



# Caracteres morfométricos como indicadores de calidad de sitio de *Tara spinosa* (Leguminosae, Caesalpinioideae) en Cajamarca, Perú

Morphometric characters as indicators of site quality of *Tara spinosa* (Leguminosae, Caesalpinioideae) in Cajamarca, Peru

Villena Jim J. <sup>1\*</sup>; Pacífico Muñoz Chávarry <sup>2</sup>; Seminario, Juan F. <sup>3</sup>; Gustavo Martínez Sovero <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional Autónoma de Chota (UNACH). Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental. Jr. 27 de noviembre, N° 768, Cajamarca, Perú. Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca (UNC), Av. Atahualpa 1050, Cajamarca, Perú.

<sup>2</sup> Universidad Privada del Norte (UPN). Facultad de Ingeniería. Vía de Evitamiento s/n cuadra 15, Cajamarca, Perú.

<sup>3</sup> Programa de Raíces y Tubérculos Andinos, Universidad Nacional de Cajamarca (UNC), Av. Atahualpa 1050, Cajamarca, Perú.

<sup>4</sup> Universidad Nacional Jaén (UNJ). Facultad de Ingeniería Forestal y Ambiental, Jr. Cuzco N° 250, Pueblo Libre Jaén, Cajamarca, Perú.

\* Autor corresponsal: jimjairo@hotmail.com

## RESUMEN

*Tara spinosa* (Molina) Britton & Rose [= *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze] (Fabaceae) es una especie económicamente importante para el Perú y particularmente para el departamento de Cajamarca. Presenta plasticidad adaptativa a gradientes altitudinales (0 a 3000 msnm) y tipos de suelo. Sin embargo, no existen estudios sobre su calidad de sitio, los cuales son importantes para entender los requerimientos ecológicos y de manejo. El objetivo de la presente investigación fue evaluar la expresión de los caracteres morfométricos como indicadores de la calidad de sitio de *Tara spinosa*, para esto se tomaron muestras procedentes de 15 localidades del departamento de Cajamarca, Perú. De 15 árboles elegidos al azar se midió la altura y se colectaron 50 frutos secos en planta, a las que se les midió el largo, ancho y peso. Alrededor de cada árbol evaluado se extrajo una muestra del suelo del horizonte A, para analizar en laboratorio 17 factores físico-químicos. Los datos climáticos pro-

► Ref. bibliográfica: Villena, J. J.; Muñoz Chávarry, P.; Seminario, J. F.; Martínez Sovero, G. 2022. Caracteres morfométricos como indicadores de calidad de sitio de *Tara spinosa* (Leguminosae, Caesalpinioideae) en Cajamarca, Perú. *Lilloa* 59 (1): 33-50. doi: <https://doi.org/10.30550/j.lil/2022.59.1/2022.04.01>

► Recibido: 10 de octubre 2021 – Aceptado: 1 de abril 2022 – Publicado en línea: 20 de abril 2022.



► URL de la revista: <http://lilloa.lillo.org.ar>

► Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución – No Comercial – Sin Obra Derivada 4.0 Internacional.

medio, se obtuvieron de la base del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. El análisis de varianza indicó que existen diferencias estadísticas entre los materiales y la prueba de Scott-Knott determinó los mejores materiales. El análisis de correlación lineal de Pearson ( $p < 0,05$ ) entre 21 variables (17 de suelo y cuatro biométricas) identificó el grado de asociación entre las variables edáficas y las de las plantas. Se encontraron diez modelos de regresión lineal que explican el largo y el peso del fruto. Se concluye en que estos dos caracteres son buenos indicadores de la calidad de sitio de *Tara spinosa*.

**Palabras clave** — Cajamarca; morfología; sitio forestal; tara; taya.

### ABSTRACT

*Tara spinosa* (Molina) Britton & Rose [= *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze] (Fabaceae) is an economically important species for Peru and particularly for the department of Cajamarca. It presents adaptive plasticity to altitudinal gradients (0 to 3000 m asl) and soil types. However, there are no studies regarding its site quality, which are important to understand both its ecological and management requirements. The objective of this research was to evaluate the expression of morphometric characters as indicators of site quality of *Tara spinosa*, for this purpose, samples were collected from 15 localities of the department of Cajamarca, Peru. The height of 15 randomly selected trees was measured and 50 dried fruits were collected from the plant, their length, width and weight were also measured. Around each tree evaluated, a soil sample was taken from the A horizon, 17 physicochemical factors were analyzed in the laboratory. The average climatic data were obtained from the Peruvian National Meteorological and Hydrological Service database. The analysis of variance indicated that there are statistical differences among the materials and the Scott-Knott test determined the best materials. Pearson's linear correlation analysis ( $p < 0.05$ ) between 21 variables (17 soil and four biometric) identified the degree of association between edaphic and plant variables. Ten linear regression models were found to explain fruit length and weight. It is concluded that these two traits are good indicators of the site quality of *Tara spinosa*.

**Keywords** — Cajamarca; morphology; forest site; tara; taya.

### INTRODUCCIÓN

La evaluación de la productividad de los sitios forestales es un inconveniente silvícola de importancia, debido a la naturaleza de las masas forestales y la necesidad de registrar su cosecha y mortalidad; así como, de captar el efecto de las predisposiciones ontogenéticas (Bontemps y Bouriaud, 2014). En este sentido, la productividad del sitio es una evaluación cuantitativa de su potencial para producir biomasa vegetal (Skovsgaard y Vanclay, 2008) y se origina en el concepto de sitio, el cual se refiere a las características biofísicas locales del entorno forestal, este potencial de producción

del sitio se denomina calidad del sitio —CS— (Assmann, 1970). La CS expresa la capacidad de un área para sustentar el crecimiento y desarrollo de una especie; se analiza mediante el índice de sitio (IS), que se expresa como la altura máxima alcanzada por los árboles dominantes de un bosque o rodal a una edad determinada (Cornejo *et al.*, 2005; Vargas Larreta *et al.*, 2010; Martínez Salvador *et al.*, 2013). También se ha propuesto predecir IS en función de múltiples indicadores ecológicos (Bontemps y Bouriaud, 2014). La CS forestal puede estimarse con factores indirectos propios de la masa boscosa (alturas dominantes o medias, volúmenes de madera al final del turno y factores externos como los abióticos (climáticos, edáficos, fisiográficos) o factores de la biocenosis (plagas, patógenos, competidores y socios mutualistas o asociaciones indicadoras) (Singh, 2013; Hargreaves *et al.*, 2020).

El método de evaluación depende del sitio a estudiar (López, 2013). Existen métodos directos que se basan en la estimación a partir de los registros históricos de producción, de volúmenes de madera y en datos de altura del rodal; y métodos indirectos que consisten en la estimación de las relaciones entre especies del estrato superior, por las características de la vegetación menor y mediante la evaluación de factores topográficos, climáticos y edáficos. Su aplicación dependerá de la presencia o ausencia de las especies de interés en los sitios a evaluar (Iturre y Araujo, 2006).

