

UNIVERSIDAD NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL MAR
ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES

**FACTORES EDÁFICOS QUE INFLUYEN EN EL
CRECIMIENTO DE PLANTACIONES DE TECA (*Tectona grandis*
L. f) CLONAL EN SUELOS FUERTEMENTE METEORIZADOS
EN POCOSOL, ALAJUELA, COSTA RICA**

Tesis con formato artículo científico para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Ciencias Forestales con énfasis en Manejo Forestal.

Presentado por
Isaac Mesén Montano

Campus Omar Dengo
Heredia, Costa Rica
2021

Factores edáficos que influyen en el crecimiento de plantaciones de teca (*Tectona grandis* L. f) clonal en suelos fuertemente meteorizados en Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Trabajo de graduación bajo la modalidad de tesis con formato artículo científico.
Licenciatura en Ingeniería en Ciencias Forestales con énfasis en manejo forestal.

Miembros del tribunal examinador:

M. Sc. Fabio Chaverri Fonseca
Decano a.i. Facultad de Ciencias de la Tierra y
el Mar

M. Sc. Pablo Ramírez Granados
Representante de la Dirección de la
EDECA

M. Sc. Rafael Murillo Cruz
Director del trabajo

Dr. Alfredo Alvarado Hernández
Lector del trabajo

M. Sc. Carlos Enrique Ávila Arias
Lectora del trabajo

Bach. Isaac Mesén Montano
Postulante del trabajo

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi madre y padre: María Magdalena Montano Romero y Nery Mesén Badilla, quienes, bajo toda humildad, se han empeñado en que mi persona alcance grandes logros, dándome su apoyo incondicional e infundiéndome grandes valores como lo son el trabajo, el respeto y la honradez, por los cuales, doy gracias y estaré agradecido para toda mi vida.

A mis hermanos Iván, Jonathan y Asdrúbal y hermanas Ivannia y Yendry, los cuales, de una u otra manera, siempre están jugando un gran rol en mi vida cotidiana.

Agradecimientos

Al culminar esta etapa de mi vida profesional, quiero dar gracias a Dios por no abandonarme nunca, evitando desfallecer y, al mismo tiempo, concluir con esta investigación.

A mi familia, por ser el motor que me impulsa en el camino con dirección a alcanzar metas sin desfallecer.

A mi tutor de tesis, Rafael Murillo Cruz, por su apoyo incondicional en todas las etapas de esta investigación, siendo un maestro y más que todo, un amigo invaluable, con un gran afán por enseñar, motivar y exigir lo mejor de las personas, para que alcancen sus metas.

A mis lectores Carlos Ávila Arias y Alfredo Alvarado por todas sus observaciones dadas en el documento y además por diseminar su conocimiento entorno al área forestal.

A Diana Mora Campos, Gilberto Brenes Navarro, Sofía Coto y demás personas que me apoyaron en los análisis de suelo respectivos, a la par de los cuales adquirí gran conocimiento.

Muy especiales a la empresa PROTEAK S.A. y su personal en Costa Rica, por haberme abierto las puertas para poder desarrollar este trabajo.

A la familia Vargas Castro y a todas las demás personas que de una u otra forma ayudaron a que esta investigación saliera avante y a los cuales tengo muy presente, sin embargo, sería muy extensa su citación.

Índice general

Contenido	Páginas
Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos.....	iii
Índice general	iv
Índice de cuadros.....	vi
Índice de figuras	viii
Resumen general.....	1
General abstract	1
Introducción general.....	3
Conclusiones generales.....	5
Referencias	6
Artículos completos.....	8
Artículo I: Factores edáficos que influyen en el crecimiento de plantaciones de teca (<i>Tectona grandis</i> L. f.) clonal en suelos fuertemente meteorizados en Pocosol, Alajuela, Costa Rica.	8
Resumen.....	8
Abstract.....	8
1. Introducción.....	9
2. Materiales y métodos.....	11
3. Resultados.....	13
4. Discusión	26
5. Conclusiones.....	32
6. Referencias	33
Artículo II: Análisis espacial del crecimiento de plantaciones de teca (<i>Tectona grandis</i> L. f.) clonal en suelos fuertemente meteorizados en Pocosol, Alajuela, Costa Rica.	36
Resumen.....	36
Abstract.....	36
1. Introducción.....	37
2. Metodología.....	41
2.1. Análisis exploratorio de los datos.....	42
2.2. Confección del semivariograma	43

2.2.1. Cálculo de la distancia entre PPM.....	43
2.2.2. Cálculo de la varianza entre el valor de altura dominante de cada PPM.....	44
2.2.3. Nube de semivariograma y de categorías.....	44
2.2.4. Semivariograma empírico.....	45
2.3. Interpolación.....	45
2.4. Cálculo del área por índice de sitio.....	45
2.5. Prueba de validación de la estimación de los modelos.....	45
3. Resultados.....	46
3.1. Análisis exploratorio de los datos.....	46
3.1.1. Detección de errores.....	46
3.1.2. Representación de probabilidad.....	46
3.1.3. Resumen estadístico.....	47
3.1.4. Análisis univariante.....	48
3.1.5. Semivariograma empírico y ajuste de modelos.....	48
3.1.6. Interpolación.....	49
4. Discusión.....	52
5. Conclusiones.....	53
6. Referencias.....	54

Índice de cuadros

Artículo I: Factores edáficos que influyen en el crecimiento de plantaciones de teca (*Tectona grandis* L. f.) clonal en suelos fuertemente meteorizados en Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Contenido	Página
Cuadro 1. Características generales de la región climática Zona Norte de Costa Rica.....	10
Cuadro 2. Variables asociadas con el buen crecimiento de <i>Tectona grandis</i> L. f.....	11
Cuadro 3. Características dasométricas de los índices de sitio estudiados en <i>Tectona grandis</i> L. f. de 9,2 años de edad, Pocosol, Alajuela, Costa Rica.	12
Cuadro 4. Estadísticos generales (sin distinguir profundidad ni índice de sitio) y promedio por índice de sitio (sin distinguir profundidad) de las variables químicas y físicas del suelo en cultivo de <i>Tectona grandis</i> L. f., Pocosol, Alajuela, Costa Rica.	14
Cuadro 5. Valores promedio de las variables químicas del suelo por profundidad e índice de sitio en cultivo de <i>Tectona grandis</i> L. f., Pocosol, Alajuela, Costa Rica.	16
Cuadro 6. Valores promedio de las variables físicas del suelo por profundidad e índice de sitio en cultivo de <i>Tectona grandis</i> L. f., Pocosol, Alajuela, Costa Rica.	17
Cuadro 7. Variables químicas y físicas del suelo en cultivo de <i>Tectona grandis</i> L. f. que presentan diferencias significativas entre el índice de sitio 18 y el 30 al aplicar la prueba de t en la profundidad de 0-15 cm, 15-30 cm y 30-60 cm, Pocosol, Alajuela, Costa Rica.	19
Cuadro 8. Coeficientes de correlación de Pearson entre la altura dominante de <i>Tectona grandis</i> L. f. y las variables químicas y físicas del suelo por profundidad de muestreo, Pocosol, Alajuela, Costa Rica.	21
Cuadro 9. Características físicas de suelo para cinco perfiles y cinco índices de sitio en cultivo de <i>Tectona grandis</i> L. f., Pocosol, Alajuela, Costa Rica.	22
Cuadro 10. Características químicas de suelo para cinco perfiles y cinco índices de sitio en cultivo de <i>Tectona grandis</i> L. f., Pocosol, Alajuela, Costa Rica.	23
Cuadro 11. Modelos con mayor relación entre la altura dominante de <i>Tectona grandis</i> L. f. y variables de suelo para tres profundidades de suelo, Pocosol, Alajuela, Costa Rica.	25

Artículo II: Análisis espacial del crecimiento de plantaciones de teca (*Tectona grandis* L. f.) clonal en suelos fuertemente meteorizados en Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Contenido	Páginas
Cuadro 1. Valores empleados para la clasificación de la altura dominante.	43
Cuadro 2. Estadísticos de la variable altura dominante.	47
Cuadro 3. Parámetros del semivariograma seleccionado para la interpolación de la altura dominante por medio del interpolador Kriging.	49
Cuadro 4. Características de estimación de los interpoladores Kriging Ordinario e IDW para los valores de altura dominante empleados en las interpolaciones.	50
Cuadro 5. Validación de la estimación espacial de los métodos Kriging Ordinario e IDW.	50

Índice de figuras

Artículo I: Factores edáficos que influyen en el crecimiento de plantaciones de teca (*Tectona grandis* L. f.) clonal en suelos fuertemente meteorizados en Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Figura 1. Valores promedio por índice de sitio y profundidad de las variables que más influyen en el crecimiento de *Tectona grandis* L. f., Pocosol, Alajuela, Costa Rica. 18

Figura 2. Perfiles de suelo por índice de sitio en *Tectona grandis* L. f., Pocosol, Alajuela, Costa Rica. 24

Artículo II: Análisis espacial del crecimiento de plantaciones de teca (*Tectona grandis* L. f.) clonal en suelos fuertemente meteorizados en Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Figura 1. Semivariograma y sus componentes. 40

Figura 2. Mapa de uso de las fincas empleadas en el estudio. 42

Figura 3. Determinación de la distancia entre dos PPM. 43

Figura 4. Matriz de cálculo de la diferencia al cuadrado de las coordenadas X y Y en Microsoft Excel. 44

Figura 5. Determinación de la distancia entre cada PPM. 44

Figura 6. Cálculo de la varianza de la altura dominante. 44

Figura 7. Análisis gráfico de la distribución espacial y frecuencia absoluta de la variable altura dominante. 46

Figura 8. Gráfico de probabilidad cuantil-cuantil de los valores de altura dominante. 47

Figura 9. Representación de los estadísticos. 48

Figura 10. Distribución de las semivarianzas de la altura dominante y agrupamiento por clases de distancia de separación. 48

Figura 11. Modelos de semivariograma utilizados para el ajuste de la semivarianza de la variable altura dominante y modelo de mayor ajuste. 49

Figura 12. Interpolación de la altura dominante por el método Kriging Ordinario empleando el modelo lineal y clasificación según el índice de sitio. 51

Figura 13. Interpolación de la altura dominante por el método IDW y clasificación según el índice de sitio. 52

Factores edáficos que influyen en el crecimiento de plantaciones de teca (*Tectona grandis* L. f) clonal en suelos fuertemente meteorizados en Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Resumen general

Conocer los factores que afectan el crecimiento de *Tectona grandis* L. f. clonal, resulta esencial, para poder determinar la idoneidad de los sitios a ser plantados, asimismo, analizar espacialmente el crecimiento postestablecimiento, ayuda a identificar áreas que requieren un tratamiento especial para alcanzar una producción rentable, así como a estimar la producción alcanzada y sus proporciones. El objetivo de este estudio es determinar los factores edáficos que influyen en el crecimiento de la especie en suelos rojos fuertemente meteorizados, además, analizar espacialmente su crecimiento sobre dichos suelos y con ello conocer las condiciones idóneas para un buen crecimiento, así como la composición productiva espacial que presentan plantaciones ya establecidas sobre este tipo de suelos. Para ello en plantaciones clonales de 9,2 años de edad, se estudiaron propiedades físicas y químicas del suelo en tres profundidades (0-15, 15-30 y 30-60 cm) dentro de 50 parcelas de 500 m² en cinco calidades de sitio (18, 21, 24, 27 y 30), además, se realizaron interpolaciones de valores de altura dominante mediante el programa Arc Map 10.8, empleando los métodos IDW y Kriging Ordinario e información recabada de 146 parcelas de 500 m², distribuidas en un área de 227,1 ha y validadas con base en 27 parcelas adicionales. A partir de lo anterior, se logró identificar que las variables que condicionan el crecimiento de la especie en suelos rojos son la Sat Ac alta (> 3 %), la CICE baja ($\leq 3,5 \text{ cmol}(+)*\text{l}^{-1}$) y el contenido de Fe alto ($\geq 80 \text{ mg}*\text{l}^{-1}$) y se logró determinar que las plantaciones alcanzarían un índice de sitio promedio ponderado de 24,7 m a los 16 años de edad, el área estaría compuesta en un 0,1 %, 12,4 %, 51,0 %, 36,1 % y 0,4 % por los índices de sitio 18, 21, 24, 27 y 30, respectivamente, y que los valores estimados de altura dominante en las interpolaciones, usando cualquiera de los dos interpoladores, se desvían en promedio un 10 % de los valores reales, error bastante aceptable, mostrando ser una buena herramienta de análisis del crecimiento para la especie.

Palabras clave: índice de sitio, factores limitantes, suelos rojos, análisis espacial, interpolación.

General abstract

Know the factors that affect the growth of *Tectona grandis* L. f. clonal is essential to be able to determine the suitability of the sites to be planted, likewise, spatially analyze the post-establishment growth, helps to identify areas that require special treatment to achieve profitable production, as well as to estimate the production achieved and its proportions. The objective of this study is to determine the edaphic factors that influence the growth of the species in strongly weathered red soils, in addition, to spatially analyze its growth on said soils and thus to know the ideal conditions for its good growth, as well as the spatial productive composition of plantations already established on this type of soil. For this, in 9.2-year-old clonal plantations, physical and chemical properties of the soil were studied at three depths (0-15, 15-30 and 30-60 cm) within 50 plots of 500 m² in five site qualities (18, 21, 24, 27 and 30), in addition, interpolations of dominant height values were performed through the Arc Map 10.8 program using the IDW and Ordinary Kriging methods with information collected from 146 plots of 500 m² distributed in an area of 227.1 ha and validated based on 27 additional plots. Finding that the variables that condition the growth of the species in red

soils are high Ac Sat ($> 3 \%$), low CICE ($\leq 3.5 \text{ cmol (+) * l}^{-1}$) and high Fe content ($\geq 80 \text{ mg*l}^{-1}$) and determining that the plantations would reach a weighted average site index of 24.7 m at 16 years of age, the area would be composed of 0.1 %, 12.4 %, 51.0 %, 36.1 % and 0.4 % by site indexes 18, 21, 24, 27 and 30 respectively and that the estimated values of dominant height in the interpolations using either of the two interpolators deviate 10 % from the real, quite acceptable error, proving to be a good growth analysis tool for the species.

Keywords: site index, limiting factors, red soils, spatial analysis, interpolation.

Introducción general

Tectona grandis L. f. conocida como teca o *teak*, es originaria del continente asiático, donde naturalmente cubre casi 28 millones de hectáreas y se encuentra en países como Myanmar (59,1 %), India (31,9 %), Tailandia (8,9 %) y Laos (0,1 %) (Keogh, 2013). Su madera, debido a sus propiedades físico-mecánicas, tiene alta demanda alrededor del mundo, aunque su oferta se ha visto disminuida por la veda total del aprovechamiento en bosques naturales de dichos países, con excepción de Myanmar donde sí es permitido (Keogh, 2013). Lo anterior ha impulsado a lo largo de los años, al establecimiento de teca en plantaciones puras y otros sistemas productivos dentro y fuera de su rango de distribución natural. Se estiman poco más de tres millones de hectáreas plantadas, distribuidas en Asia (86,1 %), África (9,3 %) y América Latina (4,6 %); asimismo, esta especie abarca alrededor del mundo el 74 % del área plantada con maderas duras de alto valor (Keogh, 2013).

En Costa Rica por su parte, la especie a través de los años ha venido tomando auge en el área de producción de madera, pasando de 300 ha en la década de 1970 (Keogh et al., 1978, citado por Camino y Morales, 2013) a ser, en el año 2014, la especie con mayor área plantada a nivel nacional, con cerca de 47 167 ha (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC], 2015), impactando de forma positiva, al generar fuentes de empleo en diferentes áreas y frecuentemente en zonas rurales ya que es ahí en donde se establecen las plantaciones y es también ahí en donde se demanda mano de obra en sus diferentes etapas, dicha afirmación es reforzada por lo mencionado por Arias (2004) indicando que el sector forestal “genera alrededor de 18 247 empleos permanentes directos, de los cuales el 38 % corresponde al sector primario, el cual se desarrolla fundamentalmente en las áreas rurales” (p. 6).

En torno al éxito de los proyectos desarrollados con la especie, no todas las áreas han alcanzado altas tasas de crecimiento y esto debido a que han sido establecida en diversos sitios con características climáticas, edáficas y topográficas diferentes, en relación también Arias, Calvo, Arguedas y Salas (2005) asocian patologías y en específico el llamado Síndrome de Decaimiento de la Teca (SDLT) con factores relacionados con el suelo. Lo anterior ha impulsado a desarrollar investigaciones que ayuden a identificar los factores que afectan su buen desarrollo. Es por ello que hoy en día se cuenta con una importante cantidad de información, no obstante, aún existen vacíos que impiden comprender a plenitud sus requerimientos, así mismo la necesidad de emplear herramientas que ayuden a identificar, estudiar y a dar un trato especial a aquellas áreas que así lo requieran para alcanzar una producción rentable e inclusive a poder estimar su extensión con mucha más precisión y a un menor costo.

En torno a las investigaciones desarrolladas, se han logrado asociar diferentes factores con el buen crecimiento de la especie, por ejemplo, una precipitación media $> 1900 \text{ mm} \cdot \text{año}^{-2}$ condicionado a periodos de sequía que no se prolonguen por más de tres meses y una temperatura media de $26 \text{ }^\circ\text{C}$, paisajes de ondulados a planos donde no se exceda un 25 % de pendiente y los mismos presenten una poca o mediana pedregosidad externa, se define como altura óptima elevaciones $< 220 \text{ msnm}$, requiriendo suelos profundos (preferiblemente de 90 cm o más) con contenido de $\text{Ca} > 4 \text{ (cmol(+)}\cdot\text{l}^{-1})$ y saturación del mismo $> 40 \%$, de saturación de bases $> 43 \%$, de acidez $< 10 \%$, arcilla $< 58 \%$, una compactación nula o baja, donde el drenaje sea moderado a bueno y en condiciones de pH preferiblemente $> 5,5$ (Sarlin, 1957; Hernández, Torres, Márquez y Franco, 1993; Vásquez y Ugalde, 1996; Vallejos, 1996; Montero, 1999; Oliveira, 2003; Alvarado y Fallas, 2004; Mollinedo, Ugalde, Alvarado,

Verjans y Rudy, 2005; Thiele, 2008; Vaides-López, Alvarado-Hernández y Moya-Fernández, 2019). Sin embargo, mucha de la información antes citada ha sido generada con poco énfasis en suelos rojos y de meteorización avanzada, donde también ha sido plantada teca y si bien es cierto, sí se ha generado información, la misma permanece a lo interno de los productores o empresas dueñas de las plantaciones.

Adicionalmente, se conoce poco acerca de la composición productiva de las plantaciones establecidas en esos tipos de suelo (al menos a nivel de material publicado), así como de herramientas que ayuden a cuantificarla con precisión. La clasificación del área y del crecimiento de las plantaciones forestales, por lo general, se hace a partir de parcelas permanentes o temporales de medición (PPM o PTM). Si bien es cierto, dicha información recabada permite tomar gran cantidad de decisiones, es posible potencializarla, máxime sabiendo que establecer cada una de ellas demanda gran cantidad de tiempo y que el mismo se traduce como un costo monetario para las empresas o propietarios de plantaciones. Existen herramientas que han sido utilizadas en otros campos por diferentes autores (Moral, 2004; Muños, Martínez y Giraldo, 2006; Ibarra, Ruiz, Flores y González, 2007; Villatoro, Henríquez y Sancho, 2008; Fortis et al., 2010; Assis, Pereira y Trondoli, 2011; Murillo, Ortega, Carrillo, Pardo y Rendón, 2012) y que pueden ser útiles en el campo forestal, ayudando a tomar decisiones ligadas al manejo (fertilización, raleos, entre otros), al aprovechamiento (planificación de la corta por tipo de producto o nicho de mercado) e inclusive en la toma de decisiones post aprovechamiento (evitar zonas para determinada especie o inclusive planificar la incorporación de especies adicionales).

En torno a lo antes mencionado esta investigación tiene como objetivo proporcionar información que ayude a comprender, y a la vez, tener un mayor acercamiento a los factores que influyen mayormente en el crecimiento de teca en suelos rojos de meteorización avanzada y además conocer mediante el análisis espacial la composición productiva que una plantación con esta especie estaría alcanzando en los mismos y ello mediante el uso de métodos de interpolación y el empleo de sistemas de información geográfica.

Conclusiones generales

Se encontraron diferencias en los factores químicos y físicos del suelo que podrían explicar el crecimiento para teca en cinco calidades de sitio identificadas.

