonia se decidió usar una ecuación simple con una sola variable (Cayuela & de la Cruz, 2022). Para seleccionar tal variable se consideraron los estadísticos de bondad de ajuste Criterio de Información de *Akaike* (*AIC*), R^2 ajustado (R^2_{aj}) y el Error Estándar Residual (*EER*).

Después de seleccionar a la mejor variable predictora, se evaluaron los modelos lineal, exponencial y potencial para la *BT*. Se utilizó el método de mínimos cuadrados ordinarios, por lo que fue necesario transformar los dos últimos modelos mediante aplicación de logaritmos. Las predicciones se transformaron a su escala original al aplicar un factor de corrección (*FC*) a la constante de la ecuación (Baskerville, 1972). La selección del mejor modelo se basó en la Raíz del Error Cuadrático Medio (*RECM*) y el *Pseudo- R^2* en la escala original (Baty *et al.*, 2015).

También, se realizó un análisis gráfico de los residuales para evaluar el supuesto de homocedasticidad. El mejor modelo seleccionado se ajustó a las variables *BA* y *BR*. La bondad de ajuste de las ecuaciones finales se evaluó con el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{aj}), la *RECM* y la significancia estadística ($p < 0.05$).

Para evaluar la capacidad predictiva de los modelos y descartar problemas de sobreajuste, dado el reducido tamaño de la muestra ($n=49$), se realizó un proceso de validación cruzada tipo *leave-one-out-cross validation* (James *et al.*, 2021). Durante este proceso las predicciones fueron retrotransformadas y corregidas secuencialmente a la escala original (g) para calcular la *RECM*, el error absoluto medio (*EAM*) y un coeficiente de determinación de validación (R^2_{cv}) (Parresol, 1999). Todos los análisis se realizaron en el programa *R* versión 4.2.1 (R Core Team, 2024).

Resultados y Discusión

Variables alométricas y biomasa

Los estadísticos de las variables predictoras e independientes de la biomasa de *T. canescens* se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Valores descriptivos de medidas alométricas y de biomasa de *Tiquilia canescens* (DC.) A. T. Richardson en matorrales desérticos de Chihuahua, México ($n=49$).

Estadístico	<i>Alt</i>	<i>DCC</i>	<i>DLC</i>	<i>DCT</i>	<i>DLT</i>	<i>CA</i>	<i>Bvol</i>	<i>VL</i>	<i>BA</i>	<i>BR</i>	<i>BT</i>
Media	34.7	40.8	47.9	20.3	24.2	1 754	0.073	0.098	161.9	35.1	197.0
Desv. Est.	10.9	16.2	18.0	11.7	14.5	1 343	0.079	0.106	175.0	37.4	209.2
Valor Mín.	16	13	21	4.2	5.3	224	0.004	0.007	10.5	1.6	12.1
Valor Máx.	61	82	91	52.6	60.4	5 789	0.335	0.449	620.3	183.4	748.9

Alt = Altura (cm); *DCC* = Diámetro corto de la copa (cm); *DLC* = Diámetro largo de la copa (cm); *DCT* = Diámetro basal corto del tallo (mm); *DLT* = Diámetro basal largo del tallo (mm); *CA* = Cobertura aérea de la copa (cm²); *Bvol* = Biovolumen de la planta (m³); *VL* = Volumen esferoide de *Ludwig* (m³); *BA* = Biomasa aérea (g planta⁻¹); *BR* = Biomasa radicular (g planta⁻¹); *BT* = Biomasa total (g planta⁻¹).

La población de *T. canescens* en la zona de estudio es de porte bajo porque la altura y diámetro de copa promedios son menores de 50 cm, los cuales son inferiores a los de otras plantas forrajeras similares como mariola (*Parthenium incanum* Kunth), cuyos valores, citados por Villalobos (2007), son ligeramente más altos (42.8 cm de altura y 61.2 cm de *DLC*). Los valores promedio de *BA* y *BR* en el presente estudio fueron superiores a los registrados para la misma especie por Hernández-Gómez et al. (2018)

en matorrales desérticos de Nuevo León y San Luis Potosí, con un promedio de 63.2 g planta⁻¹ y 4.4 g planta⁻¹, respectivamente; en presencia de una precipitación anual de 386 mm y temperatura de 17.2 °C. Hernández-Gómez *et al.* (2018) consignan una relación raíz-parte aérea de 0.07, la cual es menor al valor de 0.216 obtenido en la investigación que aquí se documenta. Estas diferencias pueden atribuirse a la variabilidad de las condiciones ecológicas y edáficas en cada sitio de estudio, ya que el crecimiento de raíces, tallos y hojas está influenciado por diversos factores como textura, estructura y compactación del suelo; así como por la disponibilidad de humedad y nutrientes (Barbour *et al.*, 1987; Kramer, 1983).