Existen muchos estudios sobre CS basados en el IS que, desde una perspectiva ecológica, el IS puede verse como el reflejo de una característica de crecimiento adaptativo de las especies forestales (Bontemps y Bouriaud, 2014). La gran mayoría de estudios se concentran en especies exóticas con potencial maderable tal es el caso de *Pinus radiata* D. Don. (Afif Khouri *et al.*, 2010; Soto Sánchez, 2019), *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. (Villena Velásquez, 2007; García Aguilar *et al.*, 2017), *Pinus caribaea* Morelet (Vásquez y Ugalde, 1995), *Pinus montezumae* Cordero (Cornejo *et al.*, 2005), *Pinus durangensis* Martínez (López y Valles, 2009), *Pinus cooperi* C. E. Blanco (Vargas Larreta *et al.*, 2010), *Pinus arizonica* Engelm., *Pinus engelmannii* Carrière (Martínez Salvador *et al.*, 2013) y *Pinus occidentalis* Sw. (Bueno López *et al.*, 2015) y en especies nativas como *Gmelina arborea* Roxb., *Tectona grandis* L.f., *Bombacopsis quinatum* A. Robyns (Vásquez y Ugalde, 1995; Vallejos Barra, 1996; Montero Mata, 1999), *Calycophyllum spruceanum* (Benth.) Hook. f. ex K. Schum. (Ugarte Guerra y Domínguez Torrejón, 2010), *Caesalpinia gaumeri* (Britton) León (Interián Ku *et al.*, 2014) y *Cinchona officinalis* L. (Villar Cabeza *et al.*, 2015). La mayoría de estudios determinan la CS tomando la altura del árbol a una edad determinada, como IS. Sin embargo, existen investigaciones que encontraron que la CS se puede evaluar con otros índices. Por ejemplo, Squillace y Silen (1962), McDonald *et al.* (1991) y Gonda y MacAndrews (2001) determinaron que el largo de acículas del *Pinus ponderosa* Douglas ex C. Lawson está positivamente correlacionado con el crecimiento en altura y la productividad. Andenmatten y Letourneau (1998) encontraron la CS del *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco utilizando como IS el largo de los cinco entrenudos, medidos sobre la altura del pecho (CAP). Por su parte, Björklund *et al.* (2020) especifican que el azor (*Accipiter gentilis* Accipitridae) es un indicador de sitio y de hábitat de abeto noruego [*Picea abies* (L.) H. Karst.], cuando incrementa la población de azor en relación al aumento del volumen con un pico de 220 m<sup>3</sup>/ha<sup>-1</sup> del abeto, y con pequeñas cantidades de abedules (*Betula* spp.) y otros árboles latifoliados.

*Tara spinosa* (Gagnon *et al.*, 2016) es una especie muy apreciada en el departamento de Cajamarca, debido a la utilidad de sus frutos por los taninos, la goma contenida en su semilla y como fuente de madera. Su uso en Perú data desde hace 5100 años (Villena y Seminario, 2021) y en las últimas décadas es un producto estratégico, de exportación. Las exportaciones de polvo de fruto de tara en el 2019 alcanzaron 33,4 millones de dólares (Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), 2019). Su demanda ha incentivado la plantación de grandes extensiones comerciales en la sierra y costa peruanas. *T. spinosa* es una especie plástica que se adapta a diferentes gradientes altitudinales y tipos de sitios, sin embargo, no se han realizado estudios sobre CS, que permitan comprender los requerimientos de la especie. Por este motivo, el objetivo de la presente investigación fue evaluar los caracteres morfométricos del fruto de *T. spinosa* y correlacionarlos con factores edáficos y climáticos, con el propósito de establecer si son buenos predictores de la calidad de sitio. Los primeros fueron elegidos porque el fruto es el órgano motivo de cosecha y los factores de clima y suelo evaluados son los más importantes en el crecimiento de la tara, incluyendo los requerimientos nutricionales e hídricos (Meinzer, 2003; LeBauer y Treseder, 2008).

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Localización de la investigación.**— La presente investigación se realizó con árboles y frutos de *T. spinosa* colectadas en bosques y relictos de las provincias de Cajamarca, Cajabamba, Celendín, Contumazá, Chota, Hualgayoc, San Marcos, San Pablo y Santa Cruz (Fig. 1).

**Muestreo y toma de datos de caracteres morfométricos y toma de datos.**— Se utilizó un muestreo no probabilístico, para lo cual se instaló un transecto de ancho fijo (5 m a cada lado) y longitud variable (Cruzado Jacinto *et al.*, 2019), escogiendo un árbol cada cinco metros de manera intercalada de derecha a izquierda hasta seleccionar 15 individuos. Se colectaron muestras de 50 frutos maduros de la parte intermedia de la copa del árbol. Las muestras fueron codificadas y se guardaron en bolsas de papel. Se evaluaron los siguientes caracteres morfométricos: altura de árbol (AA), usada frecuentemente como indicadora de CS (Bontemps y Bouriaud, 2014), largo de fruto (LV), ancho de fruto (AV) y peso de fruto (PV), estos tres últimos como probables indicadores de calidad de sitio y por ser los caracteres de mayor importancia económica. La AA se midió con el hipsómetro de Suunto, la LV y AV se midieron con pie de rey y el PV se midió en una balanza analítica de dos dígitos de aproximación.

Se analizaron 17 parámetros químicos y físicos de los suelos. Para esto se colectaron cinco submuestras en forma aleatoria en el transecto de elección de los árboles muestreados, luego se mezclaron para obtener un muestra homogénea de suelo por cada localidad (Aertsen *et al.*, 2010; Mendoza y Espinoza, 2017), se tomaron a una profundidad de 0 - 30 cm, considerando que las raíces de los árboles absorben los nutrientes y el agua de los primeros centímetros del suelo (Herrera y Alvarado, 1998;

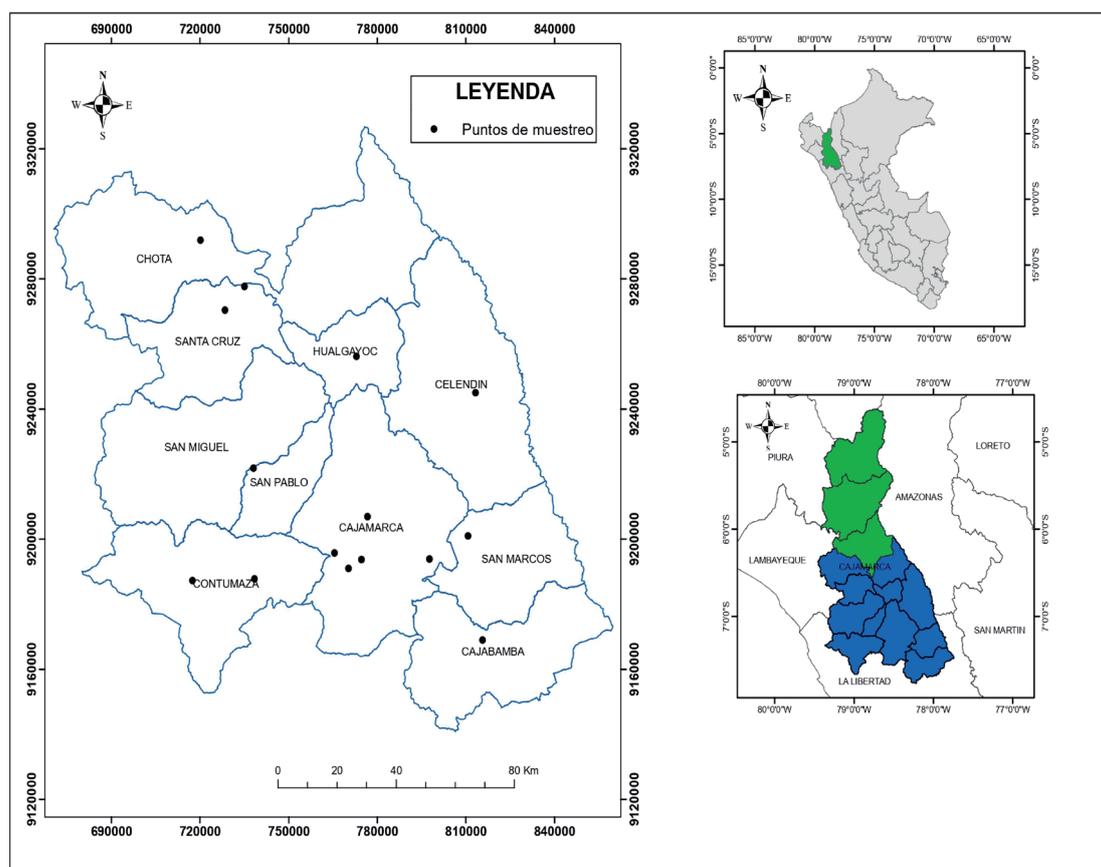


Fig. 1. Ubicación de puntos de muestreo de individuos de *Tara spinosa* en el departamento de Cajamarca, Perú.