Los suelos estudiados, rojos y altamente meteorizados, poseen en general una fertilidad natural baja para el cultivo de la teca. Las variables que condicionan el crecimiento de la teca en suelos rojos son la Sat Ac alta ($> 3 \%$), la CICE baja ($\leq 3,5 \text{ cmol}(+) \cdot \text{l}^{-1}$) y el contenido de Fe alto ($\geq 80 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$). Los suelos evaluados son deficientes en P ($< 1 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$) y K ($0,1 \text{ cmol}(+) \cdot \text{l}^{-1}$). Se logró confeccionar modelos matemáticos de predicción de crecimiento de la teca en función de variables químicas en las tres profundidades los cuales podrían explicar entre el 47 y 58 % de la variabilidad del crecimiento de la teca en estos suelos.

El análisis espacial del crecimiento de la finca con los métodos Kriging Ordinario e IDW es bastante confiable y permite clasificar el crecimiento en altura dominante de las plantaciones estudiadas sobre suelos rojos fuertemente meteorizados.

La interpolación por el método IDW puede ser una muy buena herramienta para análisis exploratorios previo al establecimiento de PPM en plantaciones forestales de teca o para la estimación de áreas con un mayor grado de detalle espacial, permitiendo al técnico forestal designar a determinadas zonas una mayor intensidad de muestreo, con la cual podría tomar decisiones más precisas y eficaces, al momento de aplicar enmiendas, fertilizantes o inclusive ayudar a priorizar entre áreas para realizar actividades como podas, raleos, entre otros.

El análisis espacial de la teca creciendo sobre suelos rojos fuertemente meteorizados presenta un crecimiento ligeramente superior a la media. Se pueden emplear los interpoladores Kriging Ordinario e IDW para generar mapas de distribución del crecimiento de la teca en este tipo de suelos y obtener resultados estadísticamente similares.

Referencias

- Alvarado, A. y Fallas, J. L. (2004). La saturación de acidez y el encalado sobre el crecimiento de la teca (*Tectona grandis* L. f.) en suelos ácidos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 28(1), 81-87. Recuperado de <https://n9.cl/6eho2>
- Arias, D., Calvo, J., Arguedas, M. y Salas, B. (2005). *Síndrome de la mortalidad de la teca en Costa Rica* (Informe final). Cartago, CR: ITCR. Recuperado de <https://n9.cl/xfwcw>
- Arias, G. (2004). *Análisis del impacto económico y social de las plantaciones forestales en Costa Rica*. San José, CR: FUNDECOR. Recuperado de <https://n9.cl/50qe1>
- Assis, F., Pereira, E. y Trondoli, E. A. (2011). Mapeamento de unidades productivas utilizando a interpolacao geoespacial krigiagem a partir do inventário florestal em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* S. T Blake. *Enciclopédia Biosfera*, 7(13), 727-745. Recuperado de <https://n9.cl/tya8y>
- de Camino, R. y Morales, J. P. (2013). La teca en América Latina. En R. de Camino y J. P. Morales (Eds.), *Las plantaciones de teca en América Latina: mitos y realidades* (págs. 30-41). Turrialba, CR: CATIE. Recuperado de <https://n9.cl/bzgm>
- Fortis-Hernández, M., Huerta-García, A., Segura-Castruita, M. Á., García-Hernández, J. L., Leos-Rodríguez, J. A., García-Salazar, A. y Valdez-Cepeda, R. (2010). Validación de cuatro modelos de interpolación para cartografiar nitrato de amonio en suelo. *Terra Latinoamericana*, 28, 371-379. Recuperado de <https://n9.cl/6avj6>
- Hernández, R., Torres, A., Márquez, O. y Franco, W. (1993). Contenido foliar de nutrimentos y crecimiento en plantaciones de teca en Ticoporo, Venezuela. *Turrialbana*, 43(1), 11-15. Recuperado de <https://n9.cl/ajt6>
- Ibarra, D., Ruiz, J. A., Flores, J. G. y González, D. R. (2007). Distribución espacial del contenido de materia orgánica de los suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco. *Terra Latinoamericana*, 25(2), 187-194. Recuperado de <https://n9.cl/j038j>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC]. (2015). *VI Censo Nacional Agropecuario: Resultados Generales*. San José, CR: INEC. Recuperado de <https://n9.cl/mo467>
- Keogh, R. M. (2013). La teca y su importancia económica a nivel mundial. En R. de Camino y J. P. Morales (Eds.), *Las plantaciones de teca en América Latina: mitos y realidades* (págs. 7-28). Turrialba, CR: CATIE. Recuperado de <https://n9.cl/bzgm>
- Mollinedo, M., Ugalde, L., Alvarado, A., Verjans, J. M. y Rudy, L. C. (2005). Relación suelo-árbol y factores de sitio en plantaciones jóvenes de teca (*Tectona grandis*) en la zona oeste de la cuenca del canal de Panamá. *Agronomía Costarricense*, 29(1), 67-75. Recuperado de <https://n9.cl/vxm8w>
- Montero, M. (1999). *Factores de sitio que influyen en el crecimiento de *Tectona grandis* L.f y *Bombacopsis quinata* (Jacq.) Dugand, en Costa Rica*. [Tesis de maestría, Universidad Austral de Chile]. <https://n9.cl/t353>

- Moral, F. J. (2004). Aplicaciones de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Ecosistemas*, 13(1), 78-86. Recuperado de <https://n9.cl/jqq3o>
- Muños, J. D., Martínez, L. J. y Giraldo, R. (2006). Variabilidad espacial de propiedades edáficas y su relación con el rendimiento en un cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.). *Agronomía Colombiana*, 24(2), 355-366. Recuperado de <https://n9.cl/mjp6b>
- Murillo, D., Ortega, I., Carrillo, J. D., Pardo, A. y Rendón, J. (2012). Comparación de métodos de interpolación para la generación de mapas de ruido en entornos urbanos. *Ing. USBMed*, 3(1), 62-68. Recuperado de <https://n9.cl/c374o>
- Oliveira, J. R. (2003). *Sistema para cálculo de balanço nutricional e recomendacao de calagem e adubacao de povoamentos de teca - Nutriteca*. [Tesis de maestría, Universidad Federal de Vicosa]. <https://n9.cl/iedc4>
- Sarlin, P. (1957). *Le Teck et les sols au Togo-et Annex: Le Teck et le calcium du sol*. Division de Pédologie.
- Thiele, H. (2008). *Variables edáficas que afectan en crecimiento de la teca (Tectona grandis L. f.) en la vertiente del Pacífico de Costa Rica*. [Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica].
- Vaides-López, E., Alvarado-Hernández, A. y Moya-Fernández, R. (2019). Site characteristics that determine the growth and productivity of teak (*Tectona grandis* L. f.) of young plantations in Guatemala. *Agronomía Costarricense*, 43(1), 135-148. Recuperado de <https://n9.cl/igvzr>
- Vallejos, O. S. (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 de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. <https://n9.cl/cb3q0>
- Vásquez, W. y Ugalde, L. A. (1996). *Rendimiento y calidad de sitio para Gmelina arborea, Tectona grandis, Bombacopsis quinatum y Pinus caribaea en Guanacaste, Costa Rica*. Cartago, CR: CATIE. Recuperado de <https://n9.cl/l1pr>
- Villatoro, M., Henríquez, C. y Sancho, F. (2008). Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial del pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense*, 32(1), 95-105. Recuperado de <https://n9.cl/tk9wl>

Artículos completos

Artículo I: Factores edáficos que influyen en el crecimiento de plantaciones de teca (*Tectona grandis* L. f.) clonal en suelos fuertemente meteorizados en Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Soil factors that influence the growth of clonal teak (*Tectona grandis* L. f.) plantations on advance weathering soils at Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Isaac Mesén-Montano

Resumen

[Introducción]: La determinación de los factores que afectan el crecimiento de las plantaciones de teca podría favorecer en la selección de los sitios aptos para el desarrollo, previo a su establecimiento y para la planificación de las actividades de preparación (eliminar factores limitantes como compactación, encharcamiento, etc.) y de manejo (aplicación de enmiendas, fertilizantes, etc.), con el fin de potenciar la capacidad productiva del sitio, en conjunto con el potencial genético clonal. **[Objetivo]:** Determinar los factores edáficos que limitan el crecimiento de distintas calidades de sitio de teca clonal en suelos rojos de meteorización avanzada en la zona norte de Costa Rica. **[Materiales y métodos]:** Se instalaron 10 parcelas de 500 m² en cada una de cinco calidades de sitio (18, 21, 24, 27 y 30) encontradas en plantaciones de teca, con base en la altura dominante y se determinaron propiedades físicas y químicas del suelo (pH_{agua}, Ca, Mg, K, acidez intercambiable, CICE, Sat Ca, Sat Mg, Sat K, Sat Ac, Sat Bases, Ca/Mg, Ca/K, Mg/K, (Ca+Mg)/K, P, Cu, Fe, Mn, Zn, materia orgánica, C, S, arena, limo, arcilla, densidad aparente, penetrabilidad, resistencia al corte, humedad del suelo y pendiente del terreno) en tres profundidades (0-15, 15-30 y 30-60 cm). **[Resultados]:** Se encontró que el índice de sitio se ve favorecido cuando el contenido de Ca, Sat Ca, CICE y Sat Bases aumenta. Aunque el pH en todas las calidades de sitio determinadas es adecuado para el desarrollo de la teca, se identificó que el índice de sitio disminuye conforme aumenta el contenido de Ac, Sat Ac y Fe. Se creó un modelo de predicción de crecimiento que combina las variables Fe, Mn y Mg en la primera profundidad, Mn y Sat Bases en la segunda y Acidez, Mn y Mg en la tercera. **[Conclusiones]:** Los suelos estudiados, rojos y altamente meteorizados, poseen en general, una fertilidad natural baja para el cultivo de la teca. Las variables que condicionan el crecimiento de la teca en suelos rojos son la Sat Ac alta (> 3 %), la CICE baja ($\leq 3,5 \text{ cmol}(+) \cdot \text{l}^{-1}$) y el contenido de Fe alto ($\geq 80 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$). Los suelos evaluados son deficientes en P ($< 1 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$) y K ($0,1 \text{ cmol}(+) \cdot \text{l}^{-1}$). Finalmente, los modelos de predicción encontrados podrían explicar entre el 47 y 58 % de la variabilidad del crecimiento de la teca en estos suelos.

Palabras clave: Índice de sitio, factores limitantes, suelos rojos.

Abstract

The determination of the factors that affect the growth of teak plantations could favor the selection of sites suitable for development, prior to their establishment and for planning preparation activities (eliminating limiting factors such as compaction, ponding, etc.) and management (application of amendments, fertilizers, etc.) in order to enhance the productive capacity of the site in conjunction with the clonal genetic potential. To determine the edaphic

factors that limit the growth of different qualities of clonal teak site in red, clayey soils of advanced weathering in the northern zone of Costa Rica. 10 plots of 500 m² were installed in each of five site qualities (18, 21, 24, 27 and 30) found in teak plantations, based on the dominant height, and physical and chemical properties of the soil were determined (pH_{water}, Ca, Mg, K, exchangeable acidity, ECEC, Ca Sat, Mg Sat, K Sat, Ac Sat, Base Sat, Ca/Mg, Ca/K, Mg/K, (Ca+Mg)/K, P, Cu, Fe, Mn, Zn, organic matter, C, S, sand, silt, clay, apparent density, penetrability, cutting resistance, soil moisture and slope of the soil) at three depths (0-15, 15-30 and 30-60 cm). It was found that the site index is favored when the content of Ca, Ca Sat, CICE and Base Sat increases. Although the pH in all the specific site qualities is suitable for the development of teak, it was identified that the site index decreases as the content of Ac, Ac Sat and Fe increases. A growth prediction model was created that combines the variables Fe, Mn and Mg in the top horizon, Mn and Base Sat at the second soil depth and Acidity, Mn and Mg in the third layer studied. The soils studied, red and highly weathered, generally possess low natural fertility for teak cultivation. The variables that condition the growth of teak in red soils are high Ac Sat (> 3 %), low ECEC ($\leq 3.5 \text{ cmol}(+)\cdot\text{l}^{-1}$) and high Fe content ($\geq 80 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$). The soils evaluated are deficient in P ($< 1 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) and K ($0.1 \text{ cmol}(+)\cdot\text{l}^{-1}$). The prediction models found could explain between 47 and 58 % of the variability of teak growth in these soils.

Key words: Site index, limiting factors, red soils.

1. Introducción

Tectona grandis L. f. conocida como teca o *teak*, es originaria del continente asiático, donde naturalmente cubre casi 28 millones de hectáreas y se encuentra en países como Myanmar (59,1 %), la India (31,9 %), Tailandia (8,9 %) y Laos (0,1 %) (Keogh, 2013). Su madera, debido a sus propiedades físico-mecánicas, tiene alta demanda alrededor del mundo, aunque su oferta se ha visto disminuida por la veda total del aprovechamiento en bosques naturales de dichos países, con excepción de Myanmar donde sí es permitido (Keogh, 2013). Lo anterior ha impulsado, a lo largo de los años, el establecimiento de teca en plantaciones puras y otros sistemas productivos dentro y fuera de su rango de distribución natural. Se estima que hay poco más de tres millones de hectáreas plantadas, distribuidas en Asia (86,1 %), África (9,3 %) y América Latina (4,6 %); asimismo, esta especie abarca, alrededor del mundo, el 74 % del área plantada con maderas duras de alto valor (Keogh, 2013).

En Costa Rica, por su parte, la reforestación con teca no ha sido la excepción y para el año 2014, se estimó un área plantada de aproximadamente 47 167 ha (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC], 2015), lo que la ubicó como la especie con mayor área establecida con fines de producción forestal y se identificó su distribución dentro de las siete provincias [Guanacaste (43,1 %), Alajuela (23,2 %), Puntarenas (20 %), San José (7 %), Limón (5 %), Heredia (1,6 %) y Cartago (< 0,1 %)]. Alajuela, lugar en que se desarrolla la presente investigación, es la segunda provincia, en cuanto a área plantada con teca (23,2 %, lo que equivale a 10 957 ha), en donde el 92,9 % de las plantaciones establecidas con la especie en esta provincia se ubica en los cantones de San Carlos (5 221 ha), Los Chiles (4 264 ha), Upala (461 ha) y Guatuso (237 ha), identificando un total de 435 fincas con dicho cultivo (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC], 2014). Los cantones antes mencionados cubren gran parte de la región climática llamada Zona Norte, la cual presenta las características mostradas en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Características generales de la región climática Zona Norte de Costa Rica.

Table 1. General characteristics of the climatic region Northern Zone of Costa Rica.

Variable	Característica
Clima	Tropical lluvioso. ^b
Precipitación	1 900 – 4 500 mm anuales. ^a
Disminución de lluvias	Febrero, marzo y abril. ^a
Vientos	Promedio de 10 km*h ⁻¹ . ^a
Geología y geomorfología	Llanuras aluviales ^b , topografía mayormente plana y colinas de hasta 382 msnm ^a .
Suelo	Entisoles, Histosoles, Inceptisoles, Ultisoles ^c .

Con base en ^a Instituto Meteorológico Nacional (IMN, 2008), ^b Fallas (2014), ^c Ortiz (2009).

En esta región norteña, en los últimos años, se ha incrementado la producción del cultivo de piña, a tal punto que en el 2018 alcanzó el 67,3 % (44 193 ha) del 100 % (65 670 ha) del área plantada con cultivo de piña en el país (Vargas, Miller y Arguedas, 2020), lo anterior a ocasionado que algunas tierras sembradas con teca se vean presionadas y transformadas a la producción de dicho cultivo, en relación, Araya (2017) indica una pérdida de cobertura forestal de 3 192 ha en la región Huetar Norte. Las principales razones reconocidas para hacer el cambio en uso de la tierra incluyen malos crecimientos, ligados en parte con un deficiente manejo y/o a una mala escogencia del sitio, donde se presentan factores o características adversas que imposibilitan que la especie tenga un desarrollo adecuado, entre ellas se pueden citar, un mal drenaje, una compactación alta, una poca profundidad efectiva y otras de orden químico-biológico, todas las anteriores a nivel de suelo, así mismo también están relacionados con un nulo o ineficiente programa de encalado y fertilización, Meza et al. (2019) mencionan un uso, al parecer y en muchas ocasiones, inadecuado, en donde la formulación y dosis no responde a análisis previos del suelo. Relacionado con lo anterior, varios autores y entre ellos Vásquez y Ugalde (1996), Alvarado y Fallas (2004) y Alvarado (2006) resaltan la importancia de una selección adecuada del lugar en el que se va a establecer la plantación, así como de prácticas adecuadas de encalado y fertilización, esto debido a que se pueden obtener como resultado, a la misma edad, incrementos en volumen total de entre 5,4 y 22 m³*ha⁻¹*año⁻¹ e incremento en altura total de entre 1,5 y 3,9 m*año⁻¹, siendo lo idóneo alcanzar en toda el área valores cercanos, iguales o mayores al último valor mencionado en ambos casos. En relación con lo anterior, en diferentes regiones de Costa Rica y de otros países donde se ha plantado teca, se ha logrado asociar el buen o mal crecimiento de los árboles con una variable o con un conjunto de ellas. Dentro de las variables que se asocian con el buen crecimiento de la especie se pueden citar las presentes en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Variables asociadas con el buen crecimiento de *Tectona grandis* L. f.

Table 2. Environmental variables associated with good *Tectona grandis* L. f. growth.

Variable	Valor
Precipitación (mm*año ⁻¹)	≥ 2 000 ^a , > 1900 ^g
Profundidad de suelo (cm)	90 ^a , > 50 ^d , > 60 ⁱ
Pendiente (%)	< 25 ^a , < 40 ^g
Ca (cmol(+)*I ⁻¹)	> 10 ^a , > 18 ^b , > 4 ^e , > 8 ^h
Sat Ac (%)	< 3 ^c , < 5 ^g , < 10 ⁱ
Sat Ca (%)	> 68 ^c , > 62 ^g , > 40 ^h
Sat Bases (%)	> 43 ^g
Periodo seco continuo (meses)	≤ 3 ^d
P (mg*I ⁻¹)	≥ 6 ^d
Arcilla (%)	< 58 ^d
Drenaje	Moderado a bueno ^f , sin inundación ^g
Elevación (msnm)	< 220 ^g
Temperatura media (°C)	26 ^g
Paisaje	Ondulado a plano ^g
Pedregosidad externa	Poca o mediana ^g
pH	> 5,5 ^g
Compactación	Ninguna o poca ^g
Ca ²⁺ + Mg ²⁺ (cmol(+)*I ⁻¹)	≥ 2,5 ⁱ

Con base en ^a Vázquez y Ugalde (1996), ^b Vallejos (1996), ^c Alvarado y Fallas (2004), ^d Thiele (2008), ^e Montero (1999), ^f Hernández, Torres, Márquez y Franco (1993), ^g Vaides-López, Alvarado-Hernández y Moya-Fernández (2019), ^h Mollinedo, Ugalde, Alvarado, Verjans y Rudy (2005), ⁱ Oliveira (2003), ^j Sarlin (1957).

2. Materiales y métodos

Para el desarrollo de la presente investigación, se trabajó a partir de parcelas permanentes de monitoreo (PPM), ubicadas sobre suelos rojos y arcillosos de meteorización avanzada dentro de plantaciones clonales de 9,2 años de edad de la especie teca en El Concho de Pocosol de San Carlos en la Provincia de Alajuela, entre los 10,820° y 10,873° latitud norte y los -84,467° y -84,389° longitud oeste. Inicialmente, para cada PPM, a partir de la altura total, se determinó la altura dominante (equivalente al promedio de los 100 árboles más altos y más gruesos por hectárea) y se clasificó en base a las curvas de crecimiento desarrolladas por Mora y Meza (2003) para la especie en la Vertiente del Pacífico de Costa Rica, con ello, se lograron identificar cinco índices de sitio con características dasométricas las cuales se presentan en el Cuadro 3, en donde para el cálculo del volumen total, se usó el modelo matemático (1) empleado por Fallas (2017).

$$Vol_{Tcc} = -0,0068 * (dap) + 0,0010 * (dap)^2 \quad (1)$$

Donde: Vol_{Tcc} = Volumen total con corteza en metros cúbicos, dap = diámetro a la altura del pecho en centímetros.

Cuadro 3. Características dasométricas de los índices de sitio estudiados en *Tectona grandis* L. f. de 9,2 años de edad, Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Table 3. Dasometric characteristics of the site indices studied in 9,2-year-old *Tectona grandis* L. f., Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Clase de crecimiento	IS	HD (m)	IMA DAP (cm*año ⁻¹)	IMA HT (m*año ⁻¹)	IMA Vol (m ³ *ha ⁻¹ *año ⁻¹)
Bajo	18	13,1	1,5	1,2	3,82
	21	15,5	1,7	1,4	5,97
Medio	24	18,1	2,0	1,8	9,87
	27	20,7	2,3	2,1	14,75
Alto	30	25,0	2,6	2,3	18,56

IS = índice de sitio, IMA = incremento medio anual, DAP = diámetro a la altura del pecho, HD = altura dominante, HT = altura total, Vol = volumen.