Selección de variables predictoras

Los coeficientes de correlación de *Pearson* entre variables independientes fueron significativos ($P \leq 0.001$) y evidenciaron una alta correlación (Cuadro 2). La mayoría de las variables originales y compuestas presentaron una alta correlación con la biomasa ($r=0.77$ a 0.92 ; $P < 0.0001$). La variable de menor correlación con la biomasa fue la altura ($r=0.70$; $P < 0.0001$), lo que anticipó su bajo potencial como variable predictora.

Cuadro 2. Matriz de correlación de variables alométricas y biomasa de *Tiquilia canescens* (DC.) A. T. Richardson en matorrales desérticos de Chihuahua ($n=49$).

Variable	Alt	DCC	DLC	DCT	DLT	CA	Bvol	VL
DCC	0.873							
DLC	0.881	0.963						
DCT	0.677	0.757	0.798					
DLT	0.669	0.749	0.789	0.982				
CA	0.868	0.979	0.963	0.768	0.770			
Bvol	0.876	0.935	0.903	0.713	0.719	0.977		
VL	0.878	0.935	0.906	0.715	0.722	0.978	0.999	
BA	0.764	0.867	0.892	0.851	0.854	0.912	0.884	0.886
BR	0.701	0.781	0.811	0.925	0.908	0.806	0.770	0.773
BT	0.764	0.865	0.892	0.878	0.877	0.908	0.878	0.880

Alt = Altura; *DCC* = Diámetro corto de la copa; *DLC* = Diámetro largo de la copa; *DCT* = Diámetro corto basal del tallo; *DLT* = Diámetro largo basal del tallo; *CA* = Cobertura aérea de la copa; *Bvol* = Biovolumen de la planta; *VL* = Volumen de *Ludwig*; *BA* = Biomasa aérea (g planta^{-1}); *BR* = Biomasa radicular (g planta^{-1}); *BT* = Biomasa total (g planta^{-1}).

Los valores del *FIV* en todas las variables predictoras fueron mayores a 10, lo que indicó una alta colinealidad (Neter et al., 1983). El menor valor correspondió a la altura con 18, valores superiores a 632 fueron para la cobertura aérea y ambos volúmenes, lo que sugiere alta multicolinealidad estructural, porque estas variables se calcularon a partir de los diámetros de copa (*DCC*, *DLC*) y de la altura. La alta correlación entre variables justificó el criterio de seleccionar una ecuación simple con una sola variable predictora, cuyos estadísticos usados para su selección se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Estadísticos de ajuste de las variables predictoras individuales con la biomasa total de *Tiquilia canescens* (DC.) A. T. Richardson.

Variable	R^2_{aj}	AIC	EER
Diámetro largo de copa (<i>DLC</i>)	0.862	57.57	0.4182
Diámetro corto basal del tallo (<i>DCT</i>)	0.858	58.76	0.4233
Cobertura aérea (<i>CA</i>)	0.845	63.31	0.4434
Volumen de <i>Ludwig</i> (<i>VL</i>)	0.829	67.90	0.4647
Biovolumen (<i>Bvol</i>)	0.827	68.56	0.4678
Diámetro largo basal del tallo (<i>DLT</i>)	0.825	69.25	0.4711
Diámetro corto de la copa (<i>DCC</i>)	0.793	77.50	0.5125
Altura (<i>Alt</i>)	0.636	105.11	0.6793

R^2_{aj} = Coeficiente de determinación ajustado; AIC = Criterio de Información de Akaike; EER = Error estándar residual.

La variable *DLC* presentó los mejores estadísticos de ajuste. Aunque el *DLC* y el *DCT* tuvieron criterios de bondad de ajuste estadísticamente equivalentes ($\Delta AIC < 2$), se seleccionó el *DLC* como la única variable predictora. En la *praxis*, la medición de la copa es rápida y no destructiva, en tanto que medir el diámetro basal del tallo se dificulta debido a la forma achaparrada de *T. canescens*. La tercera mejor variable fue *CA*; sin embargo, para obtenerla es necesario realizar dos mediciones (*DLC* y *DCC*), lo que implica una mayor inversión de tiempo.