Fig. 1. Location of sampling points of *Tara spinosa* individuals in the department of Cajamarca, Peru.

Subedi y Fox, 2016; Mendoza y Espinoza, 2017). Los factores edáficos evaluados fueron: pH, C.E: conductividad eléctrica (dS/M), M.O: materia orgánica (%), P: fósforo (ppm), K: potasio (ppm), A: arena (%), textura, CIC: capacidad de intercambio catiónico (meq/100gr),  $Ca^{+2}$ : calcio intercambiable,  $Mg^{+2}$ : magnesio intercambiable,  $K^+$ : potasio,  $Na^+$ : sodio intercambiable,  $Al^{+3} + H^+$ : acidez intercambiable, SC: suma de cationes, SB: suma de bases, Sat. Bases: saturación de bases (%).

Las variables climáticas [temperatura máxima (T<sub>máx</sub>), temperatura media (T<sub>med</sub>), temperatura mínima (T<sub>mín</sub>), precipitación (PP), humedad relativa (HR)] de los sitios de estudio se obtuvieron de los registros históricos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

**Análisis estadístico.**— Con los datos de AA, LV, AV y PV se realizó el análisis de varianza (ANOVA) y el análisis de diferencia mínima significativa (Wang *et al.*, 2012) mediante la prueba de Scott-Knott, ( $\alpha = 0,05$ ) para determinar las mejores variables biométricas evaluadas, con el propósito de conocer si una de estas cumple como indicador de CS. Los análisis se realizaron con el software Sistemas de Análisis de Varianza – SISVAR (Ferreira, 2011).

Tabla 1. Provincia, localidad, altitud, coordenadas, temperaturas, precipitación anual promedio y humedad relativa de los sitios de muestreo.  
 Table 1. Province, locality, altitude, coordinates, temperatures, average annual precipitation and relative humidity of the sampling sites.

Provincia	Localidad	Altitud (msnm)	Norte	Este	Temperatura (T°)			Precipitación (mm/año)	Humedad relativa (%)
					Máxima	Media	Mínima		
Cajamarca	Cajamarca	2756	776649	9206921	21,50	13,84	6,17	787	67,00
	Asunción	2029	770220	9191056	22,44	17,40	12,36	918	70,00
	San Juan	2175	774600	9193648	22,00	16,94	11,88	342	78,00
	Magdalena	1789	765469	9195692	28,90	23,60	18,30	995	69,00
	Jesús	2285	797706	9193847	22,45	15,81	9,17	676	57,90
Cajabamba	Condebamba	2063	815602	9168949	22,00	9,70	15,85	965	72,00
Celendín	Celendín	2464	813166	9244952	20,00	14,94	9,87	1029	78,00
Chota	Querocoto	2204	720059	9291967	20,08	11,60	15,84	770	85,00
	Cupisnique	1872	717312	9187180	24,40	18,20	12,00	396	76,00
Contumazá	Sta. Cruz de Toledo	2340	738411	9187776	20,50	14,87	9,23	890	76,00
Hualgayoc	Bambamarca	2603	772886	9256107	20,03	14,80	9,56	749	80,00
San Marcos	San Marcos	2895	810714	9200926	25,50	17,99	10,47	740	67,00
San Pablo	San Pablo	2063	738072	9221751	19,90	14,60	9,30	807	79,20
Santa Cruz	C.P. Silverio	1707	728341	9270326	18,00	14,73	11,46	851	72,00
	Chancay Baños	1400	735067	9277760	26,60	19,50	12,40	818	74,00

### Influencia de los factores edafoclimáticos sobre los caracteres morfométricos.—

Para determinar la influencia de los factores edáficos sobre los caracteres morfométricos elegidos, se utilizó como una medida la fuerza de asociación propuesta por Ferre (2019). Se ejecutó la correlación lineal de Pearson ( $p < 0,05$ ) para comprobar la hipótesis de que los factores están correlacionadas con las variables propuestas como indicadores de CS (Louw y Scholes, 2006; Interián Ku *et al.*, 2014). Este análisis permitió cuantificar el grado de asociación lineal entre variables continuas, que refleja la fuerza y dirección de la relación entre dos o más variables y observándose dicha relación se procede a obtener el modelo de regresión simple o múltiple (Ferre, 2019). Entendiéndose que la separación simultánea de los factores predictores a través de regresión simple y múltiple es fundamental, porque permite detectar y medir cualquier asociación condicional a los demás factores (Shipley, 2002), todos los análisis se realizaron con el software R.

## RESULTADOS

### Caracteres morfométricos como indicadores de calidad de sitio de *Tara spinosa*.—

El análisis de varianza (ANOVA), para el carácter AA de 15 localidades de Cajamarca, no muestran diferencias estadísticas significativas entre estas (Tabla 2). Para LV, AV y PV si se observó diferencias significativas entre localidades. Siendo la localidad de Magdalena estadísticamente superior a todos los demás en LV (12,54 cm), AV (2,61 cm) y PV (6,26 g) seguida por la de Querocoto con 11,19 cm de LV y 4,71 g en PV (Tabla 3).

### Influencia de los factores edafoclimáticos sobre los caracteres morfométricos.—

Se observaron altas correlaciones entre los factores edáficos y los caracteres escogidos como indicadores de CS para *T. spinosa*. El  $Mg^{+2}$  (0,46) presenta un grado de asociación mediana con AA, para los demás factores no existe correlación significativa. También se observa que L (-0,49) influye negativamente sobre AA. Los factores  $K^+$  (0,81) y  $Mg^{+2}$  (0,79) muestran alta asociación con el carácter LV, así el factor  $K^+$  explicaría el LV ( $R^2=0,56$ ). Asimismo, se obtuvo el modelo de regresión lineal con los factores  $K^+$  y  $Mg^{+2}$  explicada por  $R^2=0,61$ , así estos factores indicarían LV. Con un grado de asociación moderada tenemos A (0,55), SC y SB (0,46). Los factores  $K^+$  y A

**Tabla 2.** Análisis de varianza (Anova) de altura de árbol y medias de fruto de *Tara spinosa* de 15 localidades del departamento de Cajamarca.

**Table 2.** Analysis of variance (Anova) of trees height and the mean fruit of *Tara spinosa* from 15 provenances in the department of Cajamarca.

Variable	GL	SQ	QM	Fc	Fc Pr > Fc	CV (%)
Altura de árbol	14	21244,00	1416,00	0,140	0,9827	61,12
Largo de fruto	14	1099,09	78,51	121,94	0,0000*	8,94
Ancho de fruto	14	29,06	2,08	16,51	0,0000*	19,36
Peso de fruto	14	508,18	36,30	112,52	0,0000*	18,2

(\*) Significativo ( $p < 0,05$ ).

**Tabla 3.** Análisis de significancia ( $p < 0,05$ ) de altura de árbol (AA), largo de fruto (LV), ancho de fruto (AV) y peso de fruto (PV) de *Tara spinosa* de 15 localidades de Cajamarca.

**Table 3.** Significance analysis ( $p < 0.05$ ) of tree height (HA), pod length (PL), pod width (W) and pod weight (PW) of *Tara spinosa* from 15 locations in Cajamarca.