Posterior a la clasificación e identificación, se seleccionaron 10 PPM representativas de cada índice de sitio para un total de 50 PPM. En cada una de estas, se realizaron dos procedimientos para la toma de información. El primero consistió en tomar tres muestras compuestas de suelo, una por profundidad (0-15, 15-30 y 30-60 cm). Para cada una de ellas, se ubicaron cuatro puntos, en cada punto se abrió un hueco de 20 x 60 cm (diámetro x profundidad) y de la pared de cada uno de ellos se extrajo, con palín, una muestra por profundidad (0-15, 15-30 y 30-60 cm). Estas fueron depositadas en un recipiente etiquetado por profundidad, donde el suelo fue mezclado, unificado y mediante cuarteo, se extrajo, de cada uno, una muestra de 1 kg. El segundo procedimiento consistió en tomar seis muestras de densidad aparente, doce valores de penetrabilidad (PNTB) y doce valores de resistencia al corte (RC), para ello, de los cuatro huecos mencionados en el punto 1, se seleccionaron dos diagonalmente opuestos. En cada uno de ellos, en el inicio de cada profundidad (0, 15 y 30 cm), se tomó una muestra de densidad aparente (con cilindro muestreador), dos valores de penetrabilidad (con penetrómetro Chantillón) y dos valores de resistencia al corte (con cuchilla de torsión Torvane).

Adicionalmente se seleccionó una PPM representativa de cada IS, donde se hizo una calicata de 1,5 m x 1,5 m x 1,2 m (largo, ancho y profundidad, respectivamente), se describió cada perfil de suelo y se extrajo en cada horizonte una muestra de suelo de 1 kg. Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos y Foliares del Instituto de Investigación y Servicios Forestales de la Universidad Nacional de Costa Rica (INISEFOR – UNA). Ahí se emplearon las siguientes metodologías: (1) el método del cilindro más calor (105 °C por 24 horas o hasta alcanzar peso constante) para determinar la densidad aparente y el porcentaje de humedad (Forsythe, 1985); (2) el hidrómetro de Bouyoucos para determinar la textura (McKean, 1993); (3) electrodo de vidrio en una fracción 1:5 de suspensión de suelo seco en agua, para determinar la reacción del suelo (pH) (Organización Internacional de Normalización [ISO], 2005); (4) solución en cloruro de potasio (KCl) para la determinación de acidez intercambiable (Ac), calcio (Ca) y magnesio (Mg) (McKean, 1993); (5) solución en Olsen Modificado para determinar fósforo (P) (McKean, 1993), potasio (K), zinc (Zn), hierro (Fe), manganeso (Mn) y cobre (Cu) y todos leídos mediante absorción atómica (Zagal

y Sadzawka, 2007) a excepción del P, el cual fue leído por espectrofotómetro y la Acidez que fue calculada por titulación con hidróxido de sodio (NaOH) (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002); (6) digestión húmeda con dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), ácido sulfúrico (H_2SO_4) y titulación con Sal de Mohr ($(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$) para determinar materia orgánica (Salinas y García, 1985); (7) fosfato de calcio ($Ca_3(PO_4)_2$) y lectura en espectrofotómetro para la determinación de azufre (S) (McKean, 1993).

Los resultados se tabularon y analizaron por medio del software estadístico InfoStat/E, mediante el que se obtuvo la estadística descriptiva de todas las variables para la finca (sin distinción de profundidad) y para cada índice de sitio. Además, por índice de sitio y por profundidad se realizó el análisis de varianza para cada una de las variables por medio de la prueba “t” a un valor de significancia del 95 % y p-valor < 0,05. Posteriormente, por medio del programa Statgraphics Centurion, se realizó la prueba de correlación por medio de regresión simple entre cada variable y la altura dominante (HD), mediante el coeficiente de Pearson. Finalmente, a partir de las variables que presentaron más correlación, se procedió a generar ecuaciones de predicción de crecimiento por medio de regresión múltiple.

3. Resultados

Los valores promedio registrados de las variables edáficas para toda el área bajo estudio, muestran condiciones favorables para el desarrollo de las plantaciones de teca, en cuanto a pH (5,90) y Sat Bases (89,8 %), condiciones regulares de Sat Ca (61,8 %) y desfavorables para acidez ($0,23 \text{ cmol}(+) \cdot l^{-1}$), K ($0,04 \text{ cmol}(+) \cdot l^{-1}$), Sat Ac (10,2 %), CICE ($2,57 \text{ cmol}(+) \cdot l^{-1}$), P ($0,08 \text{ mg} \cdot l^{-1}$) y arcilla (60,8 %).

En el Cuadro 4, se presentan, para las variables químicas y físicas estudiadas, los estadísticos (sin distinción de índice de sitio ni profundidad) para toda el área en estudio y el promedio (sin distinción de profundidad) para cada índice de sitio.

El análisis de los valores promedio por índice de sitio muestra que los cinco índices registraron valores promedio de pH, K, Sat Ca, P, Cu, MO, arena, limo, arcilla, DA, H y Pend muy similares entre sí, lo que podría sugerir que estas variables de forma individual no afectan o limitan fuertemente el crecimiento de la especie en el área bajo estudio. No obstante, se presenta una ligera tendencia positiva entre el incremento de los índices de sitio y el aumento de los valores promedio de Ca, CICE, Mg/K, $(Ca+Mg)/K$ y Zn, así como una ligera tendencia negativa entre el aumento de los valores promedio de Acidez, Sat Ac, Fe y el decrecimiento en el índice de sitio.

Cuadro 4. Estadísticos generales (sin distinguir profundidad ni índice de sitio) y promedio por índice de sitio (sin distinguir profundidad) de las variables químicas y físicas del suelo en cultivo de *Tectona grandis* L. f., Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Table 4. General statistics (without distinguishing depth or site index) and average by site index (without distinguishing depth) of the chemical and physical variables of the soil in cultivation of *Tectona grandis* L. f., Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Var.	Sin distinción de IS ni profundidad					IS18	IS21	IS24	IS27	IS30
	Prom.	Desv.	C.V %	Mín.	Máx.					
pH agua	5,90	0,18	3,0	5,34	6,43	5,85	5,89	5,92	5,94	5,92
Ca	1,66	0,85	51,0	0,35	3,82	1,42	1,59	1,70	1,83	1,77
Mg	0,63	0,17	27,4	0,26	1,82	0,58	0,53	0,63	0,66	0,74
K	0,04	0,03	60,4	0,01	0,14	0,06	0,04	0,04	0,04	0,03
Acidez	0,23	0,19	81,1	0,04	1,12	0,37	0,34	0,18	0,15	0,13
CICE	2,57	0,91	35,6	1,22	4,93	2,43	2,51	2,56	2,67	2,67
Sat Ca	61,8	11,6	18,8	18,1	85,4	55,7	60,3	63,7	65,7	63,7
Sat Mg	26,2	7,6	28,8	12,9	44,3	25,1	22,6	26,8	26,8	29,9
Sat K	1,7	1,0	58,4	0,5	4,6	2,3	1,7	1,7	1,7	1,2
Sat Ac	10,2	9,3	91,1	0,9	53,0	16,9	15,5	7,8	5,8	5,1
Sat Bases	89,8	9,3	10,4	47,0	99,1	83,1	84,5	92,2	94,2	94,9
Ca/Mg	2,64	1,14	43,2	0,67	6,63	2,37	2,96	2,67	2,79	2,41
Ca/K	49,70	29,78	59,9	9,71	152,56	30,93	46,59	52,16	57,05	61,76
Mg/K	19,98	11,83	59,2	3,73	60,91	13,35	16,97	20,63	21,03	27,93
(Ca+Mg)/K	69,68	39,51	56,7	17,18	213,15	44,28	63,56	72,79	78,08	89,68
P	0,08	0,13	166,4	0,00	0,68	0,05	0,09	0,12	0,07	0,05
Cu	15,95	5,22	32,7	5,18	27,88	12,99	16,98	16,59	16,25	16,94
Fe	54,02	35,38	65,5	7,75	175,56	78,13	63,63	48,38	52,32	27,66
Mn	32,68	27,17	83,1	2,03	128,45	25,43	21,31	29,71	36,31	50,66
Zn	0,93	0,76	82,1	0,18	6,88	0,70	0,80	1,04	1,05	1,05
MO	3,0	1,7	57,0	0,0	6,3	3,1	2,7	3,3	3,1	2,8
C	2,1	1,2	57,0	0,0	4,4	2,1	1,9	2,3	2,1	2,0
S	14,85	7,74	52,1	4,15	38,73	13,96	12,05	18,34	14,05	15,87
Arena	29,7	13,2	44,4	9,3	61,6	25,5	31,0	30,6	30,8	30,4
Limo	9,6	3,8	40,1	0,8	22,1	9,9	8,6	9,3	9,9	10,2
Arcilla	60,8	15,2	25,0	25,1	87,2	64,6	60,4	60,1	59,3	59,4
DA	0,83	0,10	11,9	0,54	1,07	0,81	0,84	0,78	0,84	0,88
PNTB	3,32	2,13	64,3	0,30	13,00	35,23	60,94	44,61	39,84	43,83
RC	0,49	0,26	52,4	0,05	1,00	0,68	0,39	0,50	0,50	0,39
H	30,3	3,0	9,7	20,7	41,9	29,5	31,4	29,9	29,5	31,3
Pend	11,8	5,1	43,5	0,0	23,0	14,3	11,8	10,9	11,2	10,8

Sat= saturación, Ac= acidez, MO= materia orgánica, C= carbono orgánico, DA= densidad aparente, PNTB= penetrabilidad, RC= resistencia al corte tangencial, H= humedad del suelo, Pend= pendiente; las variables Ca, Mg, K, Acidez y CICE expresadas en $\text{cmol}(+)\cdot\text{l}^{-1}$; las variables Sat Ca, Sat Mg, Sat K, Sat Ac, Sat Bases, MO, C, Arena, Limo, Arcilla, H y Pend expresadas en %; las variables P, Cu, Fe, Mn, Zn y S expresadas en $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$; la variable DA expresada en $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; las variables PNTB y RC expresadas en $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$.

En los Cuadro 5 y 6, se presentan los valores promedio de las variables químicas y físicas desglosados por profundidad e índice de sitio. En ellos, se puede notar que los cinco índices de sitio registran valores promedio favorables de pH (5,73-6,08) y Sat Bases (78-96 %) en las tres profundidades, de Sat Ca en la profundidad de 0-15 cm y desfavorables de Sat Ac en las tres profundidades, pero con mayor grado, en las profundidades de 15-30 cm y de 30-60 cm de los IS 18 y 21. Asimismo, la variable arcilla también presenta valores desfavorables, pero estos en la profundidad de 30-60 cm. En todas las muestras de suelo, indiferentemente de su profundidad, se encontraron valores promedio bajos de Ca ($0,79-2,88 \text{ cmol}(+) \cdot \text{l}^{-1}$), Mg ($0,46-0,89 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$), CICE ($1,71-3,97 \text{ cmol}(+) \cdot \text{l}^{-1}$), Zn ($0,43-1,83 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$) y MO (1,1-5,6 %), además de contenidos deficientes de K ($0,02-0,08 \text{ cmol}(+) \cdot \text{l}^{-1}$) y P ($0,02-0,17 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$). Se presenta una ligera tendencia positiva (como se muestra en la Figura 1) entre el aumento en el índice de sitio y los incrementos de las variables Ca, Sat Ca, Sat Bases y Mn, lo que podría indicar que, en ciertos valores de ellas en las tres profundidades, el crecimiento de los árboles en el área bajo estudio se favoreció. Es decir, que, para poder alcanzar alturas dominantes mayores o iguales a 16,65 m (límite inferior del IS24) a la edad de 9,2 años, se requieren valores cercanos o superiores a los obtenidos en el índice de sitio 24. Sin embargo, se debe tener cuidado con la variable Mn, al no conocerse los valores que puedan llegar a ser tóxicos. Contrario a lo anterior, se aprecia una ligera tendencia negativa (como se ve en la Figura 1) entre los índices de sitio y las variables Ac, Sat Ac y Fe. Lo anterior podría indicar que el crecimiento de la teca se vería afectado al presentarse ciertos valores para dichas variables en las tres profundidades; además, hace pensar que, para alcanzar al menos 16,65 m de altura dominante a los 9,2 años de edad, se requieren, en las tres profundidades, valores que no sobrepasen los obtenidos para el índice 24.

Cuadro 5. Valores promedio de las variables químicas del suelo por profundidad e índice de sitio en cultivo de *Tectona grandis* L. f., Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Table 5. Average values of the soil chemical variables by depth and site index in cultivation of *Tectona grandis* L. f., Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Prof Var \ IS	0-15 cm					15-30 cm					30-60 cm				
	18	21	24	27	30	18	21	24	27	30	18	21	24	27	30
pH agua	5,73	5,79	5,79	5,80	5,75	5,86	5,86	5,90	5,94	5,96	5,96	6,02	6,08	6,08	6,05
Ca	2,31	2,54	2,78	2,82	2,88	1,17	1,34	1,38	1,58	1,40	0,79	0,89	0,96	1,08	1,02
Mg	0,71	0,65	0,75	0,73	0,89	0,51	0,46	0,56	0,61	0,67	0,53	0,50	0,59	0,63	0,67
K	0,08	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03	0,04	0,02	0,04	0,02	0,03	0,04	0,03
Acidez	0,27	0,28	0,18	0,16	0,16	0,45	0,38	0,25	0,18	0,12	0,39	0,36	0,12	0,10	0,10
CICE	3,37	3,53	3,77	3,77	3,97	2,18	2,21	2,21	2,41	2,21	1,75	1,77	1,71	1,85	1,82
Sat Ca	68,2	70,7	73,0	74,3	72,4	53,6	59,9	62,0	64,8	63,1	45,1	50,4	56,2	58,0	55,7
Sat Mg	21,2	18,4	20,1	19,9	22,4	23,4	20,8	25,4	26,0	30,3	30,7	28,5	34,9	34,6	37,1
Sat K	2,5	1,9	1,8	1,3	1,2	2,3	1,7	1,5	1,8	1,7	2,2	1,4	1,7	2,2	1,5
Sat Ac	8,1	9,0	5,1	4,4	4,1	20,6	17,7	11,1	7,5	5,5	22,0	19,8	7,3	5,4	5,7
Sat Bases	91,9	91,0	94,9	95,6	95,9	79,4	82,3	88,9	92,5	94,5	78,0	80,3	92,8	94,7	94,3
Ca/Mg	3,26	4,04	3,77	3,93	3,58	2,33	3,05	2,55	2,65	2,12	1,51	1,80	1,69	1,78	1,54
Ca/K	32,89	48,11	56,46	61,44	66,05	30,85	47,94	55,45	66,50	74,48	29,05	43,72	44,58	43,23	44,73
Mg/K	10,31	11,42	14,35	15,93	20,28	12,26	16,19	22,19	24,48	34,82	17,50	23,31	25,34	22,68	28,68
Ca+Mg/K	43,20	59,53	70,81	77,37	86,33	43,11	64,13	77,64	90,97	109,31	46,54	67,03	69,93	65,90	73,41
P	0,11	0,10	0,17	0,11	0,03	0,03	0,11	0,13	0,06	0,06	0,02	0,05	0,05	0,03	0,06
Cu	12,09	18,00	16,06	16,52	18,51	13,31	17,27	17,58	17,17	16,71	13,58	15,67	16,14	15,07	15,61
Fe	112,30	81,76	64,13	67,01	39,90	83,56	71,76	56,70	60,30	28,83	38,52	37,37	24,31	29,67	14,24
Mn	46,82	38,94	51,81	64,49	80,35	21,90	18,66	27,17	29,66	52,00	7,58	6,31	10,16	14,78	19,64
Zn	1,09	1,21	1,31	1,47	1,83	0,59	0,68	0,71	0,79	0,79	0,43	0,50	1,09	0,88	0,53
MO	4,3	4,6	5,6	5,2	4,9	2,9	2,3	2,6	2,6	2,3	2,0	1,1	1,5	1,4	1,2
C	3,0	3,2	3,9	3,6	3,5	2,0	1,6	1,8	1,8	1,6	1,4	0,8	1,1	1,0	0,8
S	9,73	10,13	16,05	11,64	14,05	10,83	8,49	16,01	11,03	13,71	21,33	17,53	22,96	19,47	19,84

Sat= saturación, Ac= acidez, MO= materia orgánica, C= carbono orgánico; las variables Ca, Mg, K, Acidez y CICE expresadas en $\text{cmol}(+)*\text{l}^{-1}$; las variables Sat Ca, Sat Mg, Sat K, Sat Acid, Sat Bases, MO, C expresadas en %; las variables P, Cu, Fe, Mn, Zn y S expresadas en $\text{mg}*\text{l}^{-1}$.

Cuadro 6. Valores promedio de las variables físicas del suelo por profundidad e índice de sitio en cultivo de *Tectona grandis* L. f., Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Table 6. Average values of the soil physical variables by depth and site index of *Tectona grandis* L. f., Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Prof Var \ IS	0-15 cm					15-30 cm					30-60 cm				
	18	21	24	27	30	18	21	24	27	30	18	21	24	27	30
Arena	35,1	46,4	44,8	43,4	44,1	24,7	27,3	29,0	31,9	26,5	16,7	19,4	17,9	17,1	20,5
Limo	13,8	11,5	12,8	13,5	13,7	9,2	7,9	9,6	8,9	9,4	6,8	6,3	5,6	7,3	7,7
Arcilla	51,1	42,2	42,5	43,2	42,3	66,1	64,8	61,4	59,1	64,2	76,5	74,4	76,5	75,6	71,8
DA	0,80	0,81	0,78	0,84	0,87	0,80	0,80	0,73	0,82	0,87	0,82	0,89	0,83	0,87	0,89
PNTB	3,67	2,26	4,28	4,31	3,44	3,44	2,41	2,68	2,96	3,43	4,44	2,60	3,04	3,53	3,26
RC	0,60	0,36	0,56	0,53	0,35	0,70	0,42	0,45	0,45	0,40	0,74	0,41	0,50	0,51	0,41
H	28,6	31,0	28,8	28,7	31,8	29,9	31,3	30,5	29,9	30,8	30,0	32,0	30,5	30,0	31,1

DA= densidad aparente, PNTB= penetrabilidad, RC= resistencia al corte tangencial, H= humedad del suelo, Pend= pendiente; las variables Arena, Limo, Arcilla y H expresadas en %; las variables DA expresadas en $g \cdot cm^{-3}$; PNTB y RC en $kg \cdot cm^{-2}$.

