



DOI: 10.29298/rmcf.v16i87.1474

Artículo de Investigación

## **Modelo 3PG para estimar la productividad, almacenamiento de Carbono e Índice de Aridez en plantaciones forestales de *Eucalyptus* L'Hér. en México**

### **3PG model to estimate the productivity, Carbon storage and Aridity Index of *Eucalyptus* L'Hér. forest plantations in Mexico**

Rodrigo Hakamada<sup>1</sup>, Jesús Prados Coronado<sup>2</sup>, Cassiano José Lages  
Marinho Falcão<sup>3</sup>, Omar Carrero<sup>4</sup>, Belkis Sulbarán-Rangel<sup>5\*</sup>

Fecha de recepción/Reception date: 12 de marzo de 2024.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 2 de octubre de 2024.

<sup>1</sup>Universidad Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Ciencias Forestales. Brasil.

<sup>2</sup>World Tree México. México.

<sup>3</sup>Universidade Estadual Paulista (UNESP), Programa de Pós-graduação em Ciências Forestais. Brasil.

<sup>4</sup>Forestry International Consultant. Brasil.

<sup>5</sup>Universidad de Guadalajara, Campus Tonalá, Departamento de Estudios del Agua y la Energía. México.

\*Autor para correspondencia; correo-e: Belkis.sulbaran@academicos.udg.mx

\*Corresponding author; e-mail: Belkis.sulbaran@academicos.udg.mx

#### **Resumen**

Una de las maneras más eficientes de mitigar el cambio climático es a través del secuestro y almacenamiento de Carbono por medio de plantaciones forestales; las cuales además de almacenarlo, pueden generar un cambio en el balance hídrico del suelo; por lo tanto, los dos parámetros, evaluados de manera conjunta, generan información valiosa. El objetivo del trabajo fue estimar el almacenamiento de Carbono y el Índice de Aridez (evapotranspiración/precipitación) mediante modelaje ecofisiológico (modelo 3PG) para plantaciones de eucalipto en México; se identificaron los principales factores influyentes en la evapotranspiración y en el almacenamiento de Carbono. Desde el punto de vista práctico, se elaboraron mapas con la aptitud de las tierras para plantaciones forestales de eucalipto. La productividad alcanzable promedio estimada fue de 55 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, con una variación de 18 a 117 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>; mientras que el almacenamiento de Carbono arriba del suelo fue de 26 a 288 t ha<sup>-1</sup> a los seis años, con un promedio de 80 t ha<sup>-1</sup>. La evapotranspiración varió entre 426 y 1 713 mm año<sup>-1</sup> (promedio de 1 053 mm año<sup>-1</sup>), que resultó en un Índice de Aridez de 0.61 a 8.87. Las principales variables que controlan la productividad, reserva de Carbono y el Índice de Aridez en México son la precipitación y la latitud. Los mapas de aptitud para plantaciones de eucalipto en México mostraron áreas de aptitud alta y muy alta que sumaron 1.4 millones de hectáreas, confirmando el enorme potencial del país para desarrollar plantaciones forestales con eucalipto.

**Palabras claves:** Aptitud para plantaciones, balance hídrico, Incremento Medio Anual, modelaje basado en procesos, modelo ecofisiológico, productividad.

### **Abstract**

One of the most efficient ways to mitigate climate change is through the sequestration and storage of carbon through forest plantations, which, in addition to storing it, can generate a change in the soil water balance; therefore, the two parameters, evaluated together, generate valuable information. The objective of this work was to estimate carbon storage and the Aridity Index (evapotranspiration/precipitation) utilizing ecophysiological modeling (3PG model) for eucalyptus plantations in Mexico, and the main factors influencing evapotranspiration and Carbon storage were identified. From a practical point of view, maps were drawn showing the suitability of the land for eucalyptus plantations. The estimated average achievable productivity was  $55 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , with a variation of 18 to  $117 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ; while, the above-ground Carbon storage was 26 to  $288 \text{ t ha}^{-1}$  at six years, with an average of  $80 \text{ t ha}^{-1}$ . Evapotranspiration ranged from 426 to  $1\,713 \text{ mm yr}^{-1}$  (average  $1\,053 \text{ mm yr}^{-1}$ ), which resulted in an Aridity Index of 0.61 to 8.87. The main variables controlling productivity, Carbon stock, and the Aridity Index in Mexico are precipitation and latitude. The suitability maps for eucalyptus plantations in Mexico showed areas of high and very high suitability totaling 1.4 million hectares, confirming the country's enormous potential for developing eucalyptus plantations.

**Key words:** Suitability for plantations, water balance, Mean Annual Increment, process-based modeling, ecophysiological model, productivity.

## **Introducción**

Los bosques cubren 30 % de la superficie terrestre y más de 1 600 millones de personas dependen directamente de ellos para la generación de energía, los alimentos y la producción de productos forestales maderables y no maderables (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2018). En México, la superficie forestal ocupa alrededor de 66 millones de hectáreas y 34 % del área del país, con alrededor de 57 % cubierta por bosques subtropicales y 43 % por bosques tropicales (FAO, 2020). De los 4 mil millones de hectáreas cubiertas por bosques en el mundo, alrededor de 280 millones pertenecen a las llamadas plantaciones forestales, cuyo principal objetivo es la generación de productos forestales, además de servicios ecosistémicos como el secuestro del Carbono (FAO, 2022).

Uno de los temas más actuales relacionados con la temática forestal es el cambio climático, y una de las maneras más eficientes de mitigarlo es a través del

secuestro y almacenamiento de Carbono por medio del uso sostenible del suelo (Pörtner et al., 2022). Las plantaciones forestales en comparación con otros cultivos tienen la ventaja de poseer ciclos más largos y sus productos pueden permanecer más tiempo en la superficie terrestre antes de regresar a la atmósfera bajo la forma de Carbono. Campoe et al. (2020) evidenciaron que el almacenamiento de Carbono promedio en *Eucalyptus* es de  $100 \text{ t h}^{-1}$  a los siete años, lo cual representa un enorme potencial independiente a la obtención de productos maderables.

En México, en una investigación de Guevara-Escobar et al. (2020) se registró una biomasa de  $83 \text{ t ha}^{-1}$  a los ocho años de *Eucalyptus globulus* Labill. y se estimó que 28 % de esta estaría almacenada en las raíces, que representa una permanencia más grande de reserva de Carbono en el suelo.

Muchos trabajos evidencian el efecto de las plantaciones en el cambio de balance hídrico del suelo (Hakamada et al., 2020; Whitehead & Beadle, 2004) y la importancia de una adecuada selección de sitios para su establecimiento basado en características edáficas y climáticas (Gonçalves et al., 2013; van Dijk & Keenan, 2007). Una de las formas de estimar el almacenamiento de Carbono y la evapotranspiración en plantaciones forestales es mediante el modelaje ecofisiológico o modelaje basado en procesos, que utiliza el conocimiento de diversos procesos biológicos como la transpiración, la fotosíntesis, la nutrición, la partición de Carbono entre los componentes de las plantas para estimar la producción de biomasa y la evapotranspiración (Marques et al., 2020; Hakamada et al., 2020).