Estudios similares en matorrales desérticos (Flores-Hernández *et al.*, 2020; Hernández-Ramos *et al.*, 2019; Maldonado-Ortiz *et al.*, 2022) han referido que el diámetro de copa es fundamental para predecir la biomasa de especies como la lechuguilla y la candelilla. Sin embargo, en otros taxones de ecosistemas desérticos, se ha observado que las variables más comunes para estimar la biomasa son las compuestas a partir del diámetro de copa y de la altura de la planta (Ludwig *et al.*, 1975; Rojas-García *et al.*, 2015).

En este estudio, el análisis de correlación y los estadísticos que se muestran en el Cuadro 3 revelan que la altura no es una variable predictora relevante. Ello contrasta con investigaciones para estimar biomasa en otras especies de arbustos desérticos

(Flores-Hernández et al., 2020; Hernández-Ramos et al., 2019; Ludwig et al., 1975; Maldonado-Ortiz et al., 2022), en los cuales la altura sola o combinada para formar una variable compuesta (por ejemplo, el volumen) ha demostrado alta capacidad como variable predictora.

Hernández-Gómez et al. (2018) analizaron la biomasa de *T. canescens* e indican que en un modelo cuadrático la altura ($R^2_{aj}=0.73$) fue la variable más significativa para tal estimación, mientras que el modelo con diámetro de copa presentó un ajuste moderado ($R^2_{aj}=0.51$). La baja influencia de la altura sobre la biomasa en el presente estudio puede explicarse, parcialmente, por el escaso crecimiento vertical (Cuadro 1), cuyas dimensiones en altura fueron similares tanto en ejemplares más jóvenes, identificados por los diámetros de tallo pequeños, como en ejemplares adultos con diámetros de tallo mayores, lo que se reflejó en una baja correlación entre ambas variables.

Ajuste de los modelos

Los estadísticos de ajuste de los tres modelos evaluados se presentan en el Cuadro 4, la relación entre *BT* y *DLC* se muestra en la Figura 2. La evaluación de los modelos evidenció que el potencial (linealizado con logaritmos) obtuvo el mejor ajuste para estimar la *BT*. Al retrotransformar las predicciones a la escala original y aplicar el *FC*, el modelo potencial tuvo el menor error predictivo ($RECM=75.963$) y la mayor proporción de varianza explicada ($Pseudo-R^2=0.865$). Aunque el modelo lineal presentó estadísticos regulares, su error fue de casi 18 unidades por arriba que el potencial linealizado; además, el modelo lineal presentó problemas de heterocedasticidad (Figura 3).

Cuadro 4. Estructura y estadísticos de bondad de ajuste de los modelos evaluados para la predicción de biomasa total (*BT*) a partir del diámetro largo de copa (*DLC*).

Modelo	Ecuación	<i>Pseudo-R</i> ²	<i>RECM</i>
Lineal	$BT = b_0 + b_1 \times DLC$	0.796	93.499
Potencial (Log)	$\ln(BT) = \ln(a) + b \times \ln(DLC)$	0.865	75.963
Exponencial	$\ln(BT) = \ln(a) + b \times DLC$	0.498	146.734