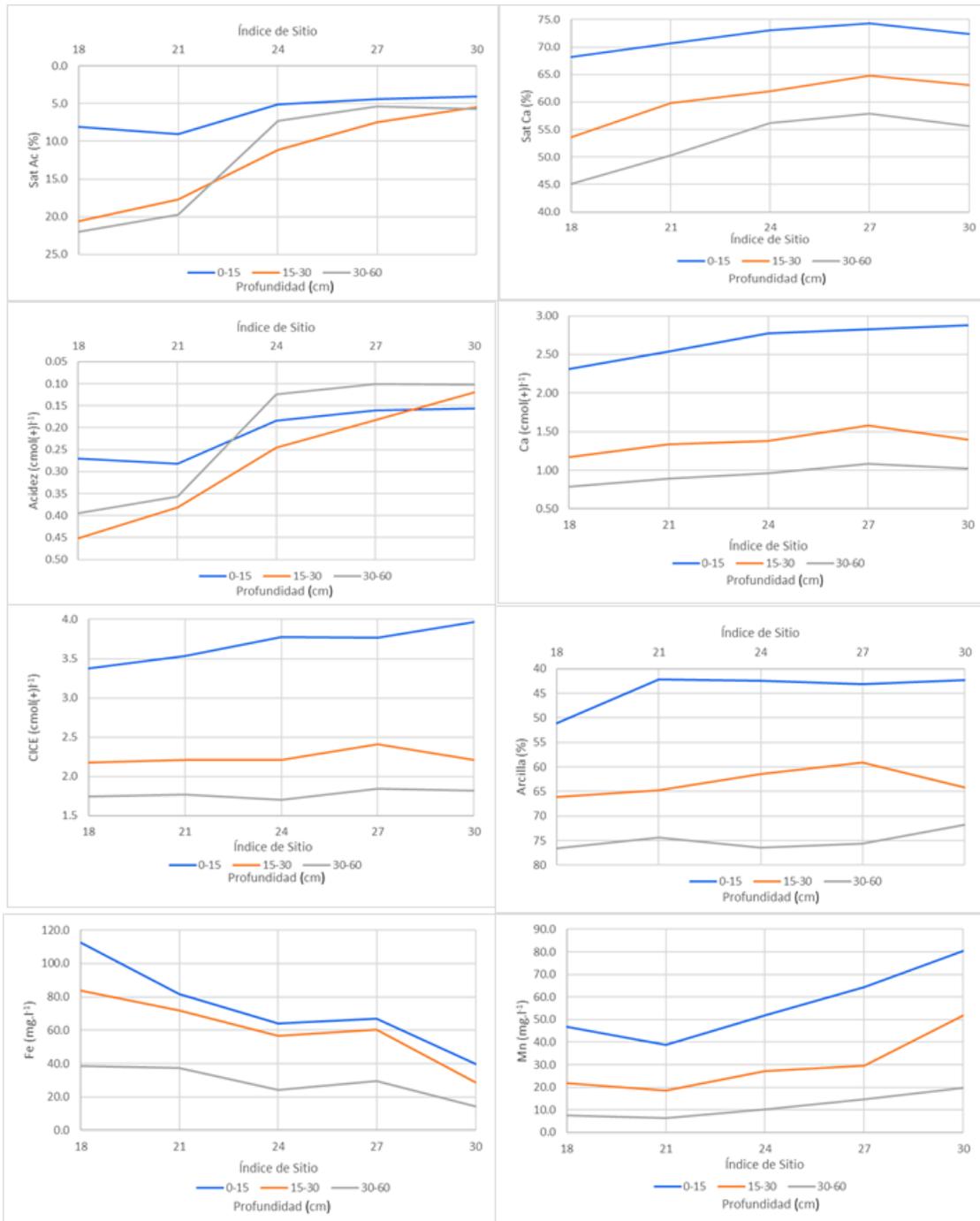


Figura 1. Valores promedio por índice de sitio y profundidad de las variables que más influyen en el crecimiento de *Tectona grandis* L. f., Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Figure 1. Average values by site index and depth of the variables that most influence the growth of *Tectona grandis* L. f., Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

El análisis realizado por medio de la prueba de “t” ($p < 0,05$) a las variables estudiadas por índice de sitio y por cada profundidad (0-15, 15-30 y 30-60 cm) muestra, como se puede apreciar en el Cuadro 7, que, en la profundidad de 0-15 cm, hay diferencias estadísticas

marcadas entre el peor IS (18) y mejor IS (30) a nivel de las variables Fe, Ac y Sat Ac, en donde el valor máximo en el mejor IS no alcanza un valor de Fe > 47,12 mg*1⁻¹, de Ac > 0,22 cmol(+)*1⁻¹ y de Sat Ac > 6,60 %, sin embargo, un 5 %, 60 % y 45 % de los valores de Fe, Ac y Sat Ac de los peores IS (18 y 21) se encuentran por debajo de estos valores, lo que podría indicar que otras variables influyen también en el crecimiento a nivel de dicha profundidad. En la profundidad de 15-30 cm, también hay diferencias estadísticas consistentes entre el peor IS (18) y mejor IS (30) y estas a nivel de las variables Fe, Ac y Sat Ac, en donde el índice mejor, registra un valor máximo de Fe = 47,30 mg*1⁻¹, de Ac = 0,18 cmol(+)*1⁻¹ y de Sat Ac = 7,07 %, no obstante, un 20 % y 15 % de los valores de Fe y Ac de los peores IS (18 y 21) se ubican por debajo de los valores mencionados, lo que podría indicar que otras variables, aunadas al Fe y la Ac, también influyen en el crecimiento a nivel de esta profundidad. En la profundidad de 30-60 cm, igualmente hay diferencias estadísticas entre el peor índice (18) y el índice mejor (30), dichas diferencias a nivel de las variables Fe, Ac y Sat Ac. En el mejor IS se ubica valores de Fe ≤ 27,09 mg*1⁻¹, Ac ≤ 0,14 cmol(+)*1⁻¹ y de Sat Ac ≤ 8,42 %, sin embargo el 25 % de los valores de Fe y el 15 % de los valores de Ac y Sat Ac de los peores IS (18 y 21) no superan dichos valores, lo cual podría indicar que las variables Ac y Sat Ac tienen gran influencia sobre el crecimiento, no obstante puede que estén asociadas también con otras variables.

Cuadro 7. Variables químicas y físicas del suelo en cultivo de *Tectona grandis* L. f. que presentan diferencias significativas entre el índice de sitio 18 y el 30 al aplicar la prueba de t en la profundidad de 0-15 cm, 15-30 cm y 30-60 cm, Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Table 7. Chemical and physical variables of the soil in cultivation of *Tectona grandis* L. f. that present significant differences between the site index 18 and 30 when applying the t-test in the depths of 0-15 cm, 15-30 cm and 30-60 cm, Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Var	n ₁₈	n ₃₀	Media		IS ₁₈ -IS ₃₀	LI(95)	LS(95)	p-valor
			IS ₁₈	IS ₃₀				
0-15 cm								
Ca	10	10	2,31	2,87	-0,57	-1,01	-0,12	0,0153
Cu	10	10	12,09	18,51	-6,42	-10,98	-1,87	0,0084
Zn	10	10	1,09	1,83	-0,74	-1,17	-0,31	0,0025
Fe	10	10	112,29	39,90	72,39	44,55	100,22	0,0002
Mn	10	10	46,82	80,35	-33,53	-61,08	-5,98	0,0214
K	10	10	0,08	0,05	0,04	0,02	0,06	0,0015
Acidez	10	10	0,27	0,16	0,11	0,01	0,22	0,0368
CICE	10	10	3,37	3,97	-0,59	-1,06	-0,12	0,0159
Sat Ac	10	10	8,08	4,07	4,01	0,69	7,32	0,0226
Sat K	10	10	2,51	1,16	1,35	0,67	2,03	0,0013
Ca/K	10	10	32,89	66,05	-33,16	-50,31	-16,01	0,0007
Mg/K	10	10	10,31	20,28	-9,97	-17,14	-2,80	0,0091
(Ca+Mg)/K	10	10	43,20	86,33	-43,13	-64,50	-21,77	0,0005
Pend	20	20	14,30	10,80	3,50	0,09	6,91	0,0450
RC	20	20	0,61	0,35	0,26	0,10	0,41	0,0014
DA	20	20	0,80	0,87	-0,07	-0,14	-0,01	0,0347
H	20	20	28,55	31,82	-3,27	-6,20	-0,35	0,0299
Arcilla	20	20	51,09	42,25	8,84	3,92	13,77	0,0008
Arena	20	20	35,08	44,07	-8,99	-14,38	-3,60	0,0017

15-30 cm								
Mg	10	10	0,51	0,67	-0,16	-0,25	-0,08	0,0011
Zn	10	10	0,59	0,79	-0,20	-0,38	-0,03	0,0251
Fe	10	10	83,56	28,83	54,74	31,48	77,99	0,0003
Mn	10	10	21,90	52,00	-30,10	-39,83	-20,37	0,0000
K	10	10	0,05	0,02	0,03	0,01	0,04	0,0020
pH _{agua}	10	10	5,86	5,96	-0,10	-0,19	-0,01	0,0363
Acidez	10	10	0,45	0,12	0,33	0,11	0,55	0,0083
Sat Ac	10	10	20,63	5,49	15,14	5,72	24,55	0,0054
Sat Ca	10	10	53,64	63,14	-9,49	-18,18	-0,81	0,0349
Sat Mg	10	10	23,42	30,31	-6,88	-10,16	-3,61	0,0003
Sat K	10	10	2,30	1,06	1,24	0,45	2,02	0,0038
Ca/K	10	10	30,85	74,48	-43,63	-72,65	-14,61	0,0054
Mg/K	10	10	12,26	34,82	-22,57	-33,93	-11,21	0,0011
(Ca+Mg)/K	10	10	43,11	109,31	-66,20	-106,58	-25,82	0,0036
Pend	20	20	14,30	10,80	3,50	0,09	6,91	0,0450
RC	20	20	0,70	0,40	0,30	0,15	0,45	0,0002
DA	20	20	0,80	0,87	-0,07	-0,12	-0,02	0,0046
30-60 cm								
MO	10	10	2,02	1,19	0,83	0,33	1,33	0,0025
Mg	10	10	0,53	0,67	-0,14	-0,23	-0,04	0,0059
Fe	10	10	38,52	14,24	24,28	12,75	35,82	0,0006
Mn	10	10	7,58	19,64	-12,06	-18,91	-5,21	0,0016
Acidez	10	10	0,39	0,10	0,29	0,07	0,51	0,0155
Sat Ac	10	10	21,99	5,69	16,29	5,22	27,37	0,0088
Sat Mg	10	10	30,71	37,14	-6,43	-10,94	-1,91	0,0078
Mg/K	10	10	17,50	28,68	-11,18	-21,92	-0,44	0,0422
Pend	20	20	14,30	10,80	3,50	0,09	6,91	0,0450
PNTB	20	20	4,44	3,26	1,18	0,11	2,26	0,0317
RC	20	20	0,74	0,41	0,34	0,21	0,46	0,0000
DA	20	20	0,82	0,89	-0,07	-0,13	-0,01	0,0254
Arcilla	20	20	76,53	71,79	4,74	1,14	8,35	0,0113
Arena	20	20	16,70	20,54	-3,83	-7,40	-0,27	0,0356

Sat= saturación, Ac= acidez, IS= índice de sitio, Pend= pendiente, RC= resistencia al corte, DA= densidad aparente, H= humedad del suelo, MO= materia orgánica.

En el muestreo realizado entre 0 y 15 cm las variables que registraron correlaciones moderadas con la altura dominante ($r > 0,40$) son el Fe y la relación Mg/K. En el caso del Fe, correlaciona negativamente (-0,59), lo que indica que la altura dominante se va a ver disminuida moderadamente conforme aumente el valor de esta en el suelo; en lo que respecta a la relación Mg/K, su correlación con la altura dominante fue directa, a un valor de 0,52; es decir, conforme aumenta el valor de la relación en el suelo, también va a aumentar la altura dominante; al parecer, un valor máximo de 60,91 no sería insostenible.

En el muestreo entre 15 y 30 cm, las variables Mg, Mn, Sat Mg, relación Mg/K y Sat Bases registraron una correlación moderada con la altura dominante. Al respecto, para Mg, Mn, Sat Mg, relación Mg/K y Sat Bases fue directa, al presentar valores de 0,57, 0,66, 0,50, 0,53 y 0,58, respectivamente. Lo anterior apunta que, al aumentar el valor de ellas en el suelo, la altura dominante también lo hará. Por su parte, las variables Fe, acidez y Sat Ac correlacionaron de forma negativa con la altura dominante (-0,53, -0,56 y -0,58,

respectivamente), lo cual indica que la altura dominante decrece con el incremento de los contenidos de estas en el suelo.

En la profundidad de muestreo entre 30 y 60 cm, las variables que registraron correlación moderada con la altura dominante son Mg, Acidez, Sat Ac y Sat Bases. De ellas, el Mg y la Sat Bases con una correlación directa y, por el contrario, el caso de la acidez y la Sat Ac inversa.

En las tres profundidades, las variables Fe y Mn presentan, como se muestra en el Cuadro 8, correlaciones importantes negativas y positivas, respectivamente, lo que lleva a pensar que la teca tiende a disminuir su crecimiento, conforme aumenta el valor de Fe en el suelo y, en el caso contrario, al aumentar el contenido de Mn. No obstante, se debe estudiar con más detalle esta última variable, debido a que su correlación podría estar asociada con otra u otras, haciendo que se identifique de dicha forma.

Cuadro 8. Coeficientes de correlación de Pearson entre la altura dominante de *Tectona grandis* L. f. y las variables químicas y físicas del suelo por profundidad de muestreo, Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Table 8. Pearson's correlation coefficients between the dominant height of *Tectona grandis* L. f. and the chemical and physical variables of the soil by sampling depth, Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Var	Prof (cm)		
	0-15	15-30	30-60
Ca	0,31	0,27	0,33
Mg	0,33	0,57	0,51
Zn	0,49	0,36	-
Fe	-0,59	-0,53	-0,49
Mn	0,47	0,66	0,44
pH agua	-	0,30	-
Acidez	-0,38	-0,56	-0,57
CICE	0,34	-	-
Sat Ac	-0,37	-0,58	-0,61
Sat Ca	-	0,36	0,41
Sat Mg	-	0,50	0,46
Ca/K	0,44	0,41	-
Mg/K	0,52	0,53	-
(Ca+Mg)/K	0,49	0,45	-
Sat Bases	0,37	0,58	0,61
RC	-	-0,29	-0,31
Arcilla	-0,28	-	-

Sat= saturación, Ac= acidez, RC= resistencia al corte tangencial, DA= densidad aparente.

Los cinco perfiles estudiados muestran entre sus características que la mayoría de horizontes poseen una textura arcillosa (Cuadro 9 y 10), donde se presenta un máximo contenido de arcilla de 73 % en el tercer horizonte del índice de sitio 30. En cuanto a color (Cuadro 9 y

Figura 2), la mayoría de horizontes presentan un color de rojo (2,5 YR 4/6) a rojo amarillento (5YR 4/6). Entre las características químicas, las variables Ca, Mn y MO muestran, como se puede observar en el Cuadro 10, sus contenidos mayores en el primer horizonte de cada perfil.

Entre las diferencias encontradas en los cinco perfiles analizados, la tabla de agua en el perfil del índice de sitio 18 se ubicó a los 78 cm de profundidad y en los demás perfiles a profundidades mayores a 90 cm. Además, la ausencia de raíces finas, en el caso del índice de sitio 18, también coincidió con la tabla de agua, ya que, después de los 78 cm de profundidad, estas no se detectaron; en el caso de los demás perfiles, estas aún se encontraron a profundidades mayores a dicho valor.

Cuadro 9. Características físicas de suelo para cinco perfiles y cinco índices de sitio en cultivo de *Tectona grandis* L. f., Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Table 9. Soil physical characteristics for five profiles and five cultivation site indices of *Tectona grandis* L. f., Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Hz	Prof	Col	E-G/P	Cons	L	Ar	Arc	Lim	Lim/Arc	Tex
IS18-TYPIC HAPLUDULTS										
Ap	0-20	5YR 4/4	SBK/C,M	SS	C	36,8	54,0	9,3	0,2	A
Ab	20-35	5YR 4/6	SBK-2/M,F	SS/SP	D	28,0	65,6	6,5	0,1	A
B1	35-78	5YR 4/6	SBK-ABK/C,M,F	SS/SP	D	30,4	64,6	5,0	0,1	A
B2	78-112	2,5YR 4/6	SBK-ABK/M	SO/PO	D	33,6	59,7	6,7	0,1	A
IS21-TYPIC HAPLUDULTS										
Ap	0-20	5YR 3/4	SBK/C	S	C	50,0	37,4	12,7	0,3	AA
A	20-37	5YR 4/6	SBK/C,M,F	S/P	D	26,9	65,7	7,3	0,1	A
B1	37-53	2,5 YR 4/6	SBK/F	S/P	D	30,2	63,2	6,6	0,1	A
B2	53-97	2,5 YR 4/6	SBK/VF	S/P	D	29,8	65,5	4,7	0,1	A
B3	97	2,5 YR 4/6	SBK/F	SP	D	25,5	67,5	7,0	0,1	A
IS24-OXIC HAPLUDEPTS										
AB	0-30	5YR 4/4	SBK/C	S/P	D	59,9	31,4	8,7	0,3	FAA
B1w	30-85	2,5 YR 4/6	SBK/M,F	S/P	D	32,2	61,3	6,5	0,1	A
B2w	85	2,5 YR 4/6	SBK/F	S/P	D	27,6	65,4	7,0	0,1	A
IS27-TYPIC HAPLUDULTS										
A	0-12	5YR 3/3	SBK/C,M	SS	Col-C-D	48,0	39,2	12,8	0,3	AA
B	12-39	5YR 4/6	SBK/M,F	SS	Text-D	19,4	69,4	11,2	0,2	A
B2t	39-90	5YR 4/6	SBK/F	SS	D	34,3	61,1	4,5	0,1	A
Bc	90	5YR 4/6	SBK/F	SP	D	27,8	67,7	4,5	0,1	A
IS30-HUMIC HAPLOHUMULTS										
A1	0-20	5YR 3/4	SBK-1,2/C	SS	C	35,8	47,3	16,9	0,4	A
AB	20-33	5YR 4/6	SBK/F	SS	Tex-D	35,9	61,3	2,8	0,0	A
B2	33-54	5YR 4/6	SBK/F	SS	Tex-D	24,3	73,1	2,6	0,0	A
B2t	54-116	5YR 4/6	SBK/F	SS	Tex-D	23,5	67,3	9,3	0,1	A

Hz= horizonte, Prof = profundidad, Col= color, E= estructura, G= grado, P= porosidad, Cons = consistencia, L= límite, Ar= arena, Arc= arcilla, Lim= limo, Tex= textura; Col y Cons en húmedo; las variables Ar, Arc y Lim expresadas en %.

Cuadro 10. Características químicas de suelo para cinco perfiles y cinco índices de sitio en cultivo de *Tectona grandis* L. f., Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Table 10. Soil chemical characteristics for five profiles and five cultivation site indices of *Tectona grandis* L. f., Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Hz	Prof (cm)	pH agua	Ca	Mg	K	Ac	Sat Ca	Sat Mg	Sat K	Sat Ac	P	Cu	Fe	Mn	Zn	MO	C	S	
IS18-TYPIC HAPLUDULTS																			
Ap	0-20	5,68	2,42	0,75	0,04	0,16	71,6	22,4	1,3	4,7	tr	11,45	67,11	1,60	0,34	3,9	2,7	13,22	
Ab	20-35	6,09	1,69	0,64	0,02	0,14	68,1	25,6	0,7	5,6	tr	14,36	46,70	0,87	0,23	1,5	1,0	9,36	
B1	35-78	6,06	1,26	0,61	0,01	0,10	63,7	30,7	0,5	5,1	tr	9,71	23,45	0,13	0,18	0,7	0,5	25,39	
B2	78-+100	6,09	1,04	0,64	tr	0,06	59,7	36,6	0,3	3,4	tr	6,22	16,68	0,13	0,18	0,2	0,2	50,33	
IS21-TYPIC HAPLUDULTS																			
Ap	0-20	5,60	3,03	0,70	0,07	0,12	77,4	17,8	1,7	3,1	tr	9,71	71,14	4,55	0,89	4,7	3,3	10,85	
A	20-37	5,96	1,84	0,41	0,01	0,14	76,5	17,1	0,6	5,8	tr	10,87	39,94	1,24	0,29	1,4	1,0	11,14	
B1	37-53	6,13	1,36	0,45	tr	0,10	71,1	23,5	0,1	5,2	tr	11,45	35,71	0,50	0,18	0,9	0,6	14,41	
B2	53-97	6,13	0,79	0,50	0,01	0,16	54,4	34,2	0,4	11,0	tr	8,55	20,49	0,50	0,23	0,6	0,4	21,53	
B3	97-+117	5,82	0,45	0,33	tr	0,56	33,5	24,4	0,3	41,8	tr	13,78	28,10	0,13	0,23	0,3	0,2	32,22	
IS24-OXIC HAPLUDEPTS																			
AB	0-30	6,07	4,11	0,50	0,03	0,08	87,1	10,6	0,6	1,7	tr	5,06	47,12	3,63	0,40	4,2	2,9	9,96	
B1w	30-85	6,26	1,61	0,61	0,02	0,08	69,6	26,2	0,7	3,5	tr	13,20	19,22	0,50	0,34	1,1	0,7	23,61	
B2w	85-+110	6,02	0,87	0,64	tr	0,22	50,2	37,1	tr	12,8	tr	8,55	20,07	0,32	0,18	0,5	0,4	27,77	
IS27-TYPIC HAPLUDULTS																			
A	0-12	5,95	2,75	0,73	0,08	0,10	75,2	19,9	2,1	2,7	tr	12,62	63,53	7,13	1,22	5,1	3,6	5,50	
B	dic-39	6,13	1,43	0,51	0,03	0,12	68,7	24,4	1,2	5,7	tr	12,62	33,17	1,24	0,18	1,4	1,0	6,10	
B2t	39-90	6,14	1,15	0,58	0,01	0,14	61	30,9	0,7	7,4	tr	15,53	16,68	1,24	0,18	0,7	0,5	31,03	
Bc	90-+100	6,05	0,82	0,40	0,02	0,10	61,2	29,7	1,6	7,5	tr	14,95	17,11	0,50	0,40	0,5	0,4	22,42	
IS30- HUMIC HAPLOHUMULTS																			
A1	0-20	5,65	2,28	0,73	0,07	0,22	69,2	22,1	2,0	6,7	tr	14,95	68,45	3,08	1,22	4,4	3,1	9,66	
AB	20-33	5,93	1,30	0,54	0,02	0,14	64,6	27,2	1,2	7,0	tr	14,95	36,55	2,16	0,23	1,4	1,0	10,25	
B2	33-54	6,10	1,19	0,58	0,02	0,08	63,5	31,2	1,0	4,2	tr	13,78	20,49	2,89	0,23	1,2	0,8	11,44	
B2t	54-+114	6,02	1,44	0,63	0,02	0,06	67,1	29,1	1,1	2,8	tr	13,78	19,22	1,42	0,18	0,5	0,3	31,63	

Hz= horizonte, Ac= acidez, Sat= saturación, MO= materia orgánica, C= carbono orgánico, IS= índice de sitio, + = más de, tr = trazas; las variables Ca, Mg, K y Ac expresadas en cmol(+)*l⁻¹; las variables MO y C expresadas en %; las variables P, Cu, Fe, Mn, Zn y S expresadas en mg*l⁻¹.