El modelo 3PG (por sus siglas en inglés de *Physiological Principles in Predicting Growth*) es el más utilizado en plantaciones forestales (Landsberg & Waring, 1997). Uno de sus principales usos ha sido la zonificación de áreas para especies forestales cultivadas en el mundo (Coops & Waring, 2011), como *Larix* spp. (Xie et al., 2020), *Eucalyptus* spp. (Marques et al., 2020; Palma et al., 2021) y *Pinus* spp. (Coops & Waring, 2011).

En México, la superficie de plantaciones forestales es de 56 mil hectáreas y ocupa 0.08 % del territorio (FAO, 2020); sin embargo, a la fecha no se ha documentado algún estudio en el que se utilice el modelo 3PG; por lo tanto, en esta investigación se aplicó dicho modelo para plantaciones de *Eucalyptus* establecidas en todo México, ya que son de gran interés comercial y están aumentando en diversas regiones. El objetivo fue identificar cuáles eran los principales factores influyentes en la evapotranspiración y en el almacenamiento de Carbono, con el propósito de elaborar mapas de aptitud para estas plantaciones, en función del potencial productivo, sin comprometer los caudales de agua de las cuencas del país.

## **Materiales y Métodos**

### **Descripción del área**

El estudio se realizó considerando toda el área que ocupa México, la cual corresponde a 1 964 millones km<sup>2</sup> y se sitúa entre las latitudes 14° y 33° norte y las longitudes -87° y -117° oeste en el globo terráqueo. Los datos de precipitación y temperatura se obtuvieron del *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, *Langley Research Center (LaRC)*, y *Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER)*. El área de estudio fue dividida en cuadrículas cada 0.5 grados de longitud y latitud, para un total de 699 cuadrículas; cada una de ellas se asoció al centro del polígono, se conectaron a las coordenadas UTM y a los datos de entrada y salida del 3PG.

## Datos de entrada del modelo 3PG

El modelo 3PG necesita el ingreso de parámetros de ubicación, datos climáticos, edáficos y datos de la plantación en estudio (copa, fuste, raíces, hojarasca, ecuaciones alométricas y edad) que en este caso es *Eucalyptus* (Marques *et al.*, 2020).

**Datos climáticos.** Los datos climatológicos fueron obtenidos en el *Project Power* de la NASA (National Aeronautics and Space Administration [NASA], 2021). La resolución fue de  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  para el periodo de 2001 a 2021. El modelo 3PG utiliza un periodo mensual para sus estimaciones. El número de heladas mensuales ( $Nh$ ) se estimaron de acuerdo con la metodología aplicada por Alvares (2011) con la Ecuación 1, donde  $Tmin$  representa la media de la temperatura mínima mensual ( $^{\circ}C$ ).

$$Nh = 21.16 - 1.74 \times Tmin \quad (1)$$

La temperatura media se calculó con los datos de temperatura mínima y máxima y para el déficit de presión de vapor se siguió lo propuesto por Allen *et al.* (1998).

**Datos edáficos.** Se utilizó la base de datos de suelos de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) y del Instituto Nacional de investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio], 2021). Existen cuatro parámetros que necesitan ser insertados de acuerdo con el tipo de suelo: el déficit de razón de humedad del suelo ( $c\theta$ ) y la potencia del déficit de razón de humedad del suelo ( $n\theta$ ) son parámetros fijos (Landsberg & Waring, 1997) y varían con la textura del suelo, estos se obtuvieron de la base del INIFAP; la capacidad de retención del agua ( $CRA$ ) se determinó conforme el modelo propuesto por Stape *et al.* (2004), con la Ecuación 2.

$$CRA (mm) = (0.1503 - 0.137 \times arena(\%) - 0.0057 \times arcilla(\%)) \times densidad \left( \frac{kg}{dm^3} \right) \times profundidad (m)$$

(2)

Los contenidos de arena, arcilla y profundidad se extrajeron de la base del INIFAP; las densidades se estimaron en función del tipo de suelo, el cual se basó en la clasificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Baillie, 2001). El factor fertilidad del suelo, que varía entre 0 y 1, se fijó con el valor igual a 1 (Gonçalves et al., 2017; Nyland et al., 2016).

**Datos y parámetros de la plantación.** Se evaluó una rotación de *Eucalyptus* desde el primero hasta el sexto año, a partir de los datos iniciales de biomasa del tronco, raíz y hojas obtenidos en un estudio previo de Marques et al. (2020) y se utilizó una densidad de 1 212 árboles ha<sup>-1</sup> (Roldán, 2013). En ese estudio, se seleccionó la edad 6 como el estándar para estimar la productividad. Con el cambio climático es probable que la rotación óptima se modifique, ya que está relacionada con las condiciones ambientales y al potencial productivo de los sitios. En futuros trabajos se pueden evaluar, por medio de un análisis de sensibilidad, como la edad se afectaría por cambios en la temperatura y precipitación (Dumollard, 2018; O'Donoghue et al., 2024). Los parámetros de la plantación de *Eucalyptus* se muestran en el Cuadro 1 con la fuente de su obtención, así como los parámetros afinados para la presente investigación.

**Cuadro 1.** Parámetros comunes en todos los puntos utilizados en el modelo 3PG de acuerdo con la parametrización de Marques et al. (2020).

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Fuente
Relación Productividad Primaria Neta/Bruta	PN/PG	0.50	-	Landsberg & Waring (1997)

Densidad básica de la madera	$W_D$	440	Kg m <sup>-3</sup>	Marques et al. (2020)
Biomasa máxima del fuste para 1 000 fustes ha	$B_{LX} 1\ 000$	300	Kg árv <sup>-1</sup>	Landsberg & Waring (1997)
Eficiencia cuántica del dosel		0.05	mol C mol PAR <sup>-1</sup>	Ajustado
Conductancia máxima del dosel	$g_{Cx}$	0.0072	ms <sup>-1</sup>	Marques et al. (2020)
Conductancia estomática máxima	$g_{Sx}$	0.0182	ms <sup>-1</sup>	
Coefficiente de respuesta del estoma al <i>DPV</i>	$k_g$	0.5	1 kPa <sup>-1</sup>	Sands & Landsberg (2002)
Camada limítrofe de la conductancia del dosel	$g_B$	0.2	ms <sup>-1</sup>	Marques et al. (2020) L3
Fracción cáscara: rama para edad inicial	$F_{bb0}$	0.35	-	
Fracción cáscara: rama para edad madura	$F_{bbm}$	0.15	-	
Edad en que fracción cáscara: rama tiene valor intermedio	$fb_{med\_age}$	2	Año	
Área foliar específica edad inicial	$AFE_0$	9.4	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup>	
Área foliar específica edad madura	$AFE_m$	8.4	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup>	
Edad en que el área foliar específica tiene valor intermedio	$tAFE$	2	Año	
Coefficiente de extinción de la luz	$K$	0.5	Año	Sands & Landsberg (2002)
Edad del cierre del dosel	$T_{fullcan}$	2	Año	Sands & Landsberg (2002)
Proporción de lluvia interceptada y evaporada	$C_{pir}$	0.26	-	Hakamada et al. (2020)
Albedo del dosel	$A$	0.2	-	Stape, (2002)
Tasa máxima de la litera	$\gamma_{Fx}$	0.13	1 mes <sup>-1</sup>	Marques et al. (2020)
Tasa de la litera para edad inicial	$\gamma_{F0}$	0.06	1 mes <sup>-1</sup>	
Edad intermedia tasa de la litera	$t_{\gamma F}$	4	Mes	
Tasa de renovación de raíz mensual	$\gamma_R$	0.015	1 mes <sup>-1</sup>	Sands & Landsberg (2002)
Fracción máxima de <i>PPL</i> para raíces	$n_{Rx}$	0.23	-	Marques et al. (2020)
Fracción mínima de <i>PPL</i> para raíces	$n_{Rn}$	0.06	-	