Altura de árbol (AA)			Largo de fruto (LV)			Ancho de fruto (AV)			Peso de fruto (PV)		
Procedencia	Med.	Sign.	Procedencia	Med.	Sign.	Procedencia	Med.	Sign.	Procedencia	Med.	Sign.
Querocoto	3,0	a	Condebamba	6,16	g	Condebamba	1,51	d	Condebamba	2,05	f
Cajamarca	4,0	a	Santa Cruz	7,47	f	Santa Cruz	1,58	d	Chancay Baños	2,18	f
Bambamarca	4,0	a	Chancay Baños	7,51	f	Cajamarca	1,61	d	Cajamarca	2,40	e
San Juan	4,0	a	Cajamarca	7,90	e	Chancay Baños	1,62	d	Santa Cruz	2,44	e
Celendín	4,5	a	San Marcos	7,98	e	Cupisnique	1,72	d	Celendín	2,58	d
Santa Cruz de Toledo	5,0	a	Jesús	8,01	e	San Marcos	1,74	d	Asunción	2,64	d
Santa Cruz	5,0	a	Bambamarca	8,66	d	San Pablo	1,79	c	San Juan	2,67	d
Asunción	5,0	a	San Pablo	8,86	d	Asunción	1,80	c	Jesús	2,76	d
Condebamba	5,0	a	San Juan	9,06	d	San Juan	1,82	c	San Marcos	2,77	d
Magdalena	5,3	a	Celendín	9,20	d	Jesús	1,82	c	San Pablo	2,80	d
Chancay Baños	5,5	a	Cupisnique	9,90	c	Querocoto	1,92	b	Santa Cruz de	3,48	c
Cupisnique	6,0	a	Santa Cruz de Toledo	10,02	c	Santa Cruz de Toledo	1,94	b	Toledo	3,49	c
Jesús	6,8	a	Asunción	10,19	c	Bambamarca	1,95	b	Bambamarca	3,59	c
San Marcos	7,0	a	Querocoto	11,19	<b>b*</b>	Celendín	2,04	b	Cupisnique	4,71	<b>b*</b>
San Pablo	7,3	a	Magdalena	12,54	<b>a*</b>	Magdalena	2,61	<b>a*</b>	Querocoto	6,26	<b>a*</b>

(\*) Significativo ( $p < 0,05$ ).

**Tabla 4.** Modelos lineales estimados para largo (LV) y peso de fruto (PV) de *Tara spinosa* con factores edáficos.**Table 4.** Estimated linear models for length (LV) and pod weight (PV) of *Tara spinosa* with edaphic factors.

Modelos estimados	RSE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>a</sub>	F	p-value
LV = 11,454 + 3,2052 (K <sup>+</sup> )	0,53	0,56	0,51	11,47	0,0080**
LV = 10,320 + 2,434 (K <sup>+</sup> ) + 0,324 (Mg <sup>+2</sup> )	0,53	0,61	0,51	6,23	0,0227*
LV = 9,420 + 2,887 (K <sup>+</sup> ) + 0,049 (A)	0,38	0,79	0,74	15,54	0,0018**
LV = 9,540 + 3,0187 (K <sup>+</sup> ) + 0,0517 (A) - 0,0617 (Mg <sup>+2</sup> )	0,40	0,79	0,70	9,138	0,0081**
PV = 2,346 + 3,381 (K <sup>+</sup> )	0,44	0,67	0,64	18,67	0,0019**
PV = 1,682 + 12,105 (CE)	0,48	0,61	0,57	14,32	0,0043**
PV = 1,967 + 0,014 (K)	0,44	0,68	0,64	18,8	0,0019**
PV = -4,237 + 0,097 (HR)	0,46	0,63	0,59	15,24	0,0036**
PV = 1,247 + 0,045 (Ar) + 2,783 (K <sup>+</sup> )	0,33	0,84	0,79	20,43	0,0007**
PV = -5,719 + 0,561 (pH) -0,013 (P) - 0,018 (K) + 0,059 (Ar) + 2,364 (K <sup>+</sup> ) + 0,049 (HR)	0,22	0,96	0,91	18,52	0,007*

Ar: arcilla (%), A: arena (%), K: potasio, Mg<sup>+2</sup>: magnesio intercambiable, K<sup>+</sup>: potasio intercambiable, CE: conductividad eléctrica, P: fósforo, HR: humedad relativa, RSE: error típico residual.

Significado de códigos: 0 '\*\*\*\*', 0,001 '\*\*\*', 0,01 '\*\*', 0,05 '.', 0,1, ' ' 1.

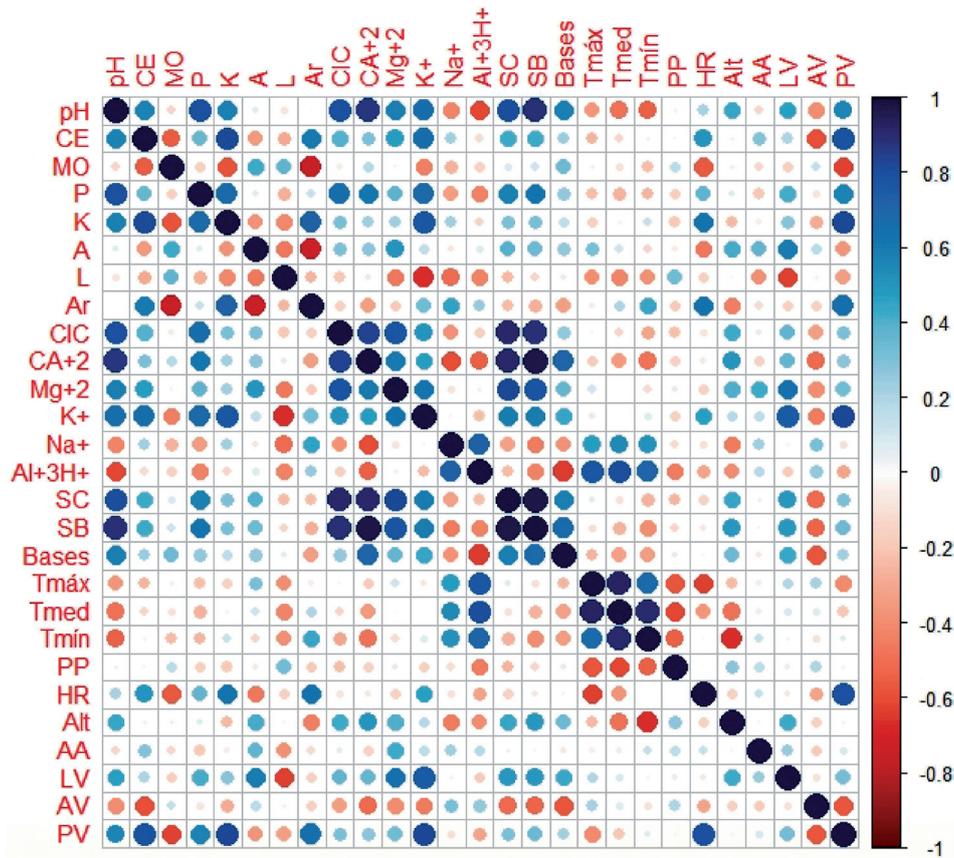
arrojaron un modelo explicado por R<sup>2</sup>=0,79, factores que explicarían LV, finalmente un modelo con tres factores K<sup>+</sup>, A y Mg<sup>+2</sup> con R<sup>2</sup>=0,79.

Por otro lado, el factor que influye negativamente L (-0,69) sobre el mismo carácter.

El ancho de fruto muestra una asociación moderada con Na<sup>+</sup> (0,46), y con el resto de factores edáficos presenta correlaciones negativas. Por último, PV muestra alta asociación con HR (0,75) y P (0,72), asociación moderada con los factores K (0,69), K<sup>+</sup> (0,61), pH (0,55), Ar (0,54) y CE (0,49). Para este carácter PV se obtuvieron seis modelos de regresión, con respecto a los factores edáficos K, K<sup>+</sup>, HR y CE explicadas por R<sup>2</sup>=0,68, R<sup>2</sup>= 0,67, R<sup>2</sup>=0,63 y R<sup>2</sup>=0,61 respectivamente, con los factores Ar - K<sup>+</sup> explicado por R<sup>2</sup>=0,84 y finalmente con los factores pH - P - K - Ar - K<sup>+</sup>- HR con un R<sup>2</sup>= 0,96 (Tabla 4). Concerniente a los factores climáticos sólo HR (0,75) presentó una alta asociación con PV, por su parte T<sub>máx</sub>, T<sub>med</sub>, T<sub>mín</sub> y PP no muestran asociación con los caracteres morfométricos AA, LV, AV y PV (Fig. 2).