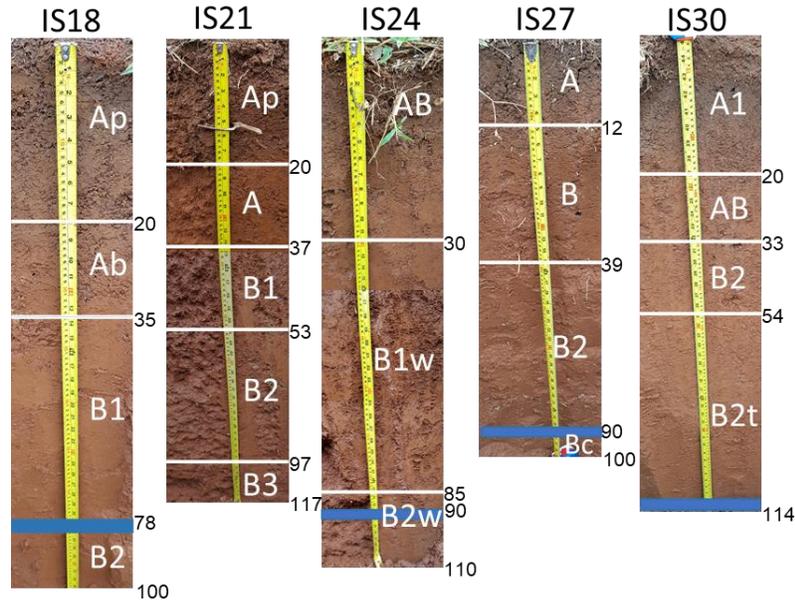


Figura 2. Perfiles de suelo por índice de sitio en *Tectona grandis* L. f., Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Figure 2. Soil profiles by site index in *Tectona grandis* L. f., Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

En el Cuadro 11, se aprecian diferentes modelos de regresión por profundidad, así como el r^2 ajustado, asociado con cada uno de ellos. Dichos modelos fueron generados a partir de las variables que presentaron mayor correlación con la altura dominante. Se puede observar que el modelo con mayor r^2 ajustado (57,6) se presenta en la profundidad entre 15 y 30 cm y predice la altura dominante en función del contenido de Mn y de la Sat Bases a dicha profundidad y muestra que, cuando mayor sean sus valores, mayor va a ser el valor predicho de altura dominante a alcanzar a la edad de 9,2 años. Caso contrario, el tercer modelo de la profundidad entre 15 y 30 cm predice la altura dominante en función de la Sat Ac, la que, en caso de registrar valores altos, los valores predichos de altura dominante serán bajos.

Cuadro 11. Modelos con mayor relación entre la altura dominante de *Tectona grandis* L. f. y variables de suelo para tres profundidades de suelo, Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Table 11. Models with the greatest relationship between the dominant height of *Tectona grandis* L. f. and soil variables for three soil depths, Pocosol, Alajuela, Costa Rica.

Prof	Modelo	p-Valor	r ² ajustado	Error estándar del estimado	Error absoluto medio
0-15	$HD = 15,2154 - 0,0436654*Fe + 0,0462701*Mn + 4,52689*Mg$	0,0000	46,9	2,78	2,12
0-15	$HD = 16,0846 - 0,0334435*Fe + 0,0241263*(Ca+Mg)/K + 0,0487096*Mn$	0,0000	42,8	2,86	2,16
0-15	$HD = \sqrt{124,756 + 12420,1/Fe}$	0,0000	42,7	104,75	84,31
0-15	$HD = 10,9644 + 0,263887*Mg/K + 0,0573958*Mn$	0,0000	42,6	2,89	2,27
0-15	$HD = 10,3864 + 0,24279*Mg/K + 2,98139*Zn$	0,0000	40,3	2,95	2,34
15-30	$HD = -0,15223 + 0,125719*Mn + 0,164759*Sat Bases$	0,0000	57,6	2,49	1,94
15-30	$HD = 7,72655 + 0,124865*Mn + 11,7371*Mg$	0,0000	55,0	2,56	2,02
15-30	$HD = \sqrt{148,524 + 1651,63/Sat Ac}$	0,0000	54,2	93,64	79,33
15-30	$HD = \sqrt{246,178 + 0,0808362*Mn^2}$	0,0000	46,7	101,09	82,24
30-60	$HD = 10,488 - 6,17115*Acidez + 0,108477*Mn + 13,0324*Mg$	0,0000	50,7	2,68	2,08
30-60	$HD = 1/(0,0311109 + 0,0123411*\ln(Sat Ac))$	0,0000	46,8	0,01	0,01
30-60	$HD = 14,2871 + 0,100422*Mn + 6,02931*Ca - 0,109635*Fe$	0,0000	46,4	2,80	2,18
30-60	$HD = 1/(0,0970747 - 0,00000495356*Sat Bases^2)$	0,0000	42,7	0,01	0,01

Sat= saturación, Ac= acidez.

4. Discusión

Se encontraron condiciones desfavorables para el crecimiento de la teca, entre ellas: contenidos altos de acidez ($0,23 \text{ cmol}(+)*\text{l}^{-1}$) con base en la CICE; valores deficientes de K ($0,04 \text{ cmol}(+)*\text{l}^{-1}$); valores altos de Sat Ac (10,2 %); contenidos bajos de CICE ($2,57 \text{ cmol}(+)*\text{l}^{-1}$) y de P ($0,08 \text{ mg}*\text{l}^{-1}$) y un alto porcentaje de arcilla (60,8 %). Conclusiones similares encontraron Alvarado y Fallas (2004) para la Zona Norte del país y Mollinedo et al. (2005) en Panamá, indicando que estas variables podrían ser las causantes, en forma parcial o total, del crecimiento heterogéneo presentado en el área bajo estudio.

El 99,3 % de las muestras analizadas registraron un valor de $\text{pH} \geq 5,5$, de este porcentaje el 70,1 % presentó valores moderadamente ácidos (5,51 - 6,00) y el 29,9 % valores ligeramente alcalinos (6,01 - 6,50). Lo anterior indica, según el *United States Department of Agriculture* (USDA, 2017), que el área bajo estudio es moderadamente ácida y, por ende, podría ser adecuada para la especie teca. Solo se encontró una muestra de suelo con pH igual a 5,3, lo que podría significar la presencia de Al^{+3} , el cual, según Alvarado y Fallas (2004), ocurre a valores de $\text{pH} < 5,5$ y aumenta exponencialmente con forme el valor de pH decrece, haciendo que la saturación de Al o de acidez incremente y provoque una disminución de la disponibilidad de ciertos elementos (Mg, K y Ca) en el suelo que son necesarios para el desarrollo adecuado de los árboles de teca. Por su parte, en Guatemala Vaides et al. (2019), identificaron los mejores sitios con valores de pH por arriba de 5,5; no obstante, también identificaron un sitio de excelente calidad con pH inferior al mencionado, pero los autores hacen la salvedad de que dicho sitio presentó un valor de saturación de Ca de 64 %, lo cual pudo haber contribuido para alcanzar dicha calidad.

El análisis de la variable pH , según las profundidades estudiadas en el muestreo, mostró valores promedio de 5,8, 5,9 y 6,0 en la primera, segunda y tercera, respectivamente, lo cual indica que el valor de pH en el área de estudio tiende a crecer conforme se baja en el perfil del suelo. Lo anterior también ocurre en los valores obtenidos en el análisis de los horizontes de los cinco perfiles estudiados, lo que podría indicar que en el primer horizonte del suelo ciertos factores contribuyen a el aumento de los valores de la variable.

El análisis estadístico por índice de sitio mostró valores promedio de pH (sin distinguir profundidad) de 5,9 en cada uno de ellos; es decir, en general, los valores de pH entre índices de sitio son muy similares. Ligado a lo anterior, al comparar el valor promedio de pH de los cinco índices de sitio en cada una de las profundidades, se encontraron entre ellos diferencias muy bajas ($\leq 0,2$), indicando que estos, a nivel general, son muy similares entre sí en las tres profundidades. Lo anterior sugiere que la variable pH , al menos en el área bajo estudio de la presente investigación, no es la causante, en ninguna de las tres profundidades, de la heterogeneidad en altura dominante. Es decir, no debería considerarse como un factor diferenciador del crecimiento.

En plantaciones de teca en Guatemala (Vaides et al., 2019) y Panamá (Mollinedo et al., 2005) los mejores sitios fueron encontrados a valores de pH superiores a 5,5 en la profundidad entre 0 y 20 cm y, por el contrario, los sitios de más bajo crecimiento a valores de pH inferiores a 5,5. De igual manera, en bosques naturales de Nilambur (Choudhari y Prasad, 2018) la teca ha mostrado buen crecimiento a valores de pH de 5,5, no obstante, en Brasil (Oliveira, 2003) se encontró sitios de regular y buen crecimiento sobre suelos con $\text{pH} < 5,5$, esto sin embargo con condiciones favorables para el adecuado desarrollo de la teca de otras variables del suelo.

De igual forma que el presente estudio, en Ghana (Watanabe, Owusu-Sekyere, Masunaga, Moro-Buri y Oladele, 2010) evaluaron el desarrollo de la teca con base en variables químicas del suelo a tres profundidades (0-5 cm, 30-35 cm y 75-80 cm) y no se encontró correlación entre el crecimiento y el pH, pese a que varió desde 4,67 hasta 8,94. Por su parte, en Costa Rica y principalmente en la región del Pacífico Vallejos (1996) ubicó los mejores sitios (medios, altos y excelentes) a valores promedio de pH mayores a 6,1 en las profundidades de 0-20 y 20-40 cm.

El pH no afecta directamente el crecimiento de la teca, pero sí afecta el comportamiento de otras características del suelo, por lo que no es fácil encontrar una correlación directa de dicha variable con el desarrollo de la masa forestal. A pesar de que las PPM analizadas en este estudio presentaron valores aceptables de pH, no todas alcanzaron, al menos, el índice de sitio promedio (IS24) o superior; lo que indica que la presencia de valores buenos ($> 5,5$) de esta variable en el suelo, no necesariamente van a resultar en índices de sitio altos.

La saturación de acidez presentó, en general (sin distinguir profundidad ni índice de sitio) un valor promedio alto (10,2 %, con un rango desde 0,9 % hasta 53,0 %), lo que identifica a esta variable como una limitante en el área de estudio. Al respecto, en Ultisoles del sur y del norte de Costa Rica Alvarado y Fallas (2004) encontraron que el crecimiento de la especie se ve disminuido a valores mayores de 3 % de saturación de acidez. En el presente estudio, el 94 % de las muestras de suelo analizadas fue superior a dicho valor, donde el 65,3 % de las muestras analizadas se ubicaron a valores de saturación de acidez de entre 3 y 10 %; un 22 % de las muestras entre 10 y 25 % y un 6,7 % superiores al 25 %. En el análisis de saturación de acidez por profundidad, se encontraron valores promedio de 6,1 %, 12,5 % y 12,0 % en el muestreo de 0-15 cm, 15-30 cm y 30-60 cm, respectivamente, lo que indica, que en el área en estudio la saturación de acidez tiende a incrementar e inclusive se duplica entre los 15 y 60 cm de profundidad, lo cual es de esperar en suelos como los estudiados en la presente investigación, debido a su origen, condiciones ambientales y a que al aumentar la profundidad, los contenidos de bases disminuyen permitiéndole a la variable acidez estar más disponible.

Los valores promedio de saturación de acidez por índice de sitio (sin distinguir profundidad) mostraron que 18 y 21 poseen valores hasta tres veces mayores que 24, 27 y 30, lo que podría contribuir en la muy marcada diferencia en el crecimiento entre dichos índices de sitio. Esto indica que, para registrar IS de 24, 27 y 30 en condiciones similares al área de estudio, se requieren valores promedio de saturación de acidez $\leq 7,8$ %.

Continuando con el análisis de la variable saturación de acidez, se encontraron valores promedio $\leq 5,1$ %, $\leq 11,1$ % y $\leq 7,3$ % en la primera, segunda y tercera profundidad, respectivamente, del índice de sitio intermedio (IS24), lo que es característico en la zona norte de Costa Rica, es decir, abundancia de suelos ácidos. En Costa Rica (Vallejos, 1996) pero en suelos mayormente básicos de otras zonas del país, se determinaron sitios de crecimiento medio a valores promedio de saturación de acidez de 0,7 %, sin embargo, dicho valor puede deberse al alto contenido de Ca presente en los suelos, versus valores muy bajos de contenido de acidez [$21,8 \text{ cmol}(+) \cdot \text{l}^{-1}$ vs. $0,2 \text{ cmol}(+) \cdot \text{l}^{-1}$]. Dicha característica se debe a la pedogénesis de estos, además, en dichos sitios los crecimientos marginales fueron encontrados en suelos con valores de acidez menores a dicho valor (0,5 %), lo cual indica,

que en esos suelos, la variable acidez no es la responsable de la heterogeneidad del crecimiento de las plantaciones. Por su parte, en otro estudio, igualmente en el Pacífico de Costa Rica, sitios clasificados como crecimiento marginal ($IS < 21$) fueron ubicados por Thiele (2008) a valores de saturación de acidez mayores a 12,8 % en la profundidad de 0 a 50 cm y mayores a 6,6 % en el horizonte Ap. Adicionalmente, en Guatemala (Vaides et al., 2019) concluyeron que los sitios con más de 5 % de saturación de acidez, en la profundidad de 0 a 20 cm, podrían estar clasificados dentro de las clases medias a bajas.

Finalmente, en Panamá (Mollinedo et al., 2005) el crecimiento en altura y el incremento medio anual en volumen se ven limitados a valores de saturación de acidez de 6,8 % y 8 %, respectivamente. Existen reportes en Brasil (Oliveira, 2003) de un valor máximo de tolerancia de saturación de acidez de 10 % para la especie.

El contenido de acidez en el área bajo estudio mostró en general un valor de $0,2 \text{ cmol}(+)*\text{l}^{-1}$, sin distinguir profundidad ni índice de sitio. Se registró una concentración bastante homogénea desde 0 cm hasta los 60 cm de profundidad, al presentarse 0,2, 0,3 y $0,2 \text{ cmol}(+)*\text{l}^{-1}$ en la primera, segunda y tercera profundidad evaluadas, respectivamente. Resulta relevante recalcar que el contenido de acidez no registró valores mayores a $1,12 \text{ cmol}(+)*\text{l}^{-1}$ en ninguna de las tres profundidades. Al respecto, en el Pacífico de Costa Rica (Thiele, 2008) no se encontró relación significativa entre la altura dominante y el contenido de acidez, sin embargo, la altura tendió a disminuir, al aumentar el contenido de acidez. Además, en el mismo estudio, se aclara que la nula significancia puede estar asociada con que se presentó un contenido promedio alto de Ca de $24,3 \text{ cmol}(+)*\text{l}^{-1}$ en sitios con contenido promedio de acidez de $0,69 \text{ cmol}(+)*\text{l}^{-1}$. Lo anterior podría resultar en un valor promedio de saturación de acidez de 3,7 %, el cual se ubica muy cerca del valor recomendado para la especie ($< 3 \%$) por Alvarado y Fallas (2004).

Los valores promedio de acidez de los cinco índices de sitio (sin distinguir profundidad) varía entre 0,4 (IS18) y $0,1 \text{ cmol}(+)*\text{l}^{-1}$ (IS30) y, a pesar de que dichos valores son similares, estadísticamente son diferentes y tienden a disminuir, al aumentar el índice de sitio, lo que muestra que se requieren valores muy cercanos a cero para lograr obtener, al menos, un índice sitio intermedio (IS24), esto bajo las concentraciones de las otras bases encontradas en este estudio. Al comparar los valores promedio de acidez de los cinco índices de sitio en cada profundidad, se encontró que los valores promedio de acidez tienden a disminuir cuando aumenta el índice de sitio y se podría sugerir que valores $< 0,3 \text{ cmol}(+)*\text{l}^{-1}$ tendrían un efecto positivo en el crecimiento de la teca bajo las condiciones de concentración de las bases del presente estudio. El rango de concentración antes mencionado se ubica dentro de lo encontrado por Vallejos (1996) en el Pacífico de Costa Rica, donde se registraron los sitios medios, altos y excelentes a valores promedio de acidez en el suelo menores a $0,4 \text{ cmol}(+)*\text{l}^{-1}$ en profundidades desde 0 y hasta 40 cm. Adicionalmente, Alvarado y Fallas (2004) mencionan que en África Oriental valores entre 2,55 y $6,55 \text{ cmol}(+)*\text{l}^{-1}$ de Al intercambiable, se consideran como altos para teca. Se podría inferir que la acidez sí afecta el crecimiento de la teca, no obstante, también va a depender de la concentración de bases que el terreno presente, donde a valores altos de estos la variable en cuestión no va a influir fuertemente sobre el crecimiento, sino sobre otros factores.

El valor general (sin distinguir profundidad ni índice de sitio) de CICE para el área bajo estudio registró un valor promedio de $2,6 \text{ cmol}(+) \cdot \text{l}^{-1}$, el cual se podría considerar como bajo para sitios con buena productividad con teca. Continuando con esta variable, el análisis hecho en las tres profundidades muestreadas mostró valores promedio (sin distinción de índice de sitio) de 3,7, 2,2 y $1,8 \text{ cmol}(+) \cdot \text{l}^{-1}$ en la primera, segunda y tercera profundidad, respectivamente, indicando que el contenido de CICE en el área bajo estudio decrece al aumentar la profundidad. Por su parte, el análisis de la variable con los índices de sitio (sin distinguir profundidad) indica que este tiende a crecer conforme el valor de CICE aumenta, mostrando valores mayores a $2,5 \text{ cmol}(+) \cdot \text{l}^{-1}$ en los IS 24, 27 y 30. Lo anterior señala que, en el área de estudio, se requieren valores promedio de CICE $> 2,5 \text{ cmol}(+) \cdot \text{l}^{-1}$ para alcanzar, al menos un índice sitio intermedio (IS24), siempre y cuando permanezcan las condiciones actuales de pH y de las demás variables edáficas. Al analizar los valores de CICE con el índice de sitio y las tres profundidades muestreadas, se identifica una relación directa entre ambas variables, en la primera profundidad, al presentar valores promedio de CICE $> 3,7 \text{ cmol}(+) \cdot \text{l}^{-1}$ en los índices de sitio 24, 27 y 30; además, la CICE a esta profundidad mostró diferencias estadísticamente significativas entre los IS 18 y 30. Adicionalmente, es relevante mencionar que la concentración de bases, a nivel general, tiene valores bajos en la parte superficial del suelo, razón por la cual la concentración de acidez fácilmente puede representar porcentajes de saturación de acidez altos. En la región del Pacífico costarricense Vallejos (1996) encontró los mejores sitios (medios, altos y excelente) a valores promedio de CICE mayores a $27,9 \text{ cmol}(+) \cdot \text{l}^{-1}$ en el suelo a las profundidades de 0-20 y 20-40 cm. Esto fue posible, debido a que los suelos muestreados por el autor tienen altos contenidos de bases y, principalmente, del elemento calcio. Por su parte, en el presente estudio, el valor más bajo de CICE registrado en los índices de sitio 27 y 30 en la profundidad del muestreo de 0-15 cm y en el primer horizonte de los perfiles correspondientes fue de 3,04 y de $3,3 \text{ cmol}(+) \cdot \text{l}^{-1}$ y los más altos de 4,93 y $3,66 \text{ cmol}(+) \cdot \text{l}^{-1}$, respectivamente. En relación con esto, el valor más bajo encontrado por Thiele (2008) en la región del Pacífico costarricense en sitios clase 1 fue de $13,76 \text{ cmol}(+) \cdot \text{l}^{-1}$ en el horizonte Ap y de 16,5 en la profundidad de 0-50 cm, no obstante, dichos valores corresponden igualmente a suelos con contenidos altos en bases, lo que provoca una diferencia de hasta cuatro veces mayor al obtenido en la presente investigación.