Partición hojas y fustes $DAP=2$	$pFS_2$	0.5	-	
Partición hojas y fustes $DAP=20$	$pFS_{20}$	0.15	-	
Coeficiente masa leñosa	$a_s$	0.025	-	
Potencia masa leñosa	$n_s$	3.02	-	
Capacidad del agua disponible	$Sxaw$	31-145	mm	Calculado para cada sitio
Coeficiente de textura para el modificador del agua del suelo	$sk1w$	0.5	mm	Sands & Landsberg (2002)
Coeficiente de potencia para el modificador de agua del suelo	$sk2w$	5.5	mm	
Valor de $m$ cuando $FR=0$		0	-	
Valor de $f_N$ cuando $FR=0$		0.4	-	
Temperatura máxima para el crecimiento	$Tmax$	37.38	°C	Queiroz et al. (2020)
Temperatura óptima para el crecimiento	$Tmin$	23.95	°C	
Temperatura mínima para el crecimiento	$Topt$	7.25	°C	

## Datos de inventario para hacer la calibración del modelo

Se midieron tres parcelas de inventario de 250 m<sup>2</sup> en un predio de 10 ha cultivadas en espaciamiento de 3×3 m. El área fue preparada con subsolador (*Rigel*<sup>®</sup>, serie de 7 dientes), la plantación se realizó con plantas de aproximadamente 60 días y las malezas se controlaron hasta la edad de 2.5 años. Para la fertilización se aplicó superfosfato triple (*Agrocolmex*<sup>®</sup>, México) en una dosis de 1.1 t ha<sup>-1</sup> más 0.2 t ha<sup>-1</sup> a los seis meses. El diámetro a la altura del pecho (1.3 m) se midió con una cinta dendrométrica (*Meter Group*<sup>®</sup> modelo D1) y la altura con un hipsómetro *Nikon*<sup>®</sup> Forestry Pro II. La ecuación de volumen utilizada fue la generada para *Eucalyptus* spp. por Scolforo et al. (2019).

## **Procesamiento de datos, variables de salida y elaboración de mapas**

Se utilizó el r3PG para procesar los datos (Trotsiuk et al., 2020) y se incluyeron algunas sentencias en el *script* para hacer el procesamiento automático de todos los puntos. El r3PG genera 149 variables de salida y en este estudio solamente se utilizaron la evapotranspiración, el volumen total y la biomasa total arriba del suelo. Como una medida de riesgo por el uso excesivo del agua de la cuenca debido a la implementación de plantaciones forestales (Ferraz et al., 2019), se calculó el Índice de Aridez, el almacenamiento de Carbono ( $\text{t ha}^{-1}$ ) y el Incremento Medio Anual ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ ).

Se elaboraron mapas del Incremento Medio Anual (*IMA*), almacenamiento de Carbono, evapotranspiración, Índice de Aridez y finalmente la aptitud para plantaciones de *Eucalyptus*. Para determinar la aptitud, dividida en cuatro categorías (Baja, Media, Alta, Muy Alta), se utilizaron cuatro clases de almacenamiento de Carbono que representan el potencial productivo del local ( $<90$ ,  $90-100$ ,  $100-110$ ,  $>110 \text{ t C ha}^{-1}$ ), y cuatro clases de Índice de Aridez ( $<0.76$ ,  $0.76-1.00$ ,  $1.00-1.25$ ,  $>1.25$ ). Se determinaron las clases de almacenamiento de Carbono por medio de parsimonia, cuyo valor máximo representaría un *IMA* igual a  $37 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$  y el valor mínimo uno de  $30 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ , con dos valores intermedios. Una vez obtenida la cuadrícula de puntos con cada variable, se aplicó la interpolación para obtener rásteres estimando cada variable para toda el área de estudio. La herramienta utilizada fue la Interpolación TIN (Hakamada et al., 2020), con un método lineal y un tamaño de píxel de 0.01.

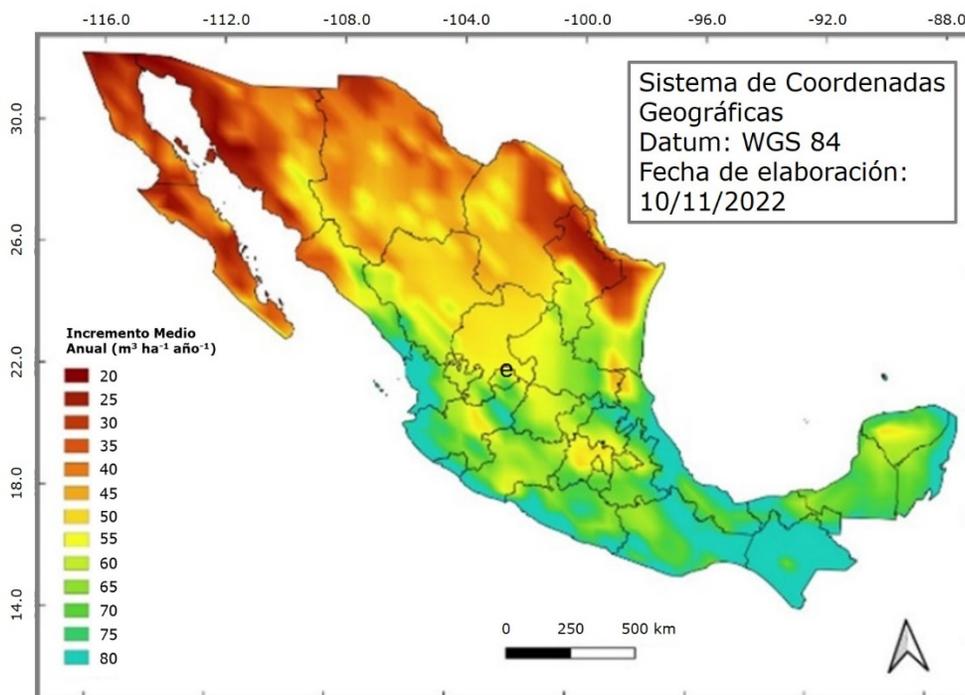
## **Relación entre el almacenamiento de Carbono y el Índice de Aridez y las variables edafoclimáticas**

Los resultados del almacenamiento de Carbono y del Índice de Aridez se correlacionaron a través de la correlación de *Pearson* con todas las variables de entrada del 3PG de suelo y clima, así como con la evapotranspiración. Las variables más significativas se usaron para la generación de ecuaciones que tienen como variable respuesta el almacenamiento de Carbono y el Índice de Aridez. Las ecuaciones de mejor ajuste se eligieron en función del Criterio de información de *Akaike* (*AIC*) más bajo corregido para tamaños de muestra pequeños por medio del programa *CurveExpert* 2.6 (Hyams, 2010). Las figuras fueron generadas en el *software* R versión 3.6.3 (R Core Team, 2021).