## DISCUSIÓN

**Caracteres morfométricos como indicadores de calidad de sitio de *Tara spinosa*.**— Las alturas de los árboles (AA) de *T. spinosa* evaluados no muestran diferencias significativas entre las localidades estudiadas; asimismo, no existe asociación significativa con los factores edafoclimáticos. Quizá esto responda a que AA de esta especie en bosques naturales observados presentan una media de 5,16 m siendo una característica propia de la misma, probablemente controlado por factores genéticos, considerando que la diferenciación genética es controlada principalmente por condiciones no severas del clima (Rehfeldt, 1995) y que el genotipo es aproximadamente



**Fig. 2.** Grado de correlación de los caracteres morfométricos altura de árbol (AA), largo de fruto (LV), ancho de fruto (AV) y peso de fruto (PV) con los factores edafoclimáticos, donde se puede observar que el color azul en diferentes tonalidades refleja el grado de asociación positiva, el azul intenso altamente significativo cercano a 1, siendo todo lo contrario cercano a 0. Del mismo modo sucede con la tonalidad del rojo, siendo esta asociación negativa.

pH, C.E: Salinidad (dS/M), M.O: Materia orgánica (%), P: Fósforo (ppm), K: Potasio (ppm), A: Arena (%), L: Limo (%), Ar: Arcilla (%), CIC: Capacidad de intercambio catiónico, Ca<sup>+2</sup>: Calcio intercambiable, Mg<sup>+2</sup>: Magnesio intercambiable, K<sup>+</sup>: Potasio, Na<sup>+</sup>: Sodio intercambiable, Al<sup>+3</sup> + H<sup>+</sup>: Acidez intercambiable, SC: Suma de cationes, SB: Suma de bases, SB: Saturación de bases (%), Tmáx: Temperatura máxima, Tmed: Temperatura media, Tmín: Temperatura mínima, PP: Precipitación, HR: Humedad relativa, Alt: Altitud, AA: Altura de árbol, LV: Largo de fruto, AV: Ancho de fruto, PS: Peso de fruto.

(\*) significativo ( $p < 0,05$ ).

**Fig. 2.** Degree of correlation of the morphometric characters tree height (AA), fruit length (LV), fruit width (AV), and fruit weight (PV) with the edaphoclimatic factors, where it can be observed that the different tonalities of blue reflect the degree of positive association, the intense blue highly significant close to 1, being the opposite close to 0. In the same way, it happens with the red tonality being this association negative.

pH, S.C: Salinity (dS/M), M. O: Organic matter (%), P: Phosphorus (ppm), K: Potassium (ppm), A: Sand (%), L: Silt (%), Ar: Clay (%), CEC: Cation exchange capacity, Ca<sup>+2</sup>: Exchangeable calcium, Mg<sup>+2</sup>: Exchangeable magnesium, K<sup>+</sup>: Potassium, Na<sup>+</sup>: Exchangeable sodium, Al<sup>+3</sup> + H<sup>+</sup>: Exchangeable acidity, SC: Sum of cations, SB: Sum of bases, SB: Base saturation (%), Tmax: Maximum temperature, Tmed: Mean temperature, Tmin: Minimum temperature, PP: Precipitation, RH: Relative humidity, Alt: Altitude, AA: Tree height, LV: Fruit length, AV: Fruit width, PS: Fruit weight.

(\*) significant ( $p < 0.05$ ).

un tercio más importante que el medio ambiente para determinar la variación fenotípica en la altura en rodales naturales (Monserud y Rehfeldt, 1990), esto permite visualizar una homogeneidad en AA de bosques de *T. spinosa*; y si se compara con otras especies con potencial maderable caso los 17 m de *Alnus acuminata* Kunth (Reynel *et al.*, 2006), 12,5 de *Cinchona officinalis* L. (Villar Cabeza *et al.*, 2015), 30 m de *Pinus radiata* D. Don (Watt *et al.*, 2010; Soto Sánchez, 2019), 18 m de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. (Villena Velásquez, 2007), y 14 m de *Cupressus macrocarpa* Hartw. ex Gord. (Vásquez *et al.*, 2021) cuyas características genéticas y de sitio son mucho más favorables en comparación con los sitios donde crece *T. spinosa*.

Las diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) en LV, AV y PV entre los materiales de Magdalena y materiales de diferentes localidades en estudio, fueron superiores, estos resultados son similares a los reportados por Villena y Seminario (2021) y Villena *et al.* (2019) en materiales de *T. spinosa* de nueve provincias de Cajamarca, que les permitió definir morfotipos; sin embargo, en poblaciones naturales de Yauyos (Lima) y Huamanga en Ayacucho, se encontraron diferencias significativas entre las variables AV y PV, pero no en LV (Bonilla *et al.*, 2016).

**Influencia de los factores edafoclimáticos sobre los caracteres morfométricos.**— La elección de un conjunto estándar de propiedades específicas del suelo como indicadores de la calidad, son complejas y varían entre ecosistemas forestales, las propiedades como materia orgánica, la capacidad de suministro de nutrientes, pH, la densidad aparente, la porosidad, pueden ejercer diferentes niveles de influencia en la ponderación en los modelos de índices de calidad (Schoenholtz *et al.*, 2000). Según la correlación de Pearson ( $p < 0,05$ ) el factor  $Mg^{+2}$  presentó un grado de asociación mediana positiva y L una asociación negativa con el carácter AA. Los factores edafológicos  $K^+$  y  $Mg^{+2}$  mostraron gran asociación con respecto a LV. Pietrzykowski (2010) encontró correlaciones importantes entre las fuentes de nutrientes y los elementos K, Ca y Mg acumulados en la biomasa, afirmando la relación estrecha entre el suelo y la vegetación. En ese sentido,  $K^+$  es importante debido a que interviene en la osmo-regulación y actividad enzimática y el  $Mg^{+2}$  como constituyente de órganos estructurales y participa en funciones catalizadoras (Maathuis, 2009). Por su parte Anda *et al.* (2015) y Emamgolizadeh *et al.* (2015) indican que existe relación entre la disponibilidad de  $Mg^{+2}$  y  $K^+$  con micronutrientes del suelo, y propiedades químicas como CIC, pH y contenido de arcillas. Para Cajamarca, se reporta que la incorporación de abono aumenta las características de LV de  $\pm 2,8$  cm, con la aplicación de  $5,76$  t/ha<sup>-1</sup> de guano de isla en bosques naturales de *T. spinosa* (Acosta Chilcón, 2013).

Se observó una alta asociación de P con respecto al PV. Scott *et al.* (1992) reportan altas concentraciones de P en flores y frutos, siendo menor en hojas y madera. En tal sentido, P es importante como refiere Fernández (2007) porque forma parte de los compuestos orgánicos en los diferentes procesos metabólicos y reacciones enzimáticas claves, ejerciendo la función de control en los procesos fotosintéticos y metabólicos de carbohidratos, y su intervención en la maduración de los frutos. Se debe mencionar que un compuesto orgánico importante del P es la fitina, que en las semillas ocurren como sales de Ca y Mg del ácido fítico y se procesan durante

la conformación de las semillas. Se indica que después de ocurrida la polinización existe un aumento en el transporte de P hacia las semillas jóvenes en desarrollo (Mengel y Kirkby, 2000), otras correlaciones con asociación moderada son K y K<sup>+</sup>. Anotaciones de Scott *et al.* (1992) reportan concentraciones muy altas de K en las flores y frutos. Kayahara *et al.* (1995) encontraron correlación de K extraíble (-0,56) y (-0,64) del suelo mineral y suelo del bosque respectivamente con el IS de *Tsuga heterophylla* (Raf.) Sarg. Siendo K importante debido a que suscita la translocación de fotosintatos recién sintetizados, causando un beneficio en la movilización de las proteínas almacenadas en hojas y tallos, promueve la translocación de compuestos de degradación nitrogenados hacia los granos, aumentando la velocidad de crecimiento (Fairhurst, 1999; Mengel y Kirkby, 2000). Para Cajamarca, se reporta un incremento en el peso de fruto de  $\pm 0.86$  g con la aplicación de 5,76 t/ha<sup>-1</sup> de guano de isla en bosques naturales de *T. spinosa* (Acosta Chilcón, 2013).