El contenido de Ca para el área bajo estudio (sin distinguir profundidad ni índice de sitio) fue de $1,7 \text{ cmol}(+) \cdot \text{l}^{-1}$ y es considerado por Montero (1999) como bajo ($< 2,2 \text{ cmol}(+) \cdot \text{l}^{-1}$) para el adecuado desarrollo de sistemas de producción con teca. En el análisis hecho por profundidad, se registraron valores (sin distinguir índices de sitio) de 2,7, 1,4 y $0,9 \text{ cmol}(+) \cdot \text{l}^{-1}$ en la primera, segunda y tercera profundidad, respectivamente, lo que denota que la variable decrece fuertemente al aumentar la profundidad.

Los valores promedio del contenido de Ca por índice de sitio (sin distinguir profundidad) son muy similares, no obstante, este tiende a aumentar, cuando el índice de sitio aumenta y muestra valores mayores a $1,6 \text{ cmol}(+) \cdot \text{l}^{-1}$ en los índices de sitio 24, 27 y 30, lo que indica que, a mayor contenido de Ca, es más probable obtener buenos crecimientos; no obstante, si se toma el valor máximo registrado en la profundidad de 0-15 cm en el índice de sitio 30 ($3,82 \text{ cmol}(+) \cdot \text{l}^{-1}$), no se requerirían, al menos para el área en estudio, valores muy altos para que la teca alcance buenos crecimientos, siempre y cuando se cuente también con valores similares a los registrados en las demás variables edáficas. En Guanacaste, Vásquez y Ugalde (1996) encontraron valores de Ca, en el primer horizonte, superiores a $10 \text{ cmol}(+) \cdot \text{l}^{-1}$

asociados con los mejores sitios, esto debido, sin duda, a los suelos básicos donde fue realizado su estudio. En Panamá, Mollinedo et al. (2005) indican que para obtener crecimientos de medios a altos, se requieren, al menos, $8-10 \text{ cmol}(+)*\text{l}^{-1}$ de Ca. Por su parte, y relacionándose un poco más con los valores obtenidos en el presente estudio, en plantaciones del Pacífico de Costa Rica Thiele (2008) ubicó los mejores sitios (clase 1) a valores de Ca mayores a $5,96 \text{ cmol}(+)*\text{l}^{-1}$.

La comparación de los valores promedio de Ca obtenidos para cada índice de sitio en cada profundidad muestra una relación positiva directa entre ambas variables. En el Pacífico de Costa Rica, Vallejos (1996) encontró los mejores sitios (medios, altos y excelente) a valores promedio de Ca mayores a $20,7 \text{ cmol}(+)*\text{l}^{-1}$ a las profundidades de 0-20 y de 20-40 cm.

El contenido de saturación de Ca para el área bajo estudio (sin distinción de índices de sitio ni de profundidad) fue de 61,8 %, es decir, menor al valor de 68 % recomendado por Alvarado y Fallas (2004) como mínimo para un buen crecimiento de teca. Se registró un decrecimiento de dicha variable conforme aumenta la profundidad. Se lograron identificar PPM (35 = 70 %), al menos en la primera profundidad, con valores que sí cumplen con el valor mínimo de saturación de Ca ya mencionado, no obstante, el 37 % de ellas (13 PPM) corresponden a índices de sitio 18 y 21, lo que indica que la variable por sí sola no asegura un crecimiento adecuado para teca.

Los valores de saturación de Ca comparados por índice de sitio en cada una de las tres profundidades tienden a aumentar en las tres profundidades conforme aumenta el índice de sitio y se presentan valores promedio de 73, 62 y 56,2 % en la primera, segunda y tercera profundidad en los sitios de crecimiento intermedio (IS24). A dichos valores por profundidad, la teca puede alcanzar, al menos, 24 m en altura dominante a los 16 años de edad, lo anterior condicionado a que también se cuente con los valores registrados para las demás variables edáficas. En el Pacífico costarricense, Vallejos (1996) encontró los mejores sitios (medios, altos y excelente) a valores promedio de saturación de Ca mayores a 72,9 % en el suelo a las profundidades entre 0-20 y 20-40 cm. En la misma región, Thiele (2008) ubicó el 94 % de los sitios clase 1 sobre valores de saturación de Ca mayores a 69 % en el primer horizonte y el 96 % de los sitios de la misma clase a valores mayores a 65 % en la profundidad de 0-50 cm. Por su parte en Guatemala, Vaides et al. (2019) encontraron sitios buenos y excelentes a valores de saturación de calcio mayores a 48 % en la profundidad de 0 a 20 cm. A todo lo anterior, en Panamá (Mollinedo et al., 2005) concluyeron que para la profundidad de 0 a 20 cm, la teca requiere valores de saturación de calcio mayores a 40 %. En otro contexto, pero relacionado con la variable antes mencionada, en sitios similares al presente estudio, con valores en el suelo de $\text{pH} < 6$, condiciones de saturación de acidez menores al 3 % y de saturación Ca mayores al 68 %, en ensayos de fertilidad Alvarado y Fallas (2004) lograron incrementar la altura de los árboles en un 59 % al adicionar al suelo 1 kg CaCO_3 , lo que indica que las áreas con valores bajos en índice de sitio podrían mejorar su crecimiento mediante un programa de enmiendas al suelo oportuno y eficientemente.

El contenido promedio de Fe en el área bajo estudio (sin distinción de índices de sitio ni de profundidad) fue de $54,0 \text{ mg}*\text{l}^{-1}$ (en el rango de $7,8-175,6 \text{ mg}*\text{l}^{-1}$). Se registró un decrecimiento de esta variable conforme se bajaba en el perfil del suelo, al registrar valores de $73,0, 60,2$ y $28,8 \text{ mg}*\text{l}^{-1}$, respectivamente. Dicho patrón también se mostró al aumentar el

índice de sitio ($78,1 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ y $27,7$ para IS 18 y 30, respectivamente). Lo anterior concuerda con un estudio en Guanacaste, donde Vásquez y Ugalde (1996) encontraron altos contenidos de Fe en los sitios de crecimiento más marginal.

El valor promedio de Mn para el área de estudio (sin distinción de índices de sitio ni de profundidad) fue de $32,7 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$. Se registró el mismo patrón de la variable anterior al presentar valores de $56,5$, $29,9$ y $11,7 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ en la primera, segunda y tercera profundidad, mostrando que la variable disminuye conforme aumenta la profundidad, respectivamente. Por otra parte, el contenido de Mn mostró una tendencia a crecer conforme se aumenta el índice de sitio. El análisis por índice de sitio y profundidad muestran que el índice de sitio 18 posee valores inferiores y diferentes estadísticamente que el índice de sitio 30 en las tres profundidades muestreadas. En el Pacífico de Costa Rica, Thiele (2008) encontró que altos valores promedio de Mn ($235 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$) hasta 50 cm de profundidad, al parecer no afectan el crecimiento de la teca, sin embargo, se indica que podría deberse a condiciones favorables de otras variables.

El valor promedio de arcilla encontrado para toda el área estudiada (sin distinguir índice de sitio ni profundidad) fue de $60,8 \%$ (en el rango desde 25 hasta 87 %). En el índice de sitio 18, se registró un valor mayor al presentado en el 30, y estadísticamente son diferentes entre sí. El índice de sitio 18 posee contenidos de arcilla de 51% , 66% y 76% en la primera, segunda y tercera profundidad evaluada, respectivamente, con lo que se identifican como los más altos entre los cinco índices estudiados. No obstante, el contenido de arcilla difiere estadísticamente hablando únicamente en la evaluación realizada de 0 cm a 15 cm. En sitios del Pacífico costarricense, Vallejos (1996) identificó los mejores sitios (medios, altos y excelentes) a valores promedio de arcilla, menores a 52% en el suelo a las profundidades entre 0-20 y 20-40 cm y, en la misma región Thiele (2008) encontró un valor máximo de 58% de arcilla en sitios de clase 1, 2 y 3 (IS 30, 27 y 24). Lo anterior indica que la teca tolera altos contenidos de arcilla, sin embargo, como se puede observar en el perfil estudiado en el índice de sitio 18, cuando esta se presenta asociada con un drenaje pobre, la especie se ve limitada en su crecimiento.

En relación con los modelos de predicción confeccionados, el valor más alto de r^2 en la primera profundidad fue de $46,9$, donde la ecuación considera las variables Fe, Mn y Mg, lo cual indica que, conforme aumenta el valor de Fe, el valor predicho va a ser menor y, de forma contraria, las variables Mn y Mg. El valor más alto de r^2 en la segunda profundidad fue de $57,6$ y la ecuación considera las variables Mn y Sat Bases, indicando que, conforme estas aumenten en el suelo, el crecimiento predicho va a ser mayor. El valor más alto de r^2 en la tercera profundidad fue de $50,7$ y toma en cuenta las variables acidez, Mn y Fe, indicando que conforme mayores sean los valores de acidez y Fe en el suelo menor va a ser el valor de crecimiento a obtener, lo contrario sucede con Mn. Por ende, las variables que explican con mayor fuerza la altura dominante en teca, al menos en el área bajo estudio, son Fe, Mn, Sat Bases, Mg y acidez, no obstante, también la Sat Ac, el Zn y las relaciones $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{K}$ y Mg/K estarían incidiendo considerablemente.

5. Conclusiones

Se encontraron diferencias en los factores químicos y físicos del suelo que podrían explicar el crecimiento para la teca en las cinco calidades de sitio identificadas. La saturación de acidez, el contenido de Fe y de acidez de los peores sitios (IS18) son en promedio, 17 %, 78 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ y 0,37 $\text{cmol}(+)\cdot\text{l}^{-1}$, respectivamente, y de 5 %, 28 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ y 0,13 $\text{cmol}(+)\cdot\text{l}^{-1}$ en los mejores. Se encontró una ligera tendencia negativa entre el aumento de los valores promedio de Acidez, Sat Ac, Fe y el decrecimiento en el índice de sitio.

Los cinco índices de sitio presentan valores favorables de pH para el crecimiento de teca y son similares entre IS (entre 5,85 y 5,92). Asimismo, estos cinco índices de sitio presentan valores desfavorables de CICE (2,4 y 2,7 $\text{cmol}(+)\cdot\text{l}^{-1}$), K (0,06-0,03 $\text{cmol}(+)\cdot\text{l}^{-1}$), Sat Ca (55,7-62,7 %), P (0,05-0,12 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) y arcilla (65-59 %).

De la misma forma, los cinco índices de sitio presentan una ligera tendencia positiva entre el incremento de la altura dominante y el aumento de las relaciones Mg/K y (Ca+Mg)/K.

Además, presentan valores favorables de pH (5,73-6,08) y Sat Bases (78-96 %) para teca en las tres profundidades y de Sat Ca (68,2-74,3 %) en la profundidad de 0-15 cm, valores desfavorables de Sat Ac en las tres profundidades y más fuertemente (entre 17-22 %) en los IS 18 y 21 en la profundidad de 15-60 cm, también se presentan valores desfavorables de arcilla (> 50 %) en las tres profundidades. Se presentan valores bajos de Ca (0,79-2,88 $\text{cmol}(+)\cdot\text{l}^{-1}$), Mg (0,46-0,89 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$), CICE (1,71-3,97 $\text{cmol}(+)\cdot\text{l}^{-1}$) y Zn (0,43-1,83 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) y contenidos deficientes de K (0,02-0,08 $\text{cmol}(+)\cdot\text{l}^{-1}$) y P (0,02-0,17 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) en las tres profundidades estudiadas.

El índice de sitio crece, al aumentar ligeramente los valores de CICE, Ca, Sat Ca, Sat Bases y Mn en las tres profundidades, con excepción de CICE, cuya tendencia solo se presenta en la profundidad de 0-15 cm. Asimismo, el índice de sitio disminuye al aumentar los valores de Ac, Fe y Sat Ac en las tres profundidades.

Se lograron confeccionar modelos matemáticos de predicción de crecimiento de la teca en función de variables químicas en las tres profundidades. Los modelos matemáticos de predicción del crecimiento en la primera profundidad toman en cuenta las variables Fe, Mn, Mg, relación (Ca+Mg)/K y relación Mg/K y Zn. El modelo de mayor ajuste ($r^2= 46,9$) se presenta al combinar las variables Fe, Mn y Mg.

Los modelos matemáticos de predicción de crecimiento de teca confeccionados para la segunda profundidad toman en cuenta las variables Sat Bases, Mn, Mg y Sat Ac. El modelo de mayor ajuste ($r^2= 57,6$) se presenta al combinar las variables Mn y Sat Bases.

Finalmente, los modelos matemáticos de predicción de crecimiento de teca confeccionados para la tercera profundidad toman en cuenta las variables acidez, Mn, Mg, Sat Ac, Ca, Fe y Sat Bases. El modelo de mayor ajuste ($r^2 = 50,7$) se presenta al combinar las variables Acidez, Mn y Mg.

6. Referencias

- Alvarado, A. (2006). Nutrición y fertilización de la teca. *Informaciones Agronómicas*. 61. 1-8. Recuperado de <https://n9.cl/2b6u>
- Alvarado, A. y Fallas, J. L. (2004). La saturación de acidez y el encalado sobre el crecimiento de la teca (*Tectona grandis* L. f.) en suelos ácidos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 28(1), 81-87. Recuperado de <https://n9.cl/6eho2>
- Araya, J. (2017, 8 de marzo). Expansión piñera se comió 5.568 hectáreas de bosque. *Semanario Universidad*. Recuperado de <https://n9.cl/g3xub>
- Choudhari, P. L. y Prasad, J. (2018). Teak supporting soils of India: a review. *Open Access Journal of Science*, 2(3), 198-200. doi:10.15406/oajs.2018.02.00070
- Fallas, J. L. (2014). *Respuesta a la fertilización de la teca (*Tectona grandis* L. f.) con NPK en ultisoles de la Zona Norte de Costa Rica* [Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. <https://n9.cl/rr490>
- Fallas, J. L. (2017). *Funciones Alométricas, de volúmen y de crecimiento para clones de teca (*Tectona grandis* L. f.) en Costa Rica*. [Tesis de maestría, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. <https://n9.cl/7dcx>
- Forsythe, W. (1985). *Manual de laboratorio física de suelos*. San José, CR: IICA. Recuperado de <https://n9.cl/myoa6>
- Hernández, R., Torres, A., Márquez, O. y Franco, W. (1993). Contenido foliar de nutrimentos y crecimiento en plantaciones de teca en Ticoporo, Venezuela. *Turrialbana*, 43(1), 11-15. Recuperado de <https://n9.cl/ajt6>
- Instituto Meteorológico Nacional. (2008). *El clima, su variabilidad y cambio climático en Costa Rica*. San José, CR: IMN. Recuperado de <https://n9.cl/1rbep>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC]. (2014). *Total de fincas con cultivo de teca por extensión sembrada y en edad de producción en hectáreas y cantidad de plantas dispersas según provincia y cantón*. San José, CR: INEC. Recuperado de <https://n9.cl/f1xgs>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC]. (2015). *VI Censo Nacional Agropecuario: Resultados Generales*. San José, CR: INEC. Recuperado de <https://n9.cl/mo467>
- Organización Internacional de Normalización [ISO]. (2005). *Soil quality: Determination of pH* (ISO 10390). <https://n9.cl/h0c8l>
- Keogh, R. M. (2013). La teca y su importancia económica a nivel mundial. En R. de Camino y J. P. Morales (Eds.), *Las plantaciones de teca en América Latina: mitos y realidades* (págs. 7-28). Turrialba, CR: CATIE. Recuperado de <https://n9.cl/bzgm>
- McKean, S. J. (1993). *Manual de análisis de suelos y tejido vegetal: una guía teórica y práctica de metodologías*. Cali, COL: CIAT. Recuperado de <https://n9.cl/afzz>

- Meza, V., Alfaro, K., Bedoya, R. Romero, M., Valerio, A. y Montenegro, P. (2019). *Reforestación comercial en Costa Rica*. Heredia, CR; INISEFOR-UNA. Recuperado de <https://n9.cl/aliae>
- Mollinedo, M., Ugalde, L., Alvarado, A., Verjans, J. M. y Rudy, L. C. (2005). Relación suelo-árbol y factores de sitio en plantaciones jóvenes de teca (*Tectona grandis*) en la zona oeste de la cuenca del canal de Panamá. *Agronomía Costarricense*, 29(1), 67-75. Recuperado de <https://n9.cl/vxm8w>
- Montero, M. (1999). *Factores de sitio que influyen en el crecimiento de Tectona grandis L.f y Bombacopsis quinata (Jacq.) Dugand, en Costa Rica*. [Tesis de maestría, Universidad Austral de Chile]. <https://n9.cl/t353>
- Mora, F. y Meza, V. (2003). *Curvas de índice de sitio para teca (Tectona grandis Linn.) en la Vertiente del Pacífico de Costa Rica*. Heredia, CR: INISEFOR-UNA.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). *Norma oficial mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos: estudios, muestreos y análisis* (NOM-021-RECNAT-2000). Recuperado de <https://n9.cl/p7flc>
- Oliveira, J. R. (2003). *Sistema para cálculo de balanço nutricional e recomendacao de calagem e adubacao de povoamentos de teca - Nutriteca*. [Tesis de maestria, Universidad Federal de Vicosa]. <https://n9.cl/iedc4>
- Ortiz, E. (2009). *Atlas digital de Costa Rica 2008*. Cartago, CR: ITCR.
- Salinas, J. G. y García, R. (1985). *Métodos químicos para el análisis de suelos ácidos y plantas forrajeras*. Cali, COL: CIAT. Recuperado de <https://n9.cl/ljps>
- Sarlin, P. (1957). *Le Teck et les sols au Togo-et Annex: Le Teck et le calcium du sol*. Division de Pédologie.
- Thiele, H. (2008). *Variables edáficas que afectan el crecimiento de la teca (Tectona grandis L. f.) en la vertiente del Pacífico de Costa Rica*. [Tesis de maestria, Universidad de Costa Rica].
- United States Department of Agriculture. (2017). *Soil survey manual* (Vol. 18). Washington, US: USDA. Recuperado de <https://n9.cl/h2ejw>
- Vaides-López, E., Alvarado-Hernández, A. y Moya-Fernández, R. (2019). Site characteristics that determine the growth and productivity of teak (*Tectona grandis* L. f.) of young plantations in Guatemala. *Agronomía Costarricense*, 43(1), 135-148. Recuperado de <https://n9.cl/igvzr>
- Vallejos, O. S. (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 de maestria, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. <https://n9.cl/cb3q0>

- Vargas, C., Miller, C. y Arguedas, C. (2020). *Informe: Monitoreo del estado de la piña en Costa Rica para el año 2018*. San José, CR, CONARE – CENAT. Recuperado de <https://n9.cl/k97k8>
- Vásquez , W. y Ugalde, L. A. (1996). *Rendimiento y calidad de sitio para Gmelina arborea, Tectona grandis, Bombacopsis quinatum y Pinus caribaea en Guanacaste, Costa Rica*. Cartago, CR: CATIE. Recuperado de <https://n9.cl/11pr>
- Watanabe, Y., Owusu-Sekyere, E., Masunaga, T., Moro-Buri, M. y Oladele, O. I. (2010). Teak (*Tectona grandis*) growth as influenced by soil physicochemical properties and other site conditions in Ashanti region, Ghana. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 8(2), 1040-1045. Recuperado de <https://n9.cl/m4rr8>
- Zagal, E. y Sadzawka, A. (2007). *Protocolo de métodos de análisis para suelos y lodos*. Chillán, CL: Universidad de Concepción. Recuperado de <https://n9.cl/eflni>

Artículo II: Análisis espacial del crecimiento de plantaciones de teca (*Tectona grandis* L. f.) clonal en suelos fuertemente meteorizados en Pocosal, Alajuela, Costa Rica.

Spatial analysis of the growth of clonal teak (*Tectona grandis* L. f.) plantations on advance weathering soils at Pocosal, Alajuela, Costa Rica.

Isaac Mesén-Montano

Resumen

[Introducción]: Emplear herramientas que permiten conocer espacialmente el área y la distribución del crecimiento del cultivo forestal podría ayudar a tomar decisiones más asertivas, en torno al manejo y la cosecha de las plantaciones, como, monitorear la evolución del crecimiento de los árboles conforme van madurando. Lo anterior, permite identificar diferencias en el crecimiento y hacer evaluaciones con un mayor grado de exactitud de las zonas que requieren un tratamiento especial, lograr que los árboles alcancen un crecimiento adecuado y rentable y, al mismo tiempo, ayudar a estimar con un mayor grado de exactitud las cantidades necesarias de los insumos para alcanzar dicho objetivo. **[Objetivos]:** Analizar espacialmente el crecimiento de la teca sobre suelos fuertemente meteorizados. **[Materiales y métodos]:** Se instalaron 146 parcelas de 500 m², en un área de 227,1 ha con cultivo de teca de 9,2 años de edad. Cada una fue georreferenciada y se midió la altura total y el diámetro a la altura del pecho (DAP). Con base en las variables medidas, se determinó la altura dominante de cada una de las parcelas y, posterior a ello, se realizó interpolaciones mediante el programa Arc Map 10.8, empleando los métodos IDW y Kriging Ordinario. Finalmente, los resultados fueron validados con base en 27 parcelas temporales independientes del conjunto de datos utilizados para la interpolación. **[Resultados]:** El análisis espacial del crecimiento permitió determinar que el índice de sitio promedio ponderado fue de 24,7. Se encontró que 0,1; 12,4; 51,0; 36,1 y 0,4 % del área estudiada corresponde a los índices de sitio 18, 21, 24, 27 y 30 respectivamente. De acuerdo con la validación de los procedimientos, los valores predichos de la altura dominante se desvían un 10 % de los muestreados con cualquiera de los dos interpoladores, siendo este un error bastante aceptable. **[Conclusiones]:** El análisis espacial de la teca creciendo sobre suelos rojos fuertemente meteorizados presenta un crecimiento ligeramente superior a la media. Se pueden emplear los interpoladores Kriging Ordinario e IDW para generar mapas de distribución del crecimiento de la teca en este tipo de suelos y obtener resultados estadísticamente similares.