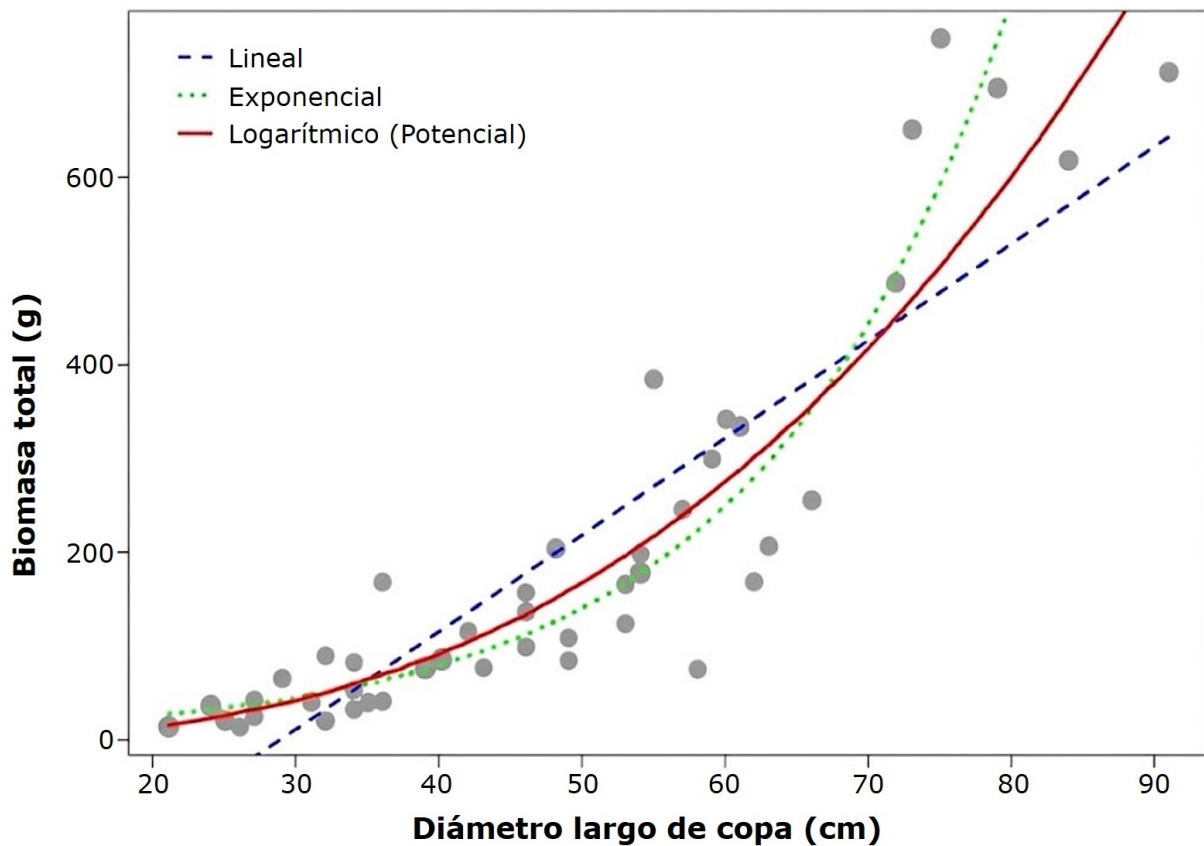


Figura 2. Relación entre la biomasa total de *Tiquilia canescens* (DC.) A. T. Richardson y el diámetro largo de copa, ajustando los modelos lineal, potencial (logarítmico) y exponencial ($n=49$).

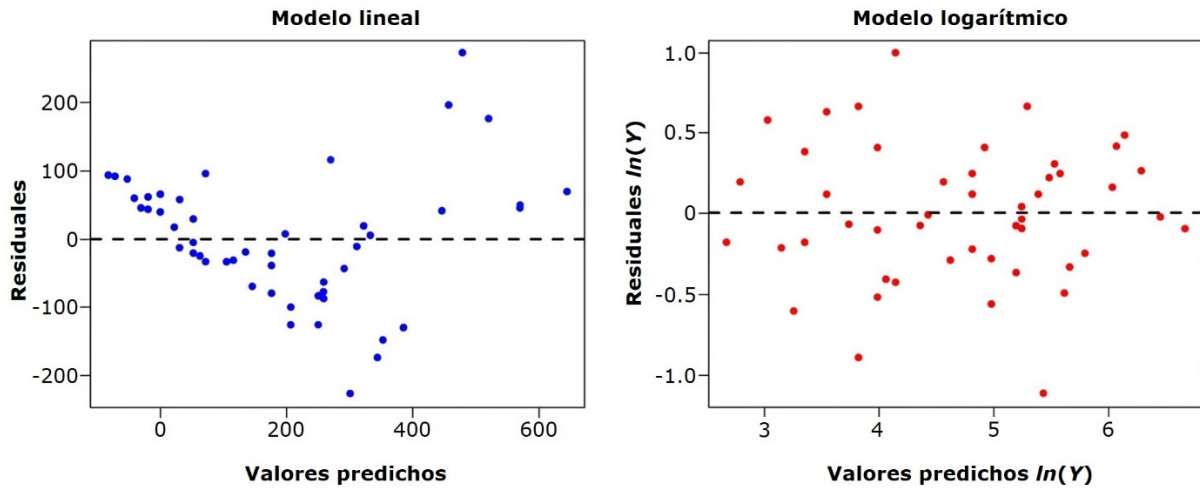


Figura 3. Comportamiento de los residuales *versus* predichos para los modelos lineal y potencial linealizado mediante aplicación de logaritmos.