## **Resultados y Discusión**

### **Productividad y almacenamiento de Carbono**

La estimación de la productividad alcanzable fue de  $55 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  con una variación entre  $18$  y  $117 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (Figura 1), que es superior a la productividad registrada para otros países con áreas más grandes de plantaciones de especies tropicales de *Eucalyptus* como Brasil ( $38 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), Indonesia ( $28 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) o Vietnam ( $25 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) (Indústria Brasileira de Ávores [IBÁ], 2020).

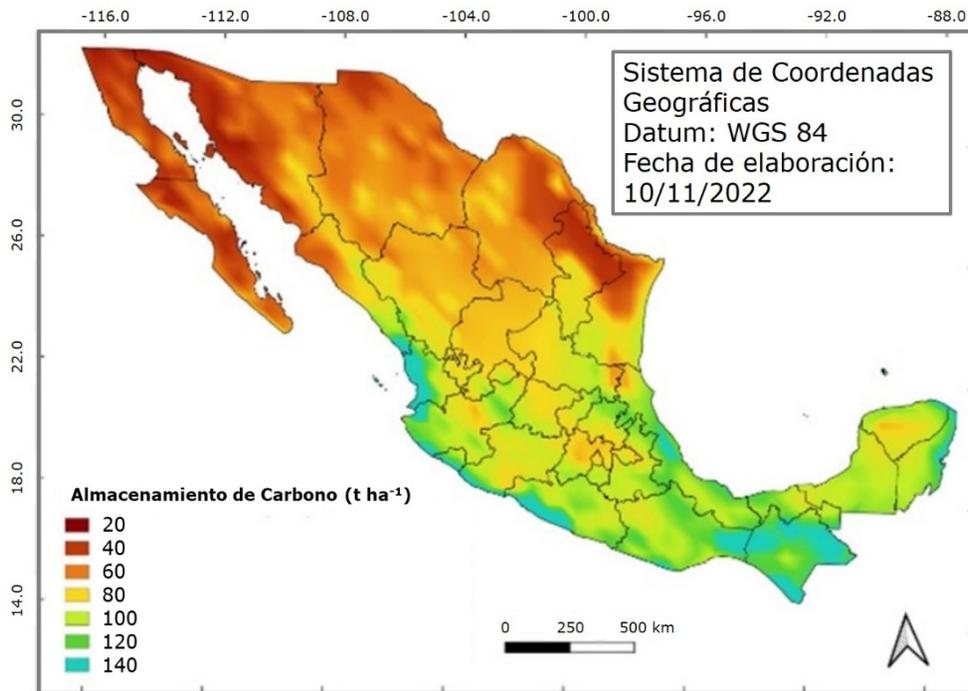


**Figura 1.** Mapa temático calculado por medio del modelo ecofisiológico 3PG sobre la productividad alcanzable en Incremento Medio Anual ( $m^3 ha^{-1} año^{-1}$ ).

Una deficiencia del modelo 3PG es que los árboles no mueren cuando hay déficit hídrico y todavía continúa estimando la productividad basado en la radiación que llega (Sands & Landsberg, 2002). México tiene un área grande de clima desértico y semiárido de acuerdo con los tipos climáticos de Köppen (BWh, BWk, BSk y BSh) que cubren íntegramente o parte de los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Durango, Zacatecas, Tamaulipas y San Luis Potosí. En esos estados, el 3PG todavía estima una productividad alcanzable entre 20 y 40  $m^3 ha^{-1} año^{-1}$ , que puede considerarse un error para las condiciones climáticas (precipitación < 500  $mm año^{-1}$ ). Sin embargo, en el estudio de Binkley (2021) se indicó que la productividad de materiales genéticos considerados "élite" tiende a cero, cuando la precipitación es menor a 800  $mm año^{-1}$ ; en China se ha

consignado que la precipitación ideal para plantaciones comerciales de *Eucalyptus* está entre 1 400 y 1 600 mm año<sup>-1</sup> con una temperatura de 19 a 21 °C, y no soportan lluvias anuales debajo de 600 mm año<sup>-1</sup> (Zhang & Wang, 2021).