Palabras clave: interpolación, kriging, IDW.

Abstract

Using tools that allow spatial knowledge of the area and distribution of plantation tree growth could help to make more assertive decisions regarding the management and harvest, such as monitoring the evolution of tree to attain greater growth age. This allow to identify differences in growth and make evaluations more accurate of the areas that require special treatment to be able to make the trees reach adequate and profitable growth, helping to estimate with a greater degree of accuracy the quantities of inputs required to achieve that objective. To spatially analyze the growth of teak on heavily weathered soils. 146 plots of 500 m² were installed, in an area of 227.1 ha with 9.2-year-old teak cultivation, each of which

was georeferenced and the total height and diameter at breast height (DBH) of the trees were measured. Based on the measured variables, the dominant height of each of the plots was determined and after interpolations were carried out using the Arc Map 10.8 program using the IDW and Ordinary Kriging methods. Subsequently, the results were validated based on 27 independent temporal plots of the data set used for interpolation. The spatial analysis of the growth allowed determining that the weighted average site index was 24.7. It was found that 0.1; 12.4; 51.0; 36.1 and 0.4 % of the studied area correspond to site indexes 18, 21, 24, 27 and 30 respectively. According to the validation of the procedures, the predicted values of the dominant height deviate 10 % from those sampled, with either of the two interpolators, which is a fairly acceptable error. The spatial analysis of teak growing on strongly weathered red soils shows a growth slightly above the average. Ordinary Kriging and IDW interpolators can be used to generate distribution maps of teak growth in this type of soils and obtain statistically similar results.

Keywords: interpolation, kriging, IDW.

1. Introducción

El crecimiento de la teca en plantaciones forestales, según diferentes autores (Sarlin, 1957; Hernández, Torres, Márquez y Franco, 1993; Vásquez y Ugalde, 1996; Vallejos, 1996; Montero, 1999; Oliveira, 2003; Alvarado y Fallas, 2004; Mollinedo, Ugalde, Alvarado, Verjans y Rudy, 2005; Thiele, 2008; Vaides-López, Alvarado-Hernández y Moya-Fernández, 2019) está positiva o negativamente influenciado por factores edáficos, topográficos, climáticos, entre otros, provocando que su distribución espacial no sea tan homogénea como se desearía.

En continuidad, la clasificación del área y del crecimiento de las plantaciones forestales se hace a partir de parcelas permanentes de medición (PPM) o temporales (PTM) de forma cuadrada, rectangular o circular de tamaño preestablecido, dentro de las cuales se colecta información que puede ser extrapolada a una unidad mayor. En el caso de plantaciones forestales, se obtienen valores de diferentes variables, pero con mayor frecuencia de altura total y diámetro a la altura del pecho (DAP) de los árboles, con las cuales se estima su altura dominante, equivalente al promedio de las alturas de los 100 árboles más altos y más gruesos por hectárea. Aunque la información recabada permite tomar gran cantidad de decisiones, es posible potencializarla, máxime sabiendo que establecer cada una de ellas demanda mucho tiempo y que este se traduce como un costo monetario para las empresas o propietarios de plantaciones. Existen herramientas que han sido desarrolladas en otros campos y que pueden ser útiles en el área forestal que permiten ayudar a tomar decisiones ligadas con el manejo (p. ej. fertilización, raleos...), con el aprovechamiento (p. ej. planificación de la corta por tipo de producto o nicho de mercado) e, inclusive, con la toma de decisiones posaprovechamiento (p. ej. evitar zonas para determinada especie o planificar la incorporación de especies adicionales).

Los sistemas de información geográfica (SIG) son una herramienta que sirve para captar, almacenar, recuperar, transformar, mostrar y analizar diversos tipos de datos distribuidos espacialmente (Moral, 2004; Burrough y McDonnell, 1998). Estos permiten aplicar técnicas o métodos que ayudan a determinar la distribución espacial de una variable o un conjunto de ellas, así como la dirección a la que se encuentran distribuidos sus valores inferiores, medios o superiores, permitiendo graficar o mapear la continuidad o el comportamiento de esta sobre

una superficie o área de interés. En la naturaleza, la distribución continua de las variables suele cumplirse, los valores más cercanos tienden a ser más similares entre sí que los que se encuentran a mayor distancia, bajo dicho principio trabajan las técnicas de interpolación.

La interpolación, según Cely et al. (2002) y Chirinos y Mallqui (2016), está dividida en métodos geoestadísticos y determinísticos. Por un lado, la interpolación geoestadística, como lo indica su nombre, realiza su cálculo por medio de la estadística; por otro lado, la interpolación determinística o simple emplea técnicas que no la consideran y usan fórmulas matemáticas prediseñadas (Chirinos y Mallqui, 2016). Existen diferentes métodos de interpolación, dentro de los cuales, Kriging y Ponderador Inverso de la Distancia o *IDW* se encuentran entre los más usados en estudios de análisis espacial (Chirinos y Mallqui, 2016). Ambos, asumen que las predicciones son una combinación lineal de datos y calculan el valor de un punto no muestral mediante la ecuación 1 (Gotway, Ferguson, Hergert y Peterson, 1996; Schloeder, Zimmerman y Jacobs, 2001; Villatoro, Henríquez y Sancho, 2008).

$$\hat{z}(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i * z(s_i) \quad (1)$$

Donde, $\hat{z}(s_0)$ = valor estimado en el punto interpolado S_0 ; n = número de observaciones vecinas usadas para la estimación; $z(s_i)$ = valor observado, y λ_i = peso dado al valor observado $z(s_i)$ en las cercanías del valor s_0 . Este último diferencia al Kriging del *IDW* (Villatoro et al., 2008; Gotway et al., 1996; Murillo, Ortega, Carrillo, Pardo y Rendón, 2012).

El Kriging, de acuerdo con Chirinos y Mallqui (2016), asume que la distancia entre puntos de muestreo refleja una correlación espacial que se puede utilizar para explicar las variaciones de sus valores en una superficie. Este método posee varios tipos o variantes y el más utilizado, según Moral (2004) y Childs (2004), es el ordinario, el cual se caracteriza por considerar que se producen fluctuaciones locales de la media.

El Kriging Ordinario calcula el peso dado a cada valor observado (λ_i) por medio de la ecuación 2.

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma[d(S_i, S_j)] + m = \gamma[d(S_0, S_i)] \quad (2)$$

Donde, n = número de observaciones; m = multiplicador Lagrange usado para la minimización de las varianzas; λ = peso dado a cada una de las observaciones, y la suma de todo los λ es igual a uno (Schloeder et al., 2001; Villatoro et al., 2008).

El *IDW* calcula el peso dado a cada valor observado λ por medio de la ecuación 3.

$$\lambda_i = \frac{1/d_i^P}{\sum_{i=1}^n 1/d_i^P} \quad (3)$$

Donde, d_i = la distancia entre el punto de predicción (S_0) y el lugar muestral (S_i); P = parámetro de reducción de peso, y n = número de puntos muestrales usados para la estimación (Li y Heap, 2008; Murillo et al., 2012).

Para llevar a cabo el análisis espacial de una variable utilizando la interpolación estadística, es necesario seguir una serie de pasos, los cuales ayudan a entender su comportamiento y, con ello, definir el proceso que mejor se adapte a los valores de esta. Asimismo, los resultados pueden presentar diferencias y estar muy ligadas con el distanciamiento que se emplea para la toma de datos, ya que la calidad de la información con respecto a un área no va a ser la misma si se recaba en un muestreo cada 5 metros a si se hace cada 100 (Gallardo y Maestre, 2008), entre los pasos a seguir se tienen:

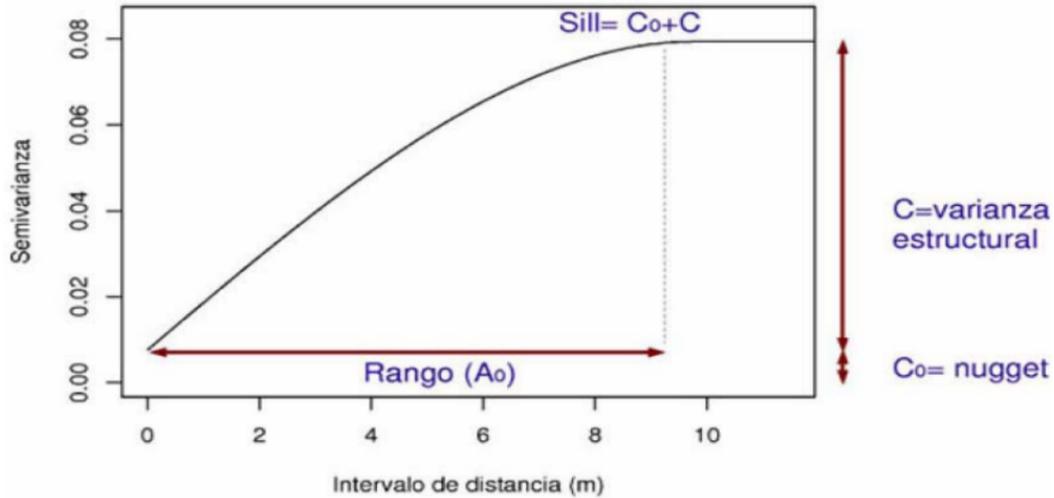
Análisis exploratorio de los datos: el objetivo de este proceso es detectar datos anómalos, los cuales se pueden originar en la toma de datos del muestreo o en la tabulación de estos y pueden influir negativamente en el proceso de interpolación. El proceso empieza por ordenar los datos y examinar valores extremos; de haberlos, se debe establecer su autenticidad. Otra forma es verificando que los datos cercanos entre sí presenten valores similares, así como que no presenten coordenadas que tiendan a salirse de donde se encuentra la mayor concentración de datos (Gallardo y Maestre, 2008). Otra de las razones por las cuales se hace este análisis es para saber si los datos de la variable siguen una distribución normal, esto se debe a que la estimación de valores, mediante técnicas geoestadísticas, funciona mejor si estos se distribuyen de una forma gaussiana o normal, para lo anterior se requiere hacer un análisis estadístico de los valores, el cual inicia por una tabla de frecuencia o su representación gráfica por medio de un histograma, y adicionalmente por un gráfico de probabilidad (Q-Q plot), donde, en el primero, los datos deberían estar distribuidos en forma de campana, concentrándose los valores en las clases centrales, y, para el segundo, las frecuencias acumuladas seguirían una línea recta ascendente (Gallardo y Maestre, 2008).

Análisis univariante: “la función básica que describe la variabilidad espacial de un fenómeno de interés se conoce como semivariograma empírico” (Gallardo y Maestre, 2008). Este permite conocer cómo varían los valores de los puntos o muestras obtenidas, conforme se alejan unas de otras. El semivariograma empírico analiza la diferencia entre los valores de los puntos de muestreo, donde, primeramente, se resta la diferencia entre cada uno de los puntos; luego se analiza hasta qué distancia dicha diferencia se hace constante. Este proceso es desarrollado mediante la ecuación 4.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{z(x_i) - z(x_i + h)\}^2 \quad (4)$$

Donde, $\gamma(h)$ = semivarianza de las muestras ubicadas dentro del intervalo de distancia h y $z(x_i)$; $z(x_i + h)$ = valores de las variables observados en los puntos x_i y $x_i + h$ respectivamente; h = separación entre puntos de muestreo, y $N(h)$ = número total de pares de muestras separadas por un intervalo de distancia h (Gallardo y Maestre, 2008).

El **semivariograma** se compone de diferentes partes y se muestran en la Figura 1, en donde C_0 es el efecto pepita, definiendo teóricamente al semivariograma como nulo en el origen, no obstante, en la práctica, normalmente, el semivariograma tiene valores distintos a cero, C es la varianza estructural, $C_0 + C$ es la meseta, definida como la máxima semivarianza entre pares de puntos y A_0 o también a es el rango en el que el semivariograma deja de aumentar o alcanza la meseta.



Tomado de Gallardo y Maestre (2008).

Figura 1. Semivariograma y sus componentes.

Figure 1. Semivariogram and its components.

El semivariograma muestra el comportamiento de la variable estudiada, no obstante, es necesario ajustar un modelo teórico, con el cual se realiza la interpolación. Los modelos comúnmente más utilizados son el esférico, el exponencial, el gaussiano y el lineal (Gallardo y Maestre, 2008). Los anteriores emplean las ecuaciones 5, 6, 7 y 8.

Modelo esférico:

$$\gamma(h) = C_0 + C \left\{ \frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right\} \text{ para } 0 < h \leq a$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \quad \text{para } h > a \quad (5)$$

Modelo exponencial:

$$\gamma(h) = C_0 + C \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right\} \quad (6)$$

Modelo gaussiano:

$$\gamma(h) = C_0 + C \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{h^2}{a^2}\right) \right\} \quad (7)$$

Modelo lineal:

$$\gamma(h) = C_0 + bh \quad (8)$$

Donde, $\gamma(h)$ = semivarianza teórico del intervalo de distancia h ; C_0 = efecto pepita del semivariograma empírico; C = varianza estructural del semivariograma empírico; h = intervalo de distancia a la que se determina $\gamma(h)$; a = rango del semivariograma empírico, y b = pendiente de la recta.

Como se puede notar en todo lo mencionado, analizar espacialmente una variable, dependiendo del método de interpolación empleado, puede demandar el conocimiento de una serie de aspectos. Es por ello que el objetivo de este trabajo es comparar dos métodos de interpolación y mostrar si estos permiten analizar espacialmente la variable altura dominante y además identificar diferencias o similitudes entre sus resultados las cuales permitan tomar la decisión de cuál es mejor.

2. Metodología

El estudio se realizó en la provincia de Alajuela, cantón San Carlos, distrito Pocosol, en la localidad llamada El Concho, la finca se encuentra localizada entre los $10,820^\circ$ y $10,873^\circ$ latitud norte y los $-84,467^\circ$ y $-84,389^\circ$ longitud oeste. Se trata de plantaciones clonales de teca de 9,2 años, ubicadas sobre suelos rojos y arcillosos de meteorización avanzada. Estos presentan, en el área estudiada, una baja fertilidad natural ($CICE \leq 2,57 \text{ cmol}(+)*l^{-1}$), condiciones de pH entre 5,5 y 6,0, una saturación de acidez $> 3 \%$ y condiciones de saturación de calcio $< 68 \%$. En la Figura 2, se muestra cómo están conformadas las fincas donde se encuentra las áreas de estudio; en la misma se puede apreciar que cerca del 52 % es área útil, y el 17,7 % del área total cuenta con plantaciones de teca. Estas fueron establecidas bajo un sistema que involucra preparación de los suelos (subsulado, rastrea y encamado) previo al establecimiento, corrección de la acidez, fertilización de los árboles, un control de malezas adecuado, podas anuales y raleos en función del crecimiento. Además, es importante destacar, que el material genético empleado, para el establecimiento de las áreas, corresponde, a la primera etapa de selección de un conjunto de clones.

Se trabajó con 146 parcelas permanentes de 500 m^2 , en un área de 227,1 ha, en estas se midió la altura total de los árboles, se tabuló la información en hojas de cálculo del programa Microsoft Excel, se determinó la altura dominante y se clasificó con base a las curvas de crecimiento desarrolladas para la especie en la Vertiente del Pacífico de Costa Rica (Mora y Meza, 2003). Además, para cada una de ellas, se obtuvo las coordenadas planas en CRTM05 con un receptor SPG (sistema de posicionamiento global), del mismo modo, se realizó un levantamiento de los lotes establecidos con la especie teca, dicha información se recabó por medio de recorridos (*tracks*) en campo, posterior a su colecta, todos los recorridos fueron descargados por medio del programa DNR GPS de GARMIN y transformados a una capa de polígonos mediante el programa ArcMap.

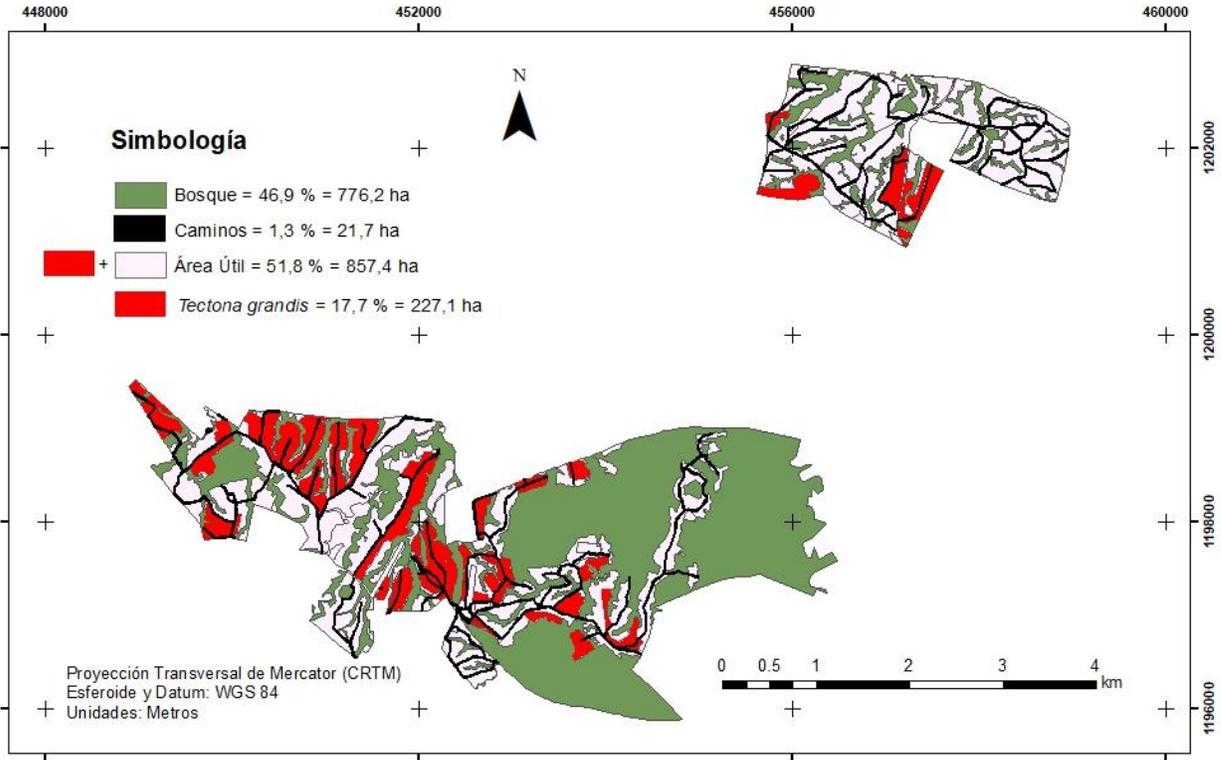


Figura 2. Mapa de uso de las fincas empleadas en el estudio.

Figure 2. Map of use of the farms used in the study.

2.1. Análisis exploratorio de los datos

Este proceso consistió en ubicar de forma espacial las PPM, para ello, se tomaron las coordenadas X y Y dispuestas en dos columnas y se procedió a realizar un gráfico de dispersión, luego, se graficó por separado las coordenadas X y Y en función de la altura dominante y la distribución de frecuencia absoluta de la altura dominante de las PPM, clasificándola primeramente en cinco clases (Cuadro 1) y seguidamente se generó un gráfico de barras. Además, se construyó otro de probabilidad cuantil-cuantil o Q-Q plot, para ello, se ordenaron los valores de altura dominante de forma ascendente, después, se enumeraron de forma consecutiva ($i = 1, \dots, n$), a partir de estos, se generó para cada uno un valor j empleando la ecuación 9, posteriormente, a cada valor j se le aplicó la función de Excel `DISTR.NORM.ESTAND.INV()`. Una vez hecho lo anterior, se tomaron estos últimos como valores del eje X y los de altura dominante como valores del eje Y y se procedió a realizar un gráfico de dispersión con línea de tendencia. Adicionalmente, se calculó, para los valores de altura dominante, los estadísticos (mínimo, máximo, media, moda, mediana, primer y tercer cuantil) y se generó un gráfico de cajas.

$$j = \frac{i - \frac{1}{2}}{n} \quad (9)$$

Donde, i = número asignado a cada valor de altura dominante y n = total de números asignados.