El modelo lineal fue inadecuado para predecir la *BT* en plantas muy grandes o muy pequeñas. El modelo exponencial presentó un error muy alto, lo cual demostró que la biomasa de *T. canescens* no crece a un ritmo exponencial respecto al diámetro largo de copa, por lo que también se descartó. Por tanto, se seleccionó el modelo potencial linealizado para generar las ecuaciones finales en función del *DLC*, que predicen la *BT*, *BA* y *BR* (Cuadro 5).

Cuadro 5. Ecuaciones para estimar la biomasa aérea, radicular y total de *Tiquilia canescens* (DC.) A. T. Richardson en matorrales desérticos de Chihuahua.

Ecuación	R^2_{aj}	FC	$RECM$
$BA = 0.0028 \times DLC^{2.7566}$	0.866	1.090	75.96
$BR = 0.0014 \times DLC^{2.5596}$	0.797	1.130	21.29
$BT = 0.0039 \times DLC^{2.7235}$	0.862	1.091	60.76

BA = Biomasa aérea ($g\ planta^{-1}$); BR = Biomasa radicular ($g\ planta^{-1}$); BT = Biomasa total ($g\ planta^{-1}$); DLC = Diámetro largo de copa (cm); R^2_{aj} = Coeficiente de determinación ajustado; FC = Factor de corrección en la retrotransformación; $RECM$ = Raíz del error cuadrático medio.

Las ecuaciones basadas en el *DLC* resultaron altamente significativas ($p < 0.001$) para los componentes de biomasa en *Tiquilia canescens* (Cuadro 5). Las ecuaciones para la *BT* y *BA* mostraron una adecuada capacidad predictiva, ya que capturaron más de 86 % de la varianza observada, mientras que para la biomasa radicular tuvo una capacidad ligeramente menor ($R^2_{aj} = 0.79$). Los factores de corrección oscilaron entre 1.090 y 1.130, lo que indica un bajo sesgo de retrotransformación en los tres componentes. Los exponentes alométricos variaron entre 2.55 y 2.75, que corresponde a una acumulación de biomasa acelerada (alométrica positiva) conforme se incrementa la copa.

Los resultados concuerdan con un estudio sobre *Parthenium incanum* (Villalobos, 2007), cuyo *DLC* tiene una alta significancia para explicar la biomasa aérea, comparado con la altura. Otras investigaciones para estimar la biomasa aérea de plantas desérticas como la candelilla y lechuguilla (Flores-Hernández *et al.*, 2020; Hernández-Ramos *et al.*, 2019) señalan que las mejores funciones incluyen al menos las variables diámetro de copa y altura de planta, como variables predictoras. El modelo de *Ludwig* (Ludwig *et al.*, 1975) para escobilla (*Gutierrezia sarothrae* (Pursh) Britton & Rusby), arbusto del Desierto Chihuahuense, con tamaño similar, fue el único que ajustó y estimó de forma aceptable la biomasa aérea de *T. canescens*, con el uso del área de copa como variable alométrica.

En el caso de la biomasa radicular, los hallazgos contrastan con los registrados por Hernández-Gómez *et al.* (2018), quienes observaron que el diámetro de copa, en un modelo exponencial, fue eficiente para estimar la biomasa radicular de *T. canescens* presente en matorrales desérticos del sur del Desierto Chihuahuense. También, documentan que los modelos exponenciales, cuando se utilizan la altura y esta combinada con el diámetro de copa puede estimarse la biomasa radicular con R^2 de 0.91 a 0.95.

Respecto a la *BT*, en pocos estudios se estima para arbustos desérticos. Generalmente, solo se registran la biomasa aérea o la radicular (Hernández-Gómez *et al.*, 2018; Ludwig *et al.*, 1975). Sin embargo, la *BT* es relevante para estimar el almacén de carbono y su contribución en la mitigación del cambio climático (Briones *et al.*, 2018). La validación cruzada confirmó alta robustez y capacidad de generalización de las ecuaciones propuestas, aunque con una ligera subestimación en plantas grandes,

sobre todo en la *BR* (Figura 4). Estas ecuaciones deben utilizarse solamente dentro del intervalo evaluado, ya que en individuos de mayores diámetros de copa pueden generar subestimaciones de la biomasa.