La visión analítica de la CS es sustancialmente explicativa, y supone que los índices biofísicos retenidos en los modelos estadísticos pertinentes reflejan relaciones causales entre los principales factores ecológicos y el indicador de CS evaluado (Shipley, 2002). Considerando que un modelo nos permite realizar una estimación cuantitativa de la variable estudiada, tomando como hipótesis simple, que las condiciones del sitio y del producto forestal son constantes (Gadow *et al.*, 2007). Para el presente estudio se obtuvieron diez modelos lineales con respecto a la LV y PV con factores edáficos. Siendo para LV un modelo de regresión lineal con un factor edáfico (K<sup>+</sup>, R<sup>2</sup>=0,56), dos modelos con dos factores edáficos (K<sup>+</sup> - Mg<sup>+</sup>, R<sup>2</sup>=0,61) y (K<sup>+</sup> - A, R<sup>2</sup>=0,79) y un modelo con tres factores (K<sup>+</sup> - A - Mg<sup>+</sup>, R<sup>2</sup>=0,79).

Para peso de vaina (PV) se obtuvo cuatro modelos de regresión lineal con un factor edáfico (K, R<sup>2</sup>=0,68), (K<sup>+</sup>, R<sup>2</sup>=0,67), (HR, R<sup>2</sup>=0,63) y (CE, R<sup>2</sup>=0,61), un modelo con dos factores (AR - K<sup>+</sup>, R<sup>2</sup>=0,84), finalmente un modelo con seis factores (pH - P - K - Ar - K<sup>+</sup> - HR, R<sup>2</sup>=0,96). Estos resultados son similares a los hallados en *Pinus taeda* L. donde se encontró que el 74% de la variación en el IS era explicada por el modelo que incluía Ca, K y A (Subedi y Fox, 2016), en *Tsuga heterophylla* (Raf.) Sarg. Kayahara *et al.* (1995) encontraron los modelos IS=44,4 - 3,24 (K extraíble)<sup>0,5</sup> con R<sup>2</sup>=0,33, SEE=7,2 para el suelo mineral e IS=32,8 - 0,000021 (K extraíble)<sup>2</sup> con R<sup>2</sup>=0,43, SEE=7,7 para el suelo de bosque, Farrelly *et al.* (2011) anotaron que pH, P, K, Mg, NO<sub>3</sub> disponibles son indicadores de CS de *Picea sitchensis* (Bong.) Carr. con R<sup>2</sup>=0,32, SEE=4,19; y otros estudios de CS y propiedades edáficas en especies como *Populus tremuloides* Michx (Pinno *et al.*, 2009), *Picea abies* (L.) Karst. (Seynave *et al.*, 2005), *Picea mariana* (Mill.) Britton, Sterns y Poggenb. y *Pinus pinea* L. (Hamel *et al.*, 2004), *Pinus brutia* Ten., *Pinus nigra* J.F.Arnold y *Cedrus libani* A.Rich. (Aertsen *et al.*, 2010). Finalmente se debe mencionar que, las propiedades físicas y químicas, esencialmente basadas en mediciones locales, normalmente crean modelos de IS con una bondad de ajuste de regular a alta, con valores de R<sup>2</sup> que oscilan entre el 50% al 80% (Bontemps y Bouriaud, 2014).

**Caracterización de sitio de *Tara spinosa*.**— *Tara spinosa* en el departamento de Cajamarca se encuentra desde los 1396 a 2904 m snm., con temperaturas de 6,17 a 27,5 °C, con precipitaciones de 394 mm a 1029 mm, humedad relativa entre 58%

a 85%. En suelos compuestos por arena de 30% a 54%, limo de 24% a 38%, arcilla 18% a 40%, los mismo que presentan las clases texturales arenosos (A), francos (Fr), francos arenosos (FrA), franco arcillosos (FrAr) hasta suelos pedregosos, con pH neutros a ligeramente alcalinos (6,6 – 7,8), materia orgánica de 0,16 % hasta 2,43 %, fosforo de 1,4 hasta 16,2 ppm, potasio de 40 hasta 172 ppm, con un CIC de 12 hasta 20, con distribución de cationes:  $\text{Ca}^{+2}$  entre 2,87 a 4,73 meq/100 g,  $\text{K}^{+}$  de 0,05 a 0,51 meq/100 g,  $\text{Na}^{+}$  entre 0,1 a 0,8 meq/100 g,  $\text{Al}^{+3} + \text{H}^{+}$  de 0,0 a 2,2 meq/100 g, con suma de cationes y bases de 11,69 a 20, con una saturación de bases de 77 a 100 % y en suelos muy ligeramente salinos 0,07 a 0,24 C.E (dS/M).

## CONCLUSIONES

Los materiales de Magdalena (Cajamarca) superaron significativamente ( $p < 0,05$ ) en largo, ancho y peso de fruto al resto de materiales de otras localidades. La variable morfológica largo de fruto mostró una alta asociación con los factores  $\text{K}^{+}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y moderada con A, por su parte peso de fruto con HR, P, K,  $\text{K}^{+}$  y pH. Asimismo, a través de los modelos lineales se determinó que el largo y el peso del fruto son buenos indicadores de calidad de sitio de *Tara spinosa*.

Debido a que la producción de fruto es el aspecto comercial más importante en taya, los estudios de calidad de sitio para esta especie deben buscar indicadores relacionados con este aspecto, como largo, ancho y peso de fruto. Del mismo modo, estos caracteres son los más importantes para el establecimiento de un banco de germoplasma e implementación de programas de mejora genética.

## AGRADECIMIENTOS

A Marco Alexander Zafra Villena por su apoyo en la elaboración del mapa de la localización de la zona de estudio. A Junior Nerio Villena por la adecuación de figuras.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acosta Chilcón, G. (2013). Influencia de diferentes dosis de abonos orgánicos en el rendimiento de *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze en la provincia de San Marcos, región Cajamarca. Tesis Pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca. Perú.
- Aertsen, W., Kint, V., van Orshoven, J., Özkan, K. y Muys, B. (2010). Comparison and ranking of different modelling techniques for prediction of site index in Mediterranean mountain forests. *Ecological Modelling* 221 (8): 1119-1130. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.01.007>
- Afif Khouri, E., Cámara Obregón, M. A., Oliveira Prendes, J. A., Gorgoso Varela, J. J. y Canga Líbano, E. (2010). Relationship among soil parameters, tree nutrition and site index of *Pinus radiata* D. Don in Asturias, NW Spain. *Forest Systems* 19 (1): 77-88. <https://doi.org/10.5424/FS/2010191-01169>