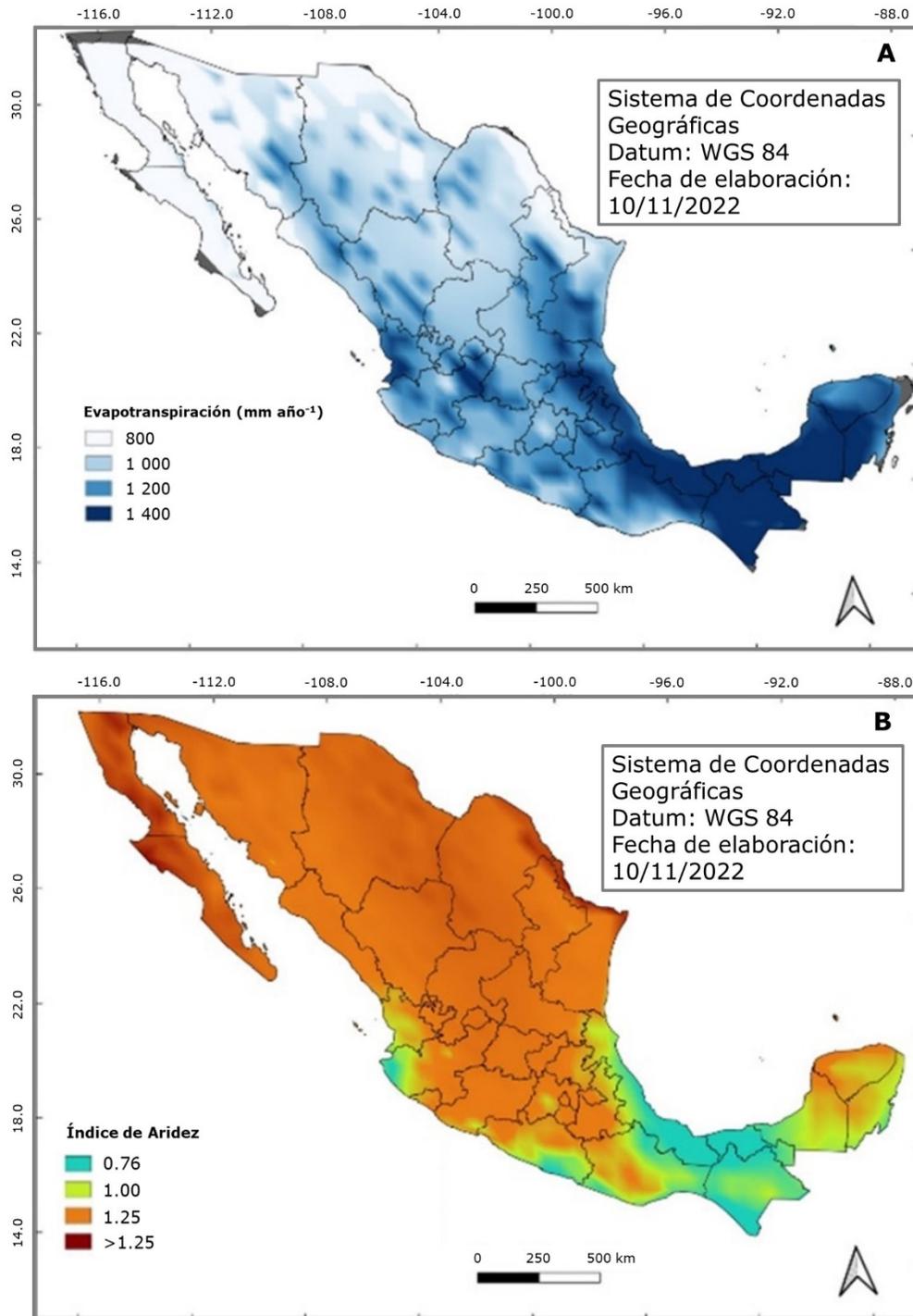
En cuanto al almacenamiento de Carbono (Figura 2), varía de 26 a 289 t ha<sup>-1</sup> a los 6 años, con un promedio de 80 t C ha<sup>-1</sup>. En el almacenamiento no solo se considera la biomasa del fuste, sino también el almacenamiento en toda la parte aérea y las raíces. El enorme intervalo de 11 veces entre los valores mínimo y máximo evidencian la diversidad climática de México, y la influencia significativa del clima en el uso de las plantaciones para el almacenamiento de Carbono. No se obtuvieron diferencias entre las mediciones de inventario y las estimaciones del modelo 3PG para el Incremento Medio Anual; las primeras tuvieron un promedio de Incremento Medio Anual de 33.3 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en la edad de 30 meses, mientras que la estimación con el modelo 3PG fue de 30.2 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>; es decir, una diferencia de 9 %. Este resultado evidencia que la calibración fue razonable y puede representar a las plantaciones de *Eucalyptus* tropicales (Lemos *et al.*, 2018; Marques *et al.*, 2020).



**Figura 2.** Mapa temático calculado por medio del modelo ecofisiológico 3PG para el almacenamiento de Carbono de *Eucalyptus* L'Hér. en México.

## Evapotranspiración e Índice de Aridez

Con los datos de precipitación de México correspondientes al periodo 2000-2021 (77 a 2 423  $mm\ año^{-1}$ ), se estimó la evapotranspiración, la cual resultó con una variación de 425 hasta 1 713  $mm\ año^{-1}$  (Figura 3A), lo que generó un Índice de Aridez entre 0.61 en el estado de Oaxaca hasta 8.87 en Baja California Sur (Figura 3B).



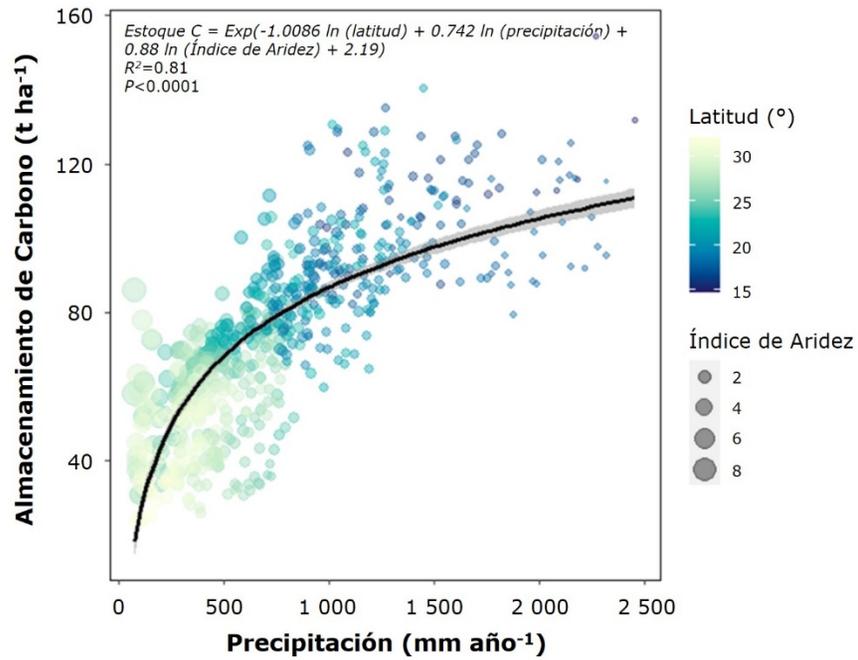
A = Evapotranspiración; B = Índice de Aridez.

**Figura 3.** Estimaciones con el modelo ecofisiológico 3PG para el *Eucalyptus* spp. en una rotación de 6 años.

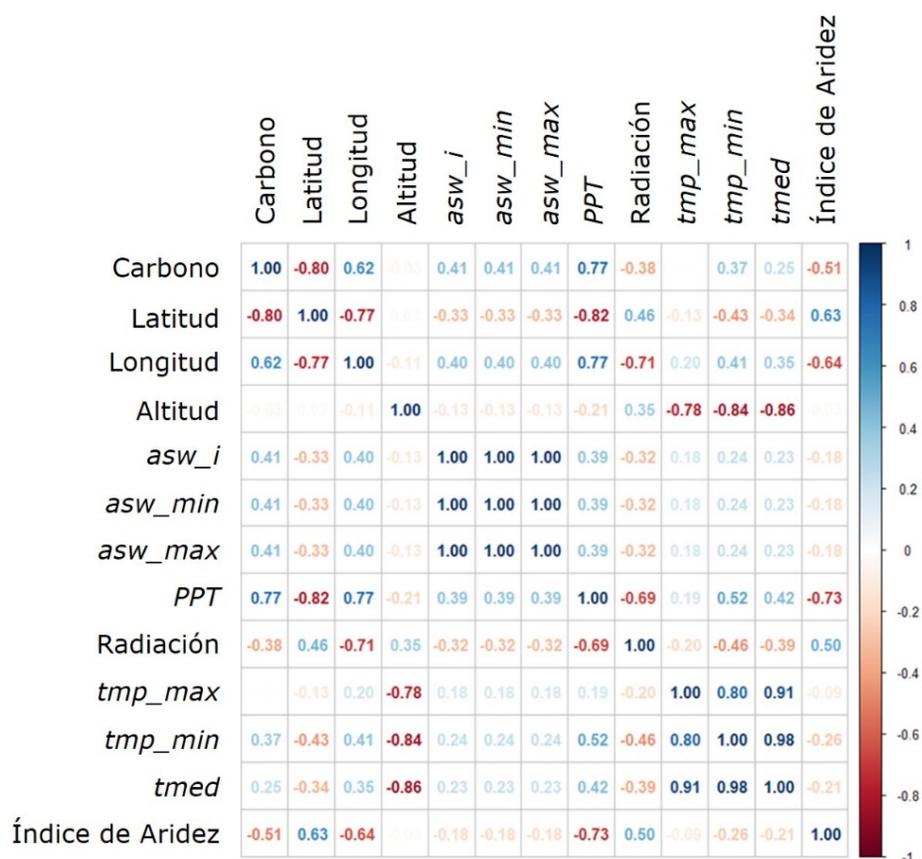
Los valores del Índice de Aridez (*IA*) iguales o menores que 0.76 representan áreas donde no existe un riesgo de disponibilidad del agua para otros usuarios en las cuencas (Figura 3B). En áreas con valores superiores a 0.76, la producción del agua en la cuenca puede ser menor a 10 % de la precipitación (Ferraz et al., 2019). Solamente 3 % del país en este análisis tiene el *IA* igual o menor que 0.76, porcentaje que se concentra, principalmente, en los estados de Oaxaca, Chiapas, Veracruz y Tabasco, así como en la costa (Océano Pacífico) del estado de Jalisco, la frontera de Campeche con Tabasco y el sur de Quintana Roo.