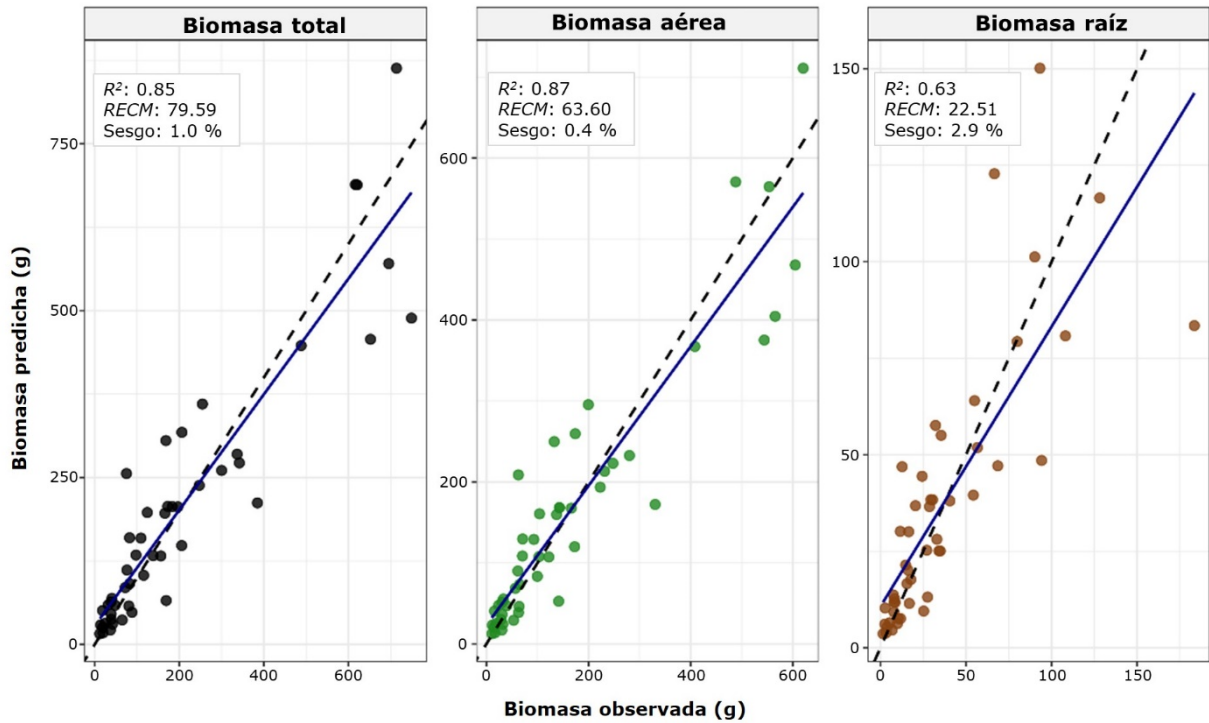


Figura 4. Valores observados y predichos de la validación cruzada para la biomasa total, aérea y radicular.

Para la ecuación de *BT*, el R^2 de 0.852 mostró una penalización mínima (<1 %) respecto al ajuste consignado en el Cuadro 5 ($R^2=0.862$). En la escala original, la ecuación tuvo una *RECM* de 79.5 g y un *EAM* de 54.4 g. Estos parámetros predictivos fueron similares para la biomasa aérea ($R^2=0.865$, *RECM*=63.5 g) y la biomasa de raíz ($R^2=0.632$, *RECM*=22.505 g), con valores del *EAM* de 43.4 g y 13.3 g, respectivamente. En general, la capacidad predictiva de las ecuaciones es adecuada porque los sesgos son menores a 2.9 % (Figura 4), ello ratifica al *DLC* como una variable confiable para la estimación de la biomasa en *T. canescens*.

Conclusiones

La ecuación alométrica potencial linealizada presenta la mejor calidad predictiva para estimar la biomasa aérea, radicular y total de *Tiquilia canescens* con el diámetro largo de la copa como variable predictora, la cual es de fácil medición. Las ecuaciones de biomasa generadas tienen implicaciones prácticas en la cuantificación del almacén de carbono y la disponibilidad de forraje de este taxón en matorrales desérticos de Chihuahua y en sitios ecológicos similares del norte-centro de México.