- Anda, M., Suryani, E. y Husnain, S. D. (2015). Strategy to reduce fertilizer application in volcanic paddy soils: Nutrient reserves approach from parent materials. *Soil and Tillage Research* 150: 10-20. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.01.005>
- Andenmatten, E. y Letourneau, F. (1998). Curvas de índice de sitio y crecimiento en altura para pino oregón (*Pseudotsuga menziesii*) (Mirb.) Franco de aplicación en la región andino patagónica de las provincias de Río Negro y Chubut, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata* 103 (1): 69-75.
- Assmann, E. (1970). Section d: Structure, increment and yield of stands in relation to silvicultural treatment. In the principles of forest yield study. pp. 240-433. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-006658-5.50008-X>
- Björklund, H., Parkkinen, A., Hakkari, T., Heikkinen, R. K., Virkkala, R. y Lensu, A. (2020). Predicting valuable forest habitats using an indicator species for biodiversity. *Biological Conservation* 249: 108682. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCON.2020.108682>
- Bonilla, H., López, A., Carbajal, Y. y Siles, M. (2016). Análisis de variables morfo-métricas de frutos de “tara” provenientes de Yauyos y Ayacucho para identificar caracteres agromorfológicos de interés. *Scientia Agropecuaria* 7 (3): 157-164. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2016.03.01>
- Bontemps, J. D. y Bouriaud, O. (2014). Predictive approaches to forest site productivity: recent trends, challenges and future perspectives. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 87 (1): 109-128. <https://doi.org/10.1093/FORESTRY/CPT034>
- Bueno López, S., Torres Herrera, J. y García, M. (2015). Factores edáficos-fisiográficos y calidad de sitio del *Pinus occidentalis* Sw. *Madera y Bosques* 21 (3): 83-93. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.213458>
- Cornejo, E., Pereyra, A., Mares, O., Valencia, S. y Flores, C. (2005). Índice de sitio para *Pinus montezumae* Lamb. en la región de cd. Hidalgo, Michoacán. *Revista Fitotecnia Mexicana* 28 (3): 213-219. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61028305%0ACómo>
- Cruzado Jacinto, L., Chávez Villavicencio, C. y Charcape Ravelo, M. (2019). Uso y selección de las partes aéreas del algarrobo *Prosopis pallida* (Fabaceae) por reptiles, aves y mamíferos en Sechura (Piura - Perú). *Revista Peruana de Biología* 26 (1): 81-86. <http://dx.doi.org/10.15381/rpb.v26i1.15417>
- Emamgolizadeh, S., Bateni, S. M., Shahsavani, D., Ashrafi, T. y Ghorbani, H. (2015). Estimation of soil cation exchange capacity using genetic expression programming (GEP) and multivariate adaptive regression splines (MARS). *Journal of Hydrology* 529: 1590-1600. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.025>
- Fairhurst, T. (1999). Nutrient use efficiency in oil palm: measurement and management. *The Planter* 75: 173-177. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=MY2000000070>
- Farrelly, N., Ní Dhubháin, Á. y Nieuwenhuis, M. (2011). Site index of Sitka spruce (*Picea sitchensis*) in relation to different measures of site quality in Ireland. *Canadian Journal of Forest Research* 41 (2): 265-278. <https://doi.org/10.1139/X10-203>
- Fernández, M. (2007). Fósforo: amigo o enemigo. *ICIDCA* 2: 50-57. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223114970009%0ACómo>

- Ferre, M. E. (2019). *Fundamentos estadísticos para investigación, introducción a R: Modelos de regresión*. Universidad de Murcia, España, 69 pp.
- Ferreira, D. F. (2011). Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agro-tecnologia* 35 (6): 1039-1042. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>
- Gadow, K., Sánchez Orois, S. y Álvarez González, J. G. (2007). Estructura y crecimiento del bosque. *IUFRO World Series* 12, 242 p. [http://www.iww.forst.uni-goettingen.de/doc/kgadow/lit/kvgestructura\\_y\\_crecimiento\\_del\\_bosque.pdf](http://www.iww.forst.uni-goettingen.de/doc/kgadow/lit/kvgestructura_y_crecimiento_del_bosque.pdf)
- Gagnon, E., Bruneau, A., Hughes, C. E., de Queiroz, L. y Lewis, G. P. (2016). A new generic system for the pantropical *Caesalpinia* group (Leguminosae). *PhytoKeys* 71: 1-160. <https://doi.org/10.3897/phytokeys.71.9203>
- García Aguilar, J. Á., Velasco Velasco, V., Rodríguez Ortiz, G. y Enríquez del Valle, J. (2017). Influence of site index on the growth of *Pinus patula* Schlttdl. et Cham. plantations. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 8 (44): 132-154. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-11322017000600132&lng=en&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322017000600132&lng=en&nrm=iso&tlng=en)
- Gonda, H. y MacAndrews, M. (2001). El largo de las acículas como indicador de la calidad de sitio en plantaciones de pino ponderosa en Neuquén: Altura-diámetro, volumen total sin corteza, calidad de sitio en base al largo de entrenudos o acículas, productividad para densidades variables. *Ficha Técnica. CIEFAP - Patagonia Forestal VIII* (1): 7-10.
- Hamel, B., Bélanger, N. y Paré, D. (2004). Productivity of black spruce and Jack pine stands in Quebec as related to climate, site biological features and soil properties. *Forest Ecology and Management* 191 (1-3): 239-51. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.12.004>
- Hargreaves, A. L., Germain, R. M., Bontrager, M., Persi, J. y Angert, A. L. (2020). Local adaptation to biotic interactions: a meta-analysis across latitudes. *The American Naturalist* 195 (3): 395-411. <https://doi.org/doi:10.1086/707323>
- Herrera, B. y Alvarado, A. (1998). Calidad de sitio y factores ambientales en bosques de Centro América. *Agronomía Costarricense* 22 (1): 99-117.
- Interián Ku, V. M., Vaquera Huerta, H., Valdez Hernández, J. I., García Moya, E., Romero Manzanares, A. y Borja De La Rosa, A. (2014). Influencia de factores morfológicos y ambientales sobre el crecimiento en diámetro de *Caesalpinia gaumeri* Greenm en un bosque tropical caducifolio, en México. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 20 (3): 255-270. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.05.018>
- Iturre, M. y Araujo, P. (2006). *Crecimiento y producción del rodal regular*. Serie didáctica N°. 23. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero. 76 pp.
- Kayahara, G. J., Carter, R. E. y Klinka, K. (1995). Site index of western hemlock (*Tsuga heterophylla*) in relation to soil nutrient and foliar chemical measures. *Forest Ecology and Management* 74 (1-3): 161-169. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(94\)03493-G](https://doi.org/10.1016/0378-1127(94)03493-G)
- LeBauer, D. y Treseder, K. K. (2008). Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed. *Ecology* 89 (2): 371-379. <https://doi.org/10.1890/06-2057.1>