## **Relación de las variables respuestas con variables ambientales**

Como se observa en la Figura 4, los tres principales factores que influyen en la productividad son la precipitación, la latitud y el Índice de Aridez; estos indirectamente representan el potencial de estrés hídrico. En la Figura 5 se presenta la correlación de *Pearson* entre las variables ambientales con enfoque en el Carbono y el Índice de Aridez.



**Figura 4.** Relación entre el Incremento Medio Anual (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) y la precipitación con una estabilización en aproximadamente 1 600 mm de lluvia anual.

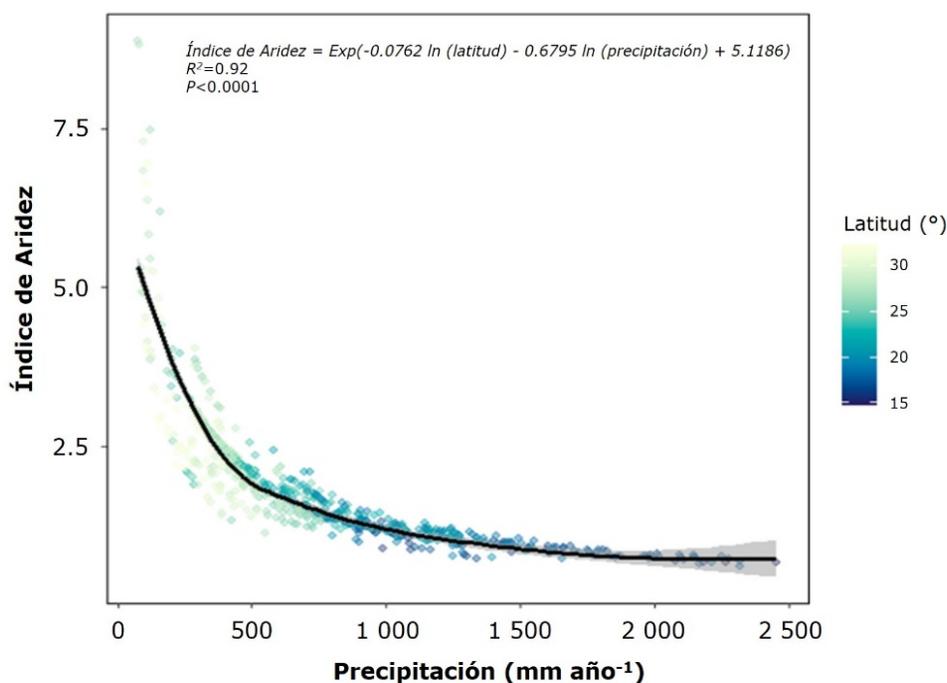


Azul intenso: Representa una correlación positiva alta (valores cercanos a +1); Rojo intenso: Representa una correlación negativa alta (valores cercanos a -1); Blanco o colores suaves: Representan correlaciones bajas o cercanas a 0. *asw\_i* = Agua disponible en el suelo inicial; *asw\_min* = Agua disponible en el suelo mínimo; *asw\_max* = Agua disponible en el suelo máximo; PPT = Precipitación; *tmp\_max* = Temperatura promedio mensual máxima; *tmp\_min* = Temperatura promedio mensual mínima; *tmed* = Temperatura media.

**Figura 5.** Correlación de *Pearson* entre las variables ambientales con enfoque en el Carbono y el Índice de Aridez.

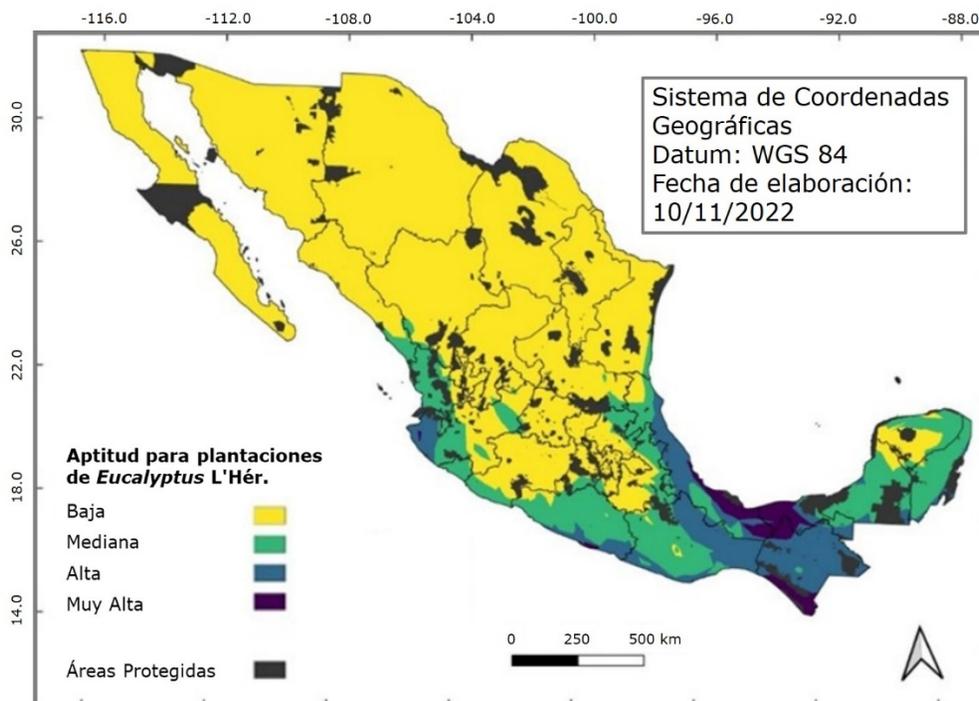
En diversos estudios, la precipitación ha sido la principal variable que influye en la productividad de *Eucalyptus*, en la cual a cada 100 mm de lluvia hay un aumento del Incremento Medio Anual de 3.0-4.6 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Binkley, 2021; Stape et al., 2004).