Agradecimientos

Se agradece al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Campo Experimental La Campana por las facilidades para realizar el estudio.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Contribución por autor

Todos los autores participaron en el diseño del estudio, trabajo de campo, manejo de muestras, así como en la redacción, revisión y versión final del manuscrito. Gabriel Sosa Pérez y José Luis García Pérez: análisis estadístico.

Referencias

- Barbour, M. G., Burk, J. H., & Pitts, W. D. (1987). *Terrestrial plant ecology* (2nd ed.). The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc. https://books.google.com.mx/books/about/Terrestrial_Plant_Ecology.html?id=Ip3wAAAAMAAJ&redir_esc=y
- Baskerville, G. L. (1972). Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Canadian Journal of Forestry*, 2, 49-53. <https://www.esf.edu/quest/documents/Baskerville-1972-CJFR.pdf>
- Baty, F., Ritz, C., Charles, S., Brutsche, M., Flandrois, J.-P., & Delignette-Muller, M.-L. (2015). A toolbox for nonlinear regression in R: The package nlstools. *Journal of Statistical Software*, 66(5), 1-21. https://www.researchgate.net/publication/282743750_A_Toolbox_for_Nonlinear_Regression_inR_The_Packagenlstools
- Blanco-Oyonarte, P., & Navarro-Cerrillo, R. M. (2003). Aboveground phytomass models for major species in shrub ecosystems of western Andalusia. *Investigación Agraria-Sistemas y Recursos Forestales*, 12(3), 47-55. <https://doi.org/10.5424/1078>
- Briones, O., Búrquez, A., Martínez-Yrizar, A., Pavón, N., & Perroni, Y. (2018). Biomasa y productividad en las zonas áridas mexicanas. *Madera y Bosques*, 24(Especial), Artículo e2401898. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401898>
- Briones, O., Flores-Martínez, A., Castellanos, A. E., Perroni, Y., & Hernández-Guerrero, A. (2020). Población, servicios ecosistémicos, ciclo del carbono y políticas públicas en las zonas secas de México. *Elementos para Políticas Públicas*, 4(2), 79-97. <https://www.elementospolipub.org/ojs/index.php/epp/article/view/36>
- Cayuela, L., & de la Cruz, M. (2022). *Análisis de datos ecológicos en R*. Mundi-Prensa. https://books.google.com.mx/books?id=RAB7EAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

- Conti, G., Enrico, L., Casanoves, F., & Díaz, S. (2013). Shrub biomass estimation in the semiarid Chaco forest: a contribution to the quantification of an underrated carbon stock. *Annals of Forest Science*, 70, 515-524. <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0285-9>
- Conti, G., Gorné, L. D., Zeballos, S. R., Lipoma, M. L., Gatica, G., Kowaljew, E., Whitworth-Hulse, J. I., Cuchietti, A., Poca, M., Pestoni, S., & Fernandes, P. M. (2019). Developing allometric models to predict the individual aboveground biomass of shrubs worldwide. *Global Ecology and Biogeography*, 28(7), 961-975. <https://doi:10.1111/geb.12907>
- Flores-Hernández, C. de J., Méndez-González, J., Sánchez-Pérez, F. de J., Méndez-Encina, F. M., López-Díaz, Ó. M., & López-Serrano, P. M. (2020). Allometric equations for predicting *Agave lechuguilla* Torr. aboveground biomass in Mexico. *Forests*, 11(7), Article 784. <https://doi:10.3390/f11070784>
- Granados-Sánchez, D., Sánchez-González, A., Granados-Victorino, R. L., & Borja-de la Rosa, A. (2011). Ecología de la vegetación del Desierto Chihuahuense. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(Edición Especial), 111-130. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.10.102>
- Hernández-Gómez, M. Á., Pando-Moreno, M., Mata-González, R., González-Rodríguez, H., Chacón-Hernández, J., & Gutiérrez, M. (2018). Predicción de biomasa radicular en especies de pastizales semiáridos en el sur del Desierto Chihuahuense. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(50), 274-293. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.226>
- Hernández-Ramos, A., Cano-Pineda, A., Flores-López, C., Hernández-Ramos, J., García-Cuevas, X., Martínez-Salvador, M., & Martínez-Ángel, L. (2019). Modelos para estimar biomasa de *Euphorbia antisiphilitica* Zucc. en seis municipios de Coahuila. *Madera y Bosques*, 25(2), Artículo e2521806. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521806>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2010a). *Compendio de Información Geográfica Municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Aldama, Chihuahua, clave geoestadística 08002*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/08/08002.pdf