- López, J. (2013). *Identificación de zonas aptas para la recuperación del bosque de alta montaña del estado de México*. Tesis Magister. Universidad Autónoma del Estado de México.
- López, J. y Valles, A. (2009). Modelos para la estimación del índice de sitio para *Pinus durangensis* Martínez en San Dimas, Durango. *Ciencia Forestal en México* 34 (105): 185-196.
- Louw, J. H. y Scholes, M. C. (2006). Site index functions using site descriptors for *Pinus patula* plantations in South Africa. *Forest Ecology and Management* 225: 94-103. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.12.048>
- Maathuis, F. J. (2009). Physiological functions of mineral macronutrients. *Current Opinion in Plant Biology* 12 (3): 250-258. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.04.003>
- Martínez Salvador, M., Valdez Cepeda, R. y García Pompa, M. (2013). Influencia de variables físicas en la productividad de *Pinus arizonica* y *Pinus engelmannii* en el Sur de Chihuahua, México. *Madera y Bosques* 19 (3): 35-49. <https://doi.org/10.21829/myb.2013.193326>
- McDonald, P. M., Skinner, C. N. y Fiddler, G. O. (1991). Ponderosa pine needle length: an early indicator of release treatment effectiveness. *Canadian Journal of Forest Research* 22: 761-764. <https://doi.org/https://doi.org/10.1139/x92-103>
- Meinzer, F. C. (2003). Functional convergence in plant responses to the environment. *Oecologia* 134: 1-11. <https://doi.org/10.1007/s00442-002-1088-0>
- Mendoza, R. y Espinoza, A. (2017). *Guía técnica para muestreo de suelos*. Universidad Nacional Agraria (UNA), y el programa de Agricultura, Suelo y Agua (ASA), financiado por la Fundación Haward Buffett (HGBF) y ejecutado por el Catholic Relief Services (CRS) Managua, Nicaragua. 56 pp. <http://repositorio.una.edu.ni/3613/1/P33M539.pdf>
- Mengel, K. y Kirkby, E. (2000). *Principios de nutrición vegetal* (4 Ed. (1 E)). Instituto Internacional de la Potasa, Basilea, Suiza. 597 pp.
- Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI). (2019). Producción y comercio de la tara en el Perú. <http://www.siicex.gob.pe/siicex/documentosportal/alertas/documento/doc/168510289radF57F7.pdf>
- Monserud, R. A. y Rehfeldt, G. E. (1990). Genetic and environmental components of variation of site index in Inland Douglas-Fir. *Forest Science* 36 (1): 1-9. <https://academic.oup.com/forestscience/article-abstract/36/1/1/4642527>
- Montero Mata, M. (1999). Factores de sitio que influyen en el crecimiento de *Tectona grandis* L. F. y *Bombacopsis quinata* (Jacq.) Dugand, en Costa Rica. Tesis Magister. Universidad Atras de Chile. Valdivia. Chile.
- Pietrzykowski, M. (2010). Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) ecosystem macronutrients budget on reclaimed mine sites-stand trees supply and stability. *Natural Science* 2 (6): 590-599. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4236/ns.2010.26074>
- Pinno, B. D., Paré, D., Guindon, L. y Bélanger, N. (2009). Predicting productivity of trembling aspen in the Boreal Shield ecozone of Quebec using different sources of soil and site information. *Forest Ecology and Management* 257 (3): 782-789. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.09.058>

- Rehfeldt, G. E. (1995). Genetic variation, climate models and the ecological genetics of *Larix occidentalis*. *Forest Ecology and Management* 78 (1-3): 21-37. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(95\)03602-4](https://doi.org/10.1016/0378-1127(95)03602-4)
- Reynel, C., Pennington, T. D., Pennington, R. T., Marcelo, J. y Daza, A. (2006). Árboles útiles del Ande peruano: una guía de identificación, ecología y propagación de las especies de la Sierra y los Bosques Montanos en el Perú. Herbario de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria - La Molina, Royal Botanic Gardens Kew, Royal Botanic Gardens Edinburgh, APRODES. 463 pp.
- Schoenholtz, S. H., Miegroetb, H. Van. y Burger, J. A. (2000). A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management* 138: 335-356. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00423-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00423-0)
- Scott, D. A., Proctor, J. y Thompson, J. (1992). Ecological studies on a lowland evergreen rain forest on Maraca Island, Roraima, Brazil. II. Litter and nutrient cycling. *Journal of Ecology* 80 (4): 705-717. <https://doi.org/https://doi.org/10.2307/2260861>
- Seynave, I., Gégout, J. C., Hervé, J. C., Dhôte, J. F., Drapier, J., Bruno, E. y Dumé, G. (2005). *Picea abies* site index prediction by environmental factors and understorey vegetation: A two-scale approach based on survey databases. *Canadian Journal of Forest Research* 35 (7): 1669-1678. <https://doi.org/10.1139/x05-088>
- Shipley, B. (2002). Cause and correlation in Biology: A user's guide to path analysis, structural equations and causal inference. Cambridge University Press, 317 pp. <https://doi.org/doi:10.1017/CBO9780511605949>
- Singh, K. (2013). Estimating potential productivity of forests (Chapter 14). In Capacity building for the planning, assessment and systematic observations of forests. In *Environmental Science and Ingeniering*. <https://ibook.pub/estimating-potential-productivity-of-forests.html>
- Skovsgaard, J. P. y Vanclay, J. K. (2008). Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 81 (1): 13-31. <https://doi.org/10.1093/FORSTRY/CPM041>
- Soto Sánchez, S. (2019). Influencia de la calidad de sitio en la producción maderable del *Pinus radiata* D. Don, en el parque forestal Cumbe Mayo, Cajamarca. Tesis Magister. Universidad Nacional de Cajamarca. Cajamarca. Perú.
- Squillace, A. E. y Silen, R. R. (1962). Racial variation in ponderosa pine. *Forest Science-Monograph* 2: 1-26.
- Subedi, S. y Fox, T. (2016). Predicting loblolly pine site index from soil properties using partial least-squares regression. *Forest Science* 62 (4): 449-456. <https://doi.org/10.5849/FORSCI.15-127>
- Ugarte Guerra, L. y Domínguez Torrejón, G. (2010). Índice de sitio (IS) de *Calyco-phyllum spruceanum* Benth. en relación con la altura dominante del rodal en ensayos de plantación en la cuenca del Aguytía, Ucayali, Perú. *Ecología Aplicada* 9 (2): 101-111.

- Vallejos Barra, O. (1996). Productividad y relaciones del índice de sitio con variables fisiográficas, edafoclimáticas y foliares para *Tectona grandis* L.F., *Bombacopsis quinatum* (Jacq.) Dugand y *Gmelina arborea* Roxb. en Costa Rica. Tesis Doctoral. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Costa Rica.
- Vargas Larreta, B., Álvarez González, J. G., Corral Rivas, J. J. y Aguirre Calderón, Ó. (2010). Construcción de curvas dinámicas de índices de sitio para *Pinus cooperi* Blanco. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33 (4): 343-351.
- Vásquez, H. V., Valqui, L., Bobadilla, L. G., Arbizu, C. I., Alegre, J. C. y Maicelo, J. L. (2021). Influence of arboreal components on the physical-chemical characteristics of the soil under four silvopastoral systems in northeastern Peru. *Heliyon* 7 (8): e07725. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2021.E07725>
- Vásquez, W. y Ugalde, L. (1995). Rendimiento y calidad de sitio para *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, *Bombacopsis quinatum* y *Pinus caribaea* en Guanacaste. Informe Técnico. En: Serie Técnica N° 256. Turrialba. Costa Rica. CATIE, 33 pp.
- Villar Cabeza, M., Marcelo Bazán, F. y Vaselli, R. (2015). Calidad de sitio de la *Cinchona officinalis* L. In *Estudio silvicultural de la Cinchona officinalis* L. (pp. 123–155). Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), Cajamarca. Perú.
- Villena, J. J. y Seminario, J. (2021). Origen y domesticación de *Tara spinosa* (Leguminosae, Caesalpinioideae). *Lilloa* 58 (2): 131-159. <https://doi.org/https://doi.org/10.30550/j.lil/2021.58.2/2021.11.14>
- Villena, J. J., Seminario, J. F. y Valderrama, M. (2019). Variabilidad morfológica de la “tara” *Caesalpinia spinosa* (Molina.) Kuntze (Fabaceae), en poblaciones naturales de Cajamarca: descriptores de fruto y semilla. *Arnaldoa* 26 (2): 555-574.
- Villena Velásquez, J. J. (2007). Determinación de la calidad de sitio para *Pinus patula* en la Cooperativa Atahualpa Jerusalén Granja Porcón – Cajamarca. Tesis Pregrado. Universidad Nacional de Cajamarca, Perú.
- Wang, S., Wang, X. y Ouyang, Z. (2012). Effects of land use, climate, topography and soil properties on regional soil organic carbon and total nitrogen in the Upstream Watershed of Miyun Reservoir, North China. *Journal of Environmental Sciences* 24 (3): 387-395. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(11\)60789-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(11)60789-4)
- Watt, M. S., Palmer, D. J., Kimberley, M. O., Höck, B. K., Payn, T. W. y Lowe, D. J. (2010). Development of models to predict *Pinus radiata* productivity throughout New Zealand. *Canadian Journal of Forest Research* 40 (3): 488-499. <https://doi.org/10.1139/X09-207>