El Índice de Aridez tuvo una fuerte relación con la precipitación y con la latitud (Figura 6). En México, hay un incremento de precipitación con la latitud, hecho que puede ser interpretado como una colinealidad. Sin embargo, hay áreas con mayor latitud, o sea más distantes de la línea del ecuador, pero con más lluvia que la registrada en zonas con menor latitud, como ocurrió en parte de los estados de Jalisco, Nayarit, Veracruz, Hidalgo, San Luis Potosí y Tamaulipas (NASA, 2021).



**Figura 6.** El Índice de Aridez en México tiene una fuerte relación con la precipitación y la latitud de acuerdo con las estimaciones de evapotranspiración del 3PG.

El mapa de áreas aptas para plantaciones de *Eucalyptus* basado en la productividad y en el Índice de Aridez (Figura 7) fue ligeramente distinto del mapa publicado por la Comisión Nacional Forestal (Comisión Nacional Forestal [Conafor], 2022), en el que se presenta como apto para plantaciones la mayoría del estado de Veracruz. Cuando se incluye el factor hídrico, hay una limitación hacia el oeste del estado, pues el Índice de Aridez es superior a 1, lo que implica riesgos desde el punto de vista hídrico. Coincidentemente, en este estudio los estados con la mayor área de plantaciones forestales fueron aquellos con la aptitud alta y muy alta. En la actualidad, las entidades con la mayor superficie plantada son Tabasco, Veracruz y Campeche, que representan 49 % del área total (Monreal, 2022).



**Figura 7.** Aptitud para plantaciones de *Eucalyptus* L'Hér. para México basado en el potencial productivo más el Índice de Aridez, que refleja el uso sostenible del agua.

Como se aprecia en la Figura 7, el área total de aptitud clasificada como muy alta fuera de áreas protegidas fue de 400 mil hectáreas, y las de aptitud alta fue de 1 millón de hectáreas, esto evidencia el enorme potencial del país para el crecimiento de plantaciones de eucalipto. Cabe señalar que el país importa cerca de 70 % de sus productos de base forestal (Conafor, 2023), y apenas 15 % de los productos forestales proceden de plantaciones.

## **Conclusión**

Las principales variables que controlan la productividad, almacenamiento de Carbono y el Índice de Aridez (evapotranspiración/precipitación) en México son la precipitación y la latitud. Las áreas de aptitud alta y muy alta para plantaciones de *Eucalyptus*, considerando el potencial productivo, así como un bajo riesgo relacionado con la modificación del balance hídrico (Índice de Aridez < 0.76) suman 1.4 millones de hectáreas, lo cual confirma el enorme potencial del país para desarrollar plantaciones de *Eucalyptus*.

## **Agradecimientos**

Los autores agradecen a la Universidad de Guadalajara, específicamente al Centro Universitario de Tonalá, por prestar las instalaciones para realizar este proyecto dentro de la estancia académica del Dr. Rodrigo Hakamada en el Departamento de Estudios del Agua y la Energía.

### **Conflicto de intereses**

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

### **Contribución por autor**

Rodrigo Hakamada, Jesús Prados Coronado y Omar Carrero: idea del estudio, registro de datos, interpretación de resultados y redacción de manuscrito; Cassiano José Lages Marinho Falcão y Belkis Sulbarán-Rangel: revisión y análisis de datos, asesoría de la investigación y redacción manuscrito.

### **Referencias**

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. [https://www.researchgate.net/publication/235704197\\_Crop\\_evapotranspiration-Guidelines\\_for\\_computing\\_crop\\_water\\_requirements-FAO\\_Irrigation\\_and\\_drainage\\_paper\\_56](https://www.researchgate.net/publication/235704197_Crop_evapotranspiration-Guidelines_for_computing_crop_water_requirements-FAO_Irrigation_and_drainage_paper_56)
- Alvares, C. A. (2011). *Mapeamento e modelagem edafoclimática da produtividade de plantações de Eucalyptus no sul do estado de São Paulo* [Tesis doctoral, Universidad de Sao Paulo]. Biblioteca Digital USP. <https://doi.org/10.11606/T.11.2011.tde-23052011-161837>
- Baillie, I. C. (2001). Book review. Soil Survey Staff 1999, Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys, 2<sup>nd</sup> edition. Agricultural Handbook 436, Natural Resources Conservation Service, USDA.

- Washington DC, United States of America, 869 p. *Soil Use and Management*, 17(1), 57-60. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2001.tb00008.x>
- Binkley, D. (2021). *Forest Ecology: An Evidence-Based Approach*. Wiley-Blackwell.
- Campoe, O., Alvares, C., Carneiro, R., Binkley, D., Ryan, M., Hubbard, R., Stahl, J., Moreira, G., Moraes, L. F. & Stape, J. L. (2020). Climate and genotype influences on carbon fluxes and partitioning in *Eucalyptus* plantations. *Forest Ecology and Management*, 475, Article 118445. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118445>
- Comisión Nacional Forestal. (2022). *Áreas Elegibles 2022: Programa S219 Apoyos para el Desarrollo Forestal Sustentable*. Estructura de Datos Espaciales Forestales. [https://idefor.cnf.gob.mx/mviewer/AE\\_2022](https://idefor.cnf.gob.mx/mviewer/AE_2022)
- Comisión Nacional Forestal. (2023). *Programa Anual de Trabajo 2023*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. [https://www.conafor.gob.mx/transparencia/docs/2023/Programa\\_Anual\\_de\\_Trabajo\\_2023.pdf](https://www.conafor.gob.mx/transparencia/docs/2023/Programa_Anual_de_Trabajo_2023.pdf)
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2021). *Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad*. Portal de Geoinformación 2022. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis>
- Coops, N. C. & Waring, R. H. (2011). A process-based approach to estimate lodgepole pine (*Pinus contorta* Dougl.) distribution in the Pacific Northwest under climate change. *Climatic Change*, 105, 313-328. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9861-2>
- Dumollard, G. (2018). Multiple-stand forest management under fire risk: Analytical characterization of stationary rotation ages and optimal carbon sequestration policy. *Journal of Forest Economics*, 32(1), 146-154. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfe.2018.06.002>
- Ferraz, S. F. de B., Rodríguez, C. B., Garcia, L. G., Alvares, C. A. & Lima, W. de P. (2019). Effects of *Eucalyptus* plantations on streamflow in Brazil: moving beyond the water use debate. *Forest Ecology and Management*, 453, Article 117571. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117571>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). *The State of the World's Forests: Forest pathways to sustainable development*. <http://www.fao.org/3/ca0188en/ca0188en.pdf>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). *Global Forest Resources Assessment 2020. Key findings*. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/9f24d451-2e56-4ae2-8a4a-1bc511f5e60e/content>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *The State of the World's Forests 2022: Forest pathways for green recovery and building inclusive, resilient and sustainable economies*. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/f81551bf-0a78-498b-a0a6-17f21467389d/content>