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2010b). *Compendio de Información Geográfica Municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Coyame del Sotol, Chihuahua, clave geoestadística 08015*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/08/08015.pdf

James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2021). *An introduction to statistical learning: with applications in R* (2nd ed.). Springer. <https://www.casact.org/sites/default/files/2022-12/James-G.-et-al.-2nd-edition-Springer-2021.pdf>

Kramer, P. J. (1983). *Water relations of plants*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-01578-5>

Ludwig, J. A., Reynolds, J. F., & Whitson, P. D. (1975). Size-biomass relationships of several Chihuahuan Desert shrubs. *The American Midland Naturalist*, 94(2), 451-461. <https://doi.org/10.2307/2424437>

Maldonado-Ortiz, M., López-Serrano, P. M., Valdez-Cepeda, R. D., Mata-González, R., García-González, F., & Martínez-Salvador, M. (2022). Ecuaciones para estimar biomasa total de candelilla (*Euphorbia antisiphilitica* Zucc.) en Chihuahua. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(72), 173-200. <https://doi:10.29298/rmcf.v13i72.1231>

Melgoza-Castillo, A., Morales-Nieto, C. R., Royo-Márquez, M. H., Quintana-Martínez, G., Lebgue-Keleng, T., & Sierra-Tristan, S. (2016). *Manual práctico para la identificación de las principales plantas en los agostaderos de Chihuahua*. Universidad Autónoma de Chihuahua. <https://isbnmexico.indautor.cerlalc.org/catalogo.php?mode=detalle&nt=191993>

Mellado, M., Rodríguez, A., Villareal, J. A., & Olvera, A. (2005). The effect of pregnancy and lactation on diet composition and dietary preference of goats in a desert rangeland. *Small Ruminant Research*, 58(1), 79-85. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2004.07.014>

- Moore, M. J., & Jansen, R. K. (2007). Origins and biogeography of gypsophily in the Chihuahuan Desert plant group *Tiquilia* Subg. *Eddya* (Boraginaceae). *Systematic Botany*, 32(2), 392-414. <http://dx.doi.org/10.1600/036364407781179680>
- Neter, J., Wasserman, W., & Kutner, M. H. (1983). *Applied Linear Regression Models* (2nd ed.). Richard D. Irwin, Inc. <https://www.ime.unicamp.br/~dias/John%20Neter%20Applied%20linear%20regression%20models.pdf>
- Parresol, B. R. (1999). Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons. *Forest Science*, 45(4), 573-593. <https://research.fs.usda.gov/download/treesearch/1180.pdf>
- Paz-Pellat, F., Velázquez-Rodríguez, A., Sánchez-Sánchez, C., Salas-Aguilar, V., Méndez-González, J., Acosta-Mireles, M., & Nájera-Luna, J. A. (2021). Alometría generalizada para la estimación de la biomasa aérea total de plantas leñosas: marco teórico general y aplicaciones. *Madera y Bosques*, 27(4), Artículo e2742442. <https://doi:10.21829/myb.2021.2742442>
- R Core Team. (2024). *R: A Language and Environment for Statistical Computing* (Version 4.2.1) [Software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Rojas-García, F., De Jong, B. H. J., Martínez-Zurimendí, P., & Paz-Pellat, F. (2015). Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science*, 72, 835-864. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0456-y>
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México* (1ra. Edición digital). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <https://drive.google.com/file/d/0B4QXYW6LByLUeDNSaE5jUFBWbmM/view?resourcekey=0-47doiOVtp0RQ13PyUp1PLw>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2016). *Informe de la situación del medio ambiente en México 2015. Compendio de Estadísticas Ambientales, Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/161446/Cap_CC_completo.pdf
- Villalobos, C. (2007). Estimating aboveground biomass of mariola (*Parthenium incanum*) from plant dimensions. In R. E. Sosebee, D. B. Wester, C. M. Britton, E. D.

McArthur & S. G. Kitchen (Comps.), *Proceedings: Shrubland dynamics—fire and water* (pp. 132-135). United States Department of Agriculture, Forest Service.
<https://research.fs.usda.gov/treesearch/28371>



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.