Gonçalves, J., Alvares, C., Higa, A., Silva, L., Alfenas, A., Stahl, J., Ferraz, S., Lima, W., Brancalion, P., Hubner, A., Bouillet, J., Laclau, J., Nouvellon, Y. & Epron, D. (2013). Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management*, 301, 6-27. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030>

Gonçalves, J., Alvares, C., Rocha, J., Brandani, C. & Hakamada, R. (2017). Eucalypt plantation management in regions with water stress. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, 79(3), 169-183. <https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1255415>

Guevara-Escobar, A., Cervantes-Jiménez, M. y Suzán-Azpiri, H. (2020). Uso del modelo 3-PG para la predicción de biomasa de eucalipto en Jalisco, México. *Madera y Bosques*, 26(1), 1-15. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2611876>

Hakamada, R. E., Hubbard, R. M., Stape, J. L., Lima, W., Gonçalves M., G. & de Barros F., S. F. (2020). Stocking effects on seasonal tree transpiration and ecosystem water balance in a fast-growing *Eucalyptus* plantation in Brazil. *Forest Ecology and Management*, 466, Article 118149. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118149>

Hyams Development. (2010). *CurveExpert software*. <http://www.curveexpert.net>

- Indústria Brasileira de Ávores. (2020). *2020 Relatório Anual* (Annual Report). <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>
- Landsberg, J. & Waring, R. H. (1997). A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 95(3), 209-228. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00026-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00026-1)
- Lemos, C. C. Z., Hakamada, R. E., Carrero, O., Alvares, C. A. & Stape, J. L. (2018). Estimacão, zoneamento e análise de sensibilidade da produtividade florestal de *Eucalyptus* no Nordeste do Estado de São Paulo através do modelo 3-PG. *Scientia Forestalis*, 46(119), 459-471. <https://doi.org/10.18671/scifor.v46n119.13>
- Marques C., D. R., Alcarde A., C., Camargo C., O., Hakamada, R. E., Guerrini, I. A., Ramos C., I. & Stape, L. J. (2020). Multisite evaluation of the 3-PG model for the highest phenotypic plasticity *Eucalyptus* clone in Brazil. *Forest Ecology and Management*, 462, Article 117989. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117989>
- Monreal R., S. B. (2022). *Plantaciones Forestales Maderables en México: Desarrollo histórico, situación actual y perspectivas*. Bozkia.
- National Aeronautics and Space Administration. (2021). *The Power Project*. NASA Prediction on Worldwide Energy Resources. <https://power.larc.nasa.gov/>
- Nyland, R. D., Kenefic, L. S., Bohn, K. K. & Stout, S. L. (2016). *Silviculture: concepts and applications* (3<sup>rd</sup> ed.). Waveland Press Inc.
- O'Donoghue, C., O'Fatharta, E., Geoghegan, C. & Ryan, M. (2024). Farmland afforestation: Forest optimal rotation ages across discrete optimisation objectives. *Land Use Policy*, 139, Article 107091. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2024.107091>
- Palma, J. H. N., Hakamada, R., Gonçalves M., G., Nobre, S. & Rodriguez, L. C. (2021). Using 3PG to assess climate change impacts on management plan optimization of *Eucalyptus* plantations. A case study in Southern Brazil. *Scientific Reports*, 11(1), Article 2708. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81907-z>

Pörtner, H., Roberts, D., Adams, H., Adelekan, I., Adler, C., Adrian, R., Aldunce, P., Ali, E., Begum, R., Bednar-Friedl, B., Kerr, R., Biesbroek, R., Birkmann J., Bowen K., Caretta, M., Carnicer, J., Castellanos, E., Cheong, T., Chow, W.,... Ibrahim, Z. (2022). Technical Summary. In H. Pörtner, D. Roberts, H. Adams, C. Adelekan, R. Adler, P. Adrian, E. Aldunce, R. Ali, R. Begum, B. Bednar-Friedl, K. Bezner, K. & R. Biesbroek (Eds.). *Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability, contribution of Working Group II to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (pp. 37-118). Cambridge University Press.

Queiroz, T. B., Campoe, O. C., Montes, C. R., Alvares, C. A., Cuartas, M. Z. & Guerrini, I. A. (2020). Temperature thresholds for *Eucalyptus* genotypes growth across tropical and subtropical ranges in South America. *Forest Ecology and Management*, 472, Article 118248. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118248>

R Core Team. (2021). *R: A language and environment for statistical computing*. The R Project for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>

Roldán C., M. A. (2013). *Inventario forestal y crecimiento maderable de Eucalyptus urophylla en la empresa Forestaciones Operativas de México* [Tesis doctoral, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo]. Colpos digital. [http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/10521/1980/Roldan\\_Cortes\\_MA\\_DC\\_Forestal\\_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/10521/1980/Roldan_Cortes_MA_DC_Forestal_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Sands, P. J. & Landsberg, J. J. (2002). Parametrization of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. *Forest Ecology and Management*, 163(1-3), 273-292. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00586-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00586-2)

Scolforo, H. F., McTague, J. P., Burkhart, H., Roise, J., Carneiro, R. L. & Stape, J. L. (2019). Generalized stem taper and tree volume equations applied to eucalyptus of varying genetics in Brazil. *Canadian Journal of Forest Research*, 49(5), 447-462. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0276>

Stape, J. L. (2002). Production ecology of clonal *Eucalyptus* plantations in northeastern Brazil. [Tesis doctoral, Universidad de São Paulo]. Repositorio USP. <https://repositorio.usp.br/item/001263549>

Stape, J. L., Binkley, D. & Ryan, M. G. (2004). *Eucalyptus* production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. *Forest Ecology and Management*, 193(1-2), 17-31. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.020>

Trotsiuk, V., Hartig, F. & Forrester, D. I. (2020). r3PG—An R package for simulating forest growth using the 3-PG process-based model. *Methods in Ecology and Evolution*, 11(11), 1470-1475. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13474>

van Dijk, A. & Keenan, R. (2007). Planted forests and water in perspective. *Forest Ecology and Management*, 251(1), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.010>

Whitehead, D. & Beadle, C. L. (2004). Physiological regulation of productivity and water use in *Eucalyptus*: a review. *Forest Ecology and Management*, 193(1-2), 113-140. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.026>

Xie, Y., Wang, H. & Lei, X. (2020). Simulation of climate change and thinning effects on productivity of *Larix olgensis* plantations in northeast China using 3-PG<sub>mix</sub> model. *Journal of Environmental Management*, 261, Article 110249. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110249>

Zhang, Y. & Wang, X. (2021). Geographical spatial distribution and productivity dynamic change of *Eucalyptus* plantations in China. *Scientific Reports*, 11, Article 19764. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97089-7>



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.