Cuadro 1. Valores empleados para la clasificación de la altura dominante.

Table 1. Values used for the classification of the dominant height.

IS	Clasificación de la altura dominante (m)
18	11,35-13,95
21	13,95-16,65
24	16,65-19,40
27	19,40-22,30
30	>22,30

2.2. Confección del semivariograma

2.2.1. Cálculo de la distancia entre PPM

Para la determinación de la distancia entre cada PPM, se empleó la ecuación 10, que corresponde al teorema de Pitágoras, despejando la hipotenusa (H) y calculando esta, a partir de los catetos (A y B) (Figura 3).

$$H = \sqrt{A^2 + B^2} \quad (10)$$

Se tomaron los valores de las coordenadas X de cada una de las PPM y se determinó la diferencia al cuadrado (A^2) entre cada una de ellas, por medio de una matriz (Figura 4). Esta consistió en colocar cada una de las coordenadas transpuestas (al inicio de cada columna y al inicio de cada fila), dicho proceso se repitió también para las coordenadas Y (B^2). Posteriormente, se sumó cada resultado y se le aplicó la raíz cuadrada (H) (Figura 5).

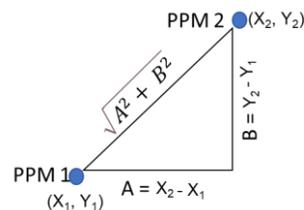


Figura 3. Determinación de la distancia entre dos PPM.

Figure 3. Determination of the distance between two PSP.

	A	B	C	D	E		A	B	C	D	E
1	X	457185	457323	457407	457492	1	Y	1201088	1201258	1201439	1201728
2	457185	0	19216.0312	49201.628	94326.3799	2	1201088	0	28740.4209	122797.681	408723.669
3	457323	19216.0312	0	6920.99206	28393.6317	3	1201258	28740.4209	0	32723.001	220697.946
4	457407	49201.628	6920.99206	0	7278.06909	4	1201439	122797.681	32723.001	0	83457.4321
5	457492	94326.3799	28393.6317	7278.06909	0	5	1201728	408723.669	220697.946	83457.4321	0

Figura 4. Matriz de cálculo de la diferencia al cuadrado de las coordenadas X y Y en Microsoft Excel.

Figure 4. Calculation matrix of the squared difference of the X and Y coordinates in Microsoft Excel.

	A	B	C	D	E
1	Distancia				
2		Columna1	Columna2	Columna3	Columna4
3		0	218.989616	414.727994	709.260213
4		218.989616	0	199.107994	499.090751
5		414.727994	199.107994	0	301.223341
6		709.260213	499.090751	301.223341	0

Figura 5. Determinación de la distancia entre cada PPM.

Figure 5. Determination of the distance between each PSM.

2.2.2. Cálculo de la varianza entre el valor de altura dominante de cada PPM

Este proceso se realizó mediante la matriz mostrada en la Figura 6 y sigue el mismo principio de la determinación de las diferencias al cuadrado de las coordenadas X y Y.

	A	B	C	D	E
1	Altura Dominante	14.34	19.90	19.94	19.85
2	14.34	0	30.9136	31.36	30.3601
3	19.9	30.9136	0	0.0016	0.0025
4	19.94	31.36	0.0016	0	0.0081
5	19.85	30.3601	0.0025	0.0081	0

Figura 6. Cálculo de la varianza de la altura dominante.

Figure 6. Calculation of the variance of the dominant height.

2.2.3. Nube de semivariograma y de categorías

Se ordenaron los datos de distancia entre PPM y los datos de varianza de la variable altura dominante calculados en los pasos anteriores en dos columnas y, posteriormente, con estos se generó un gráfico de dispersión, ubicando la distancia entre cada PPM en el eje de las X y la varianza de la altura dominante en el eje de las Y. Después, se realizó un segundo gráfico, este consistió en agrupar las alturas dominantes según la distancia de separación entre PPM, para ello se utilizó un intervalo de clases con un ancho de 259 m. Para la elaboración del

gráfico, se ordenaron los datos del primero de forma ascendente y se generó una tercera columna etiquetando cada valor con el valor central de la clase correspondiente.

2.2.4. Semivariograma empírico

Se tomaron los valores de altura dominante agrupados por intervalos de distancia de 259 m y se calculó el promedio de los valores de cada clase; posterior a ello, fueron graficados en función de la mitad de cada clase de distancia. Luego, se procedió a estimar sus componentes y a ajustar los cuatro modelos de semivariograma teóricos (exponencial, esférico, gaussiano y lineal).

2.3. Interpolación

Para la interpolación, se empleó el programa Arc Map 10.8 y las herramientas Kriging e IDW contenidas en la carpeta Interpolación de las Herramientas de Análisis Espacial de la Caja de Herramientas del programa ya mencionado. En el caso de Kriging, se escogió el método Ordinario y el Modelo de Semivariograma Lineal, además, se usaron los valores calculados en el ajuste del semivariograma para completar la pestaña de Parámetros Avanzados. En el caso de IDW, se empleó un radio de búsqueda de 259 m y tres puntos.

Para ambos interpoladores, se empleó un tamaño de celda de cinco y, además, una capa máscara correspondiente a los lotes establecidos con la especie teca.

2.4. Cálculo del área por índice de sitio

En el programa Arc Map se realizó una reclasificación, con base en el Cuadro 1, de las capas raster de altura dominante generadas mediante los dos métodos de interpolación. Lo anterior se realizó por medio de la herramienta Reclasificar contenida en la carpeta Herramientas de Análisis Espacial de la Caja de Herramientas de Arc Map. Se transformaron a polígono las capas rasters reclasificadas, esto por medio de la herramienta De Raster a Polígono contenida en la carpeta De Raster de la carpeta Herramientas de Conversión de la Caja de Herramientas de Arc Map y se realizó el cálculo del área de cada polígono, así como la sumatoria por índice de sitio.

2.5. Prueba de validación de la estimación de los modelos

Luego de haber efectuado las interpolaciones, se procedió a comparar los valores estimados con base en datos muestreados de 27 PTM independientes del conjunto utilizado para la interpolación, para ello, usando la herramienta “Extraer Valores a Puntos” contenida dentro de la carpeta Extracción de la carpeta Herramientas de Análisis Espacial de la Caja de Herramientas de Arc Map, se procedió a extraer por medio de la capa de puntos de las 27 PTM, los valores estimados, en cada uno de ellos, en las capas rasters generadas por los dos interpoladores.

Con lo descrito en el párrafo anterior, se procedió a hacer un análisis de error entre los valores medidos y los valores estimados por ambos interpoladores. Para ello, se calculó la media absoluta del error (MAE), la media absoluta del porcentaje del error (MAPE), la media de las diferencias (MD) y el rango de los valores de las diferencias.

3. Resultados

3.1. Análisis exploratorio de los datos

3.1.1. Detección de errores

Los datos de la variable altura dominante se muestran (Figura 7) distribuidos de forma normal, se presenta una agrupación de puntos fuera de donde está la mayor concentración, sin embargo, estos son correctos.

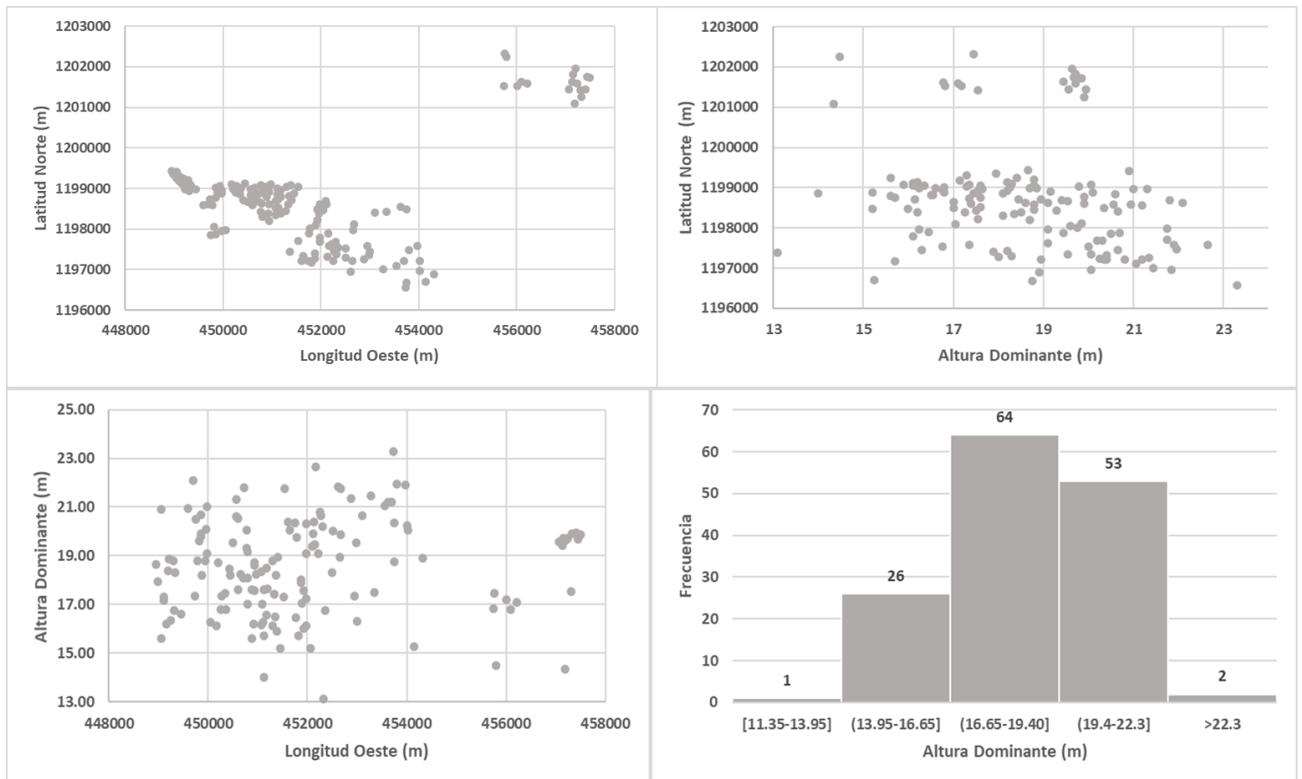


Figura 7. Análisis gráfico de la distribución espacial y frecuencia absoluta de la variable altura dominante.

Figure 7. Graphic analysis of the spatial distribution and absolute frequency of the dominant height variable.

3.1.2. Representación de probabilidad

Se puede notar (Figura 8) que los datos tienden a seguir una distribución gaussiana o normal, presentando un leve desplazamiento de los valores en el extremo superior de la línea de tendencia.



Figura 8. Gráfico de probabilidad cuantil-cuantil de los valores de altura dominante.

Figure 8. Quantile-quantile probability plot of the dominant height values.

3.1.3. Resumen estadístico

En el cuadro Cuadro 2 y en la Figura 9, se muestra que la mediana y la media presentan valores muy cercanos, característica que se presenta cuando los datos de una variable tienden hacia una distribución normal. Además, se puede inferir que los valores de la variable altura dominante, según el coeficiente de variación, son homogéneos ($CV < 80\%$).

Cuadro 2. Estadísticos de la variable altura dominante.

Table 2. Statistics of the dominant height variable.

Estadístico	Valor	Estadístico	Valor
N	146	Rango	10,20
Media aritmética (μ)	18,54	Varianza	3,87
Moda	18,80	s	1,97
Mínimo	13,10	EE	0,16
Máximo	23,30	CV (%)	10,61
Q1	17,11	Asimetría	-0,10
Mediana (M)	18,63	Curtosis	-0,44
Q3	19,99		

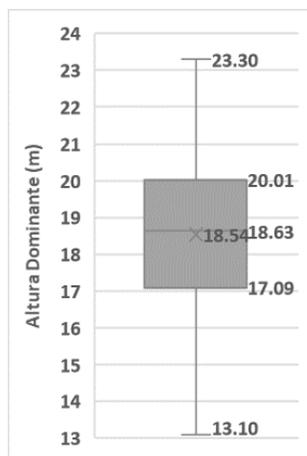


Figura 9. Representación de los estadísticos.

Figure 9. Representation of statistics.

3.1.4. Análisis univariante

En la Figura 10, se puede notar que algunos datos están un poco alejados de donde se concentra la mayor parte de puntos, o podría sugerir que estos podrían estar influyendo al obtener la media por intervalos de distancia.

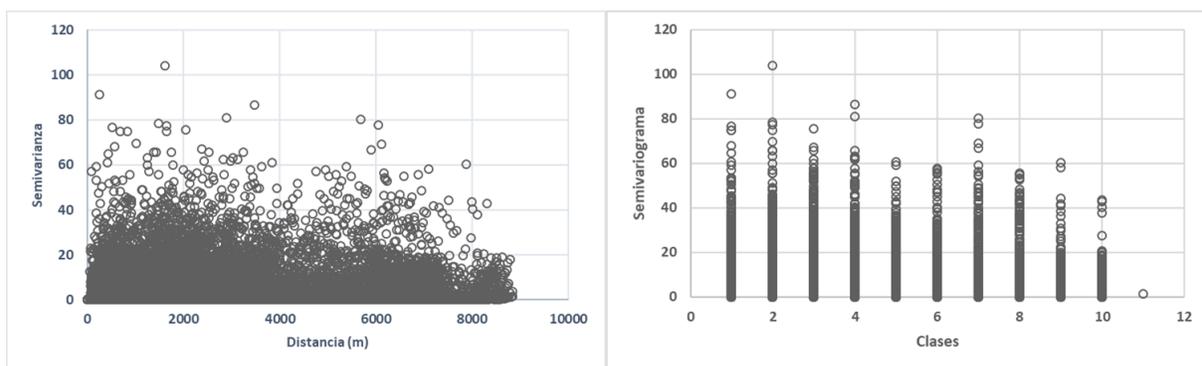


Figura 10. Distribución de las semivarianzas de la altura dominante y agrupamiento por clases de distancia de separación.

Figure 10. Distribution of the semi-variances of the dominant height and grouping by separation distance classes.

3.1.5. Semivariograma empírico y ajuste de modelos

En la Figura 11, se puede observar los cuatro modelos de semivariogramas teóricos empleados para el ajuste de la semivarianza de la altura dominante, siendo el modelo lineal el que más se ajusta a ella.

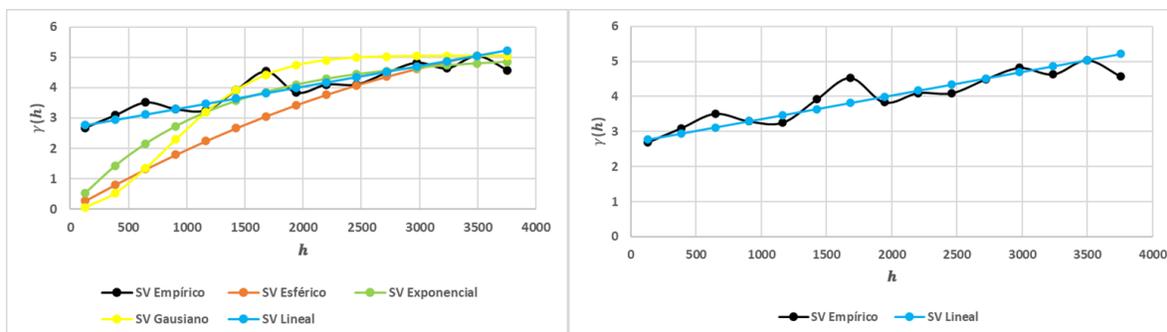


Figura 11. Modelos de semivariograma utilizados para el ajuste de la semivarianza de la variable altura dominante y modelo de mayor ajuste.

Figure 11. Semivariogram models used to adjust the semi-variance of the dominant height variable and the best fit model.

En el Cuadro 3, se muestran los valores obtenidos en el ajuste del semivariograma empírico, en la cual se puede observar que el rango (A_0), en donde la semivarianza tiende a estabilizarse, alcanza los 3 496 m de distancia, lo cual se aproxima a la mitad de la máxima distancia entre puntos, que es de 4 422 m. El efecto pepita (C_0) y la meseta (C_0+C) se ubican a una semivarianza de 2,68 y 5,04, respectivamente.

Cuadro 3. Parámetros del semivariograma seleccionado para la interpolación de la altura dominante por medio del interpolador Kriging.

Table 3. Parameters of the selected semivariogram for the interpolation of the dominant height through the Kriging interpolator.

Modelo	Linear
Efecto Pepita (C_0)	2,68
Meseta (C_0+C)	5,04
Variable Estructural (C)	2,36
Rango (A_0)	3 496
Intervalo de distancia	259

3.1.6. Interpolación

Los errores de estimación de la altura dominante, en la ubicación de los datos medidos, a simple vista, muestran en el Cuadro 4, valores muy diferentes entre métodos de interpolación. El interpolador IDW, como sería de esperarse, no muestra error sobre los puntos empleados para la estimación ($MAE = 0$, $MAPE = 0$ y $MD = 0$). Comportamiento contrario presenta el interpolador Kriging Ordinario ($MAE = 0,89$, $MAPE = 5,0$ y $MD = 0,032$). Al analizar los valores de porcentaje de área para cada índice de sitio, se puede apreciar que el interpolador Kriging Ordinario presenta valores únicamente de los índices de sitio 21, 24 y 27. Situación contraria sucede con el interpolador IDW, al mostrar porcentaje de área en todos los índices de sitio analizados (18, 21, 24, 27 y 30). Adicionalmente se puede observar que el análisis espacial de ambos métodos ubica el índice de sitio medio ponderado ligeramente arriba del crecimiento intermedio de la especie.

Cuadro 4. Características de estimación de los interpoladores Kriging Ordinario e IDW para los valores de altura dominante empleados en las interpolaciones.

Table 4. Estimation characteristics of the Kriging Ordinary and IDW interpolators for the dominant height values used in the interpolations.

Descripción	KO	IDW	IS	Área KO (%)	IS Medio Ponderado	Área IDW (%)	IS Medio Ponderado
Modelo	Linear	-	18	-		0,1	
MAE	0,89	0	21	7,9		12,4	
MAPE	5,0	0	24	57,2	24,8	51,0	24,7
Rango del error	-3,57	0	27	34,9		36,1	
	3,67	0	30	-		0,4	
MD	0,032						

MAE = media absoluta del error, MAPE = media absoluta del porcentaje de error, MD = media de las diferencias, IS = índice de sitio, KO = kriging ordinario.

Como se muestra en el Cuadro 5, al hacer la validación con los 27 puntos independientes del conjunto utilizado para el desarrollo de las interpolaciones, el IDW presentan valores de MAE, MAPE y MD ligeramente mayores (0,03, 0,01 y 0,08, respectivamente) a los obtenidos con el Kriging Ordinario.

Cuadro 5. Validación de la estimación espacial de los métodos Kriging Ordinario e IDW.

Table 5. Validation of the spatial estimation of the Ordinary Kriging and IDW methods.

Descripción	KO	IDW
Modelo	Linear	-
MAE	1,70	1,73
MAPE	10,0	10,1
Rango del error	-4,42 – 2,40	-4,42 – 1,94
MD	-1,22	-1,30

MAE = media absoluta del error, MAPE = media absoluta del porcentaje de error, MD = media de las diferencias.

En las Figuras 12 y 13, se puede notar hacia la parte central del margen inferior, que, aunque son los mismos lugares o lotes interpolados, estos presentan áreas de un solo color (Kriging Ordinario) o una combinación de ellos (IDW). Adicionalmente, se pueden observar los índice de sitio y sus respectivas áreas, de acuerdo a cada interpolador, teniendo como resultado que, a partir del Kriging Ordinario se logra identificar los índices de sitio 21, 24 y 27 y estos con un área de 17,9, 129,6 y 79,2 ha, respectivamente. Por su parte, con el interpolador IDW se logra identificar los índices de sitio 18, 21, 24, 27 y 30 y estos con un área de 0,2, 27,0, 110,8, 78,5 y 0,9 ha, respectivamente. Asimismo, se puede notar que hay similitud entre las interpolaciones, ya que ambas estiman que el mayor área le corresponde al índice de sitio 24 y la segunda mayor área al índice de sitio 27. No obstante, en el caso del índice de sitio 24,

se puede apreciar una diferencia de 18,8 ha entre las dos áreas calculadas (Kriging Ordinario = 129,6 ha e IDW = 110,8 ha), sin embargo, en el índice de sitio 27, dicha diferencia es de solamente 1,2 ha y en el caso del índice de sitio 21 el IDW asigna 9,1 ha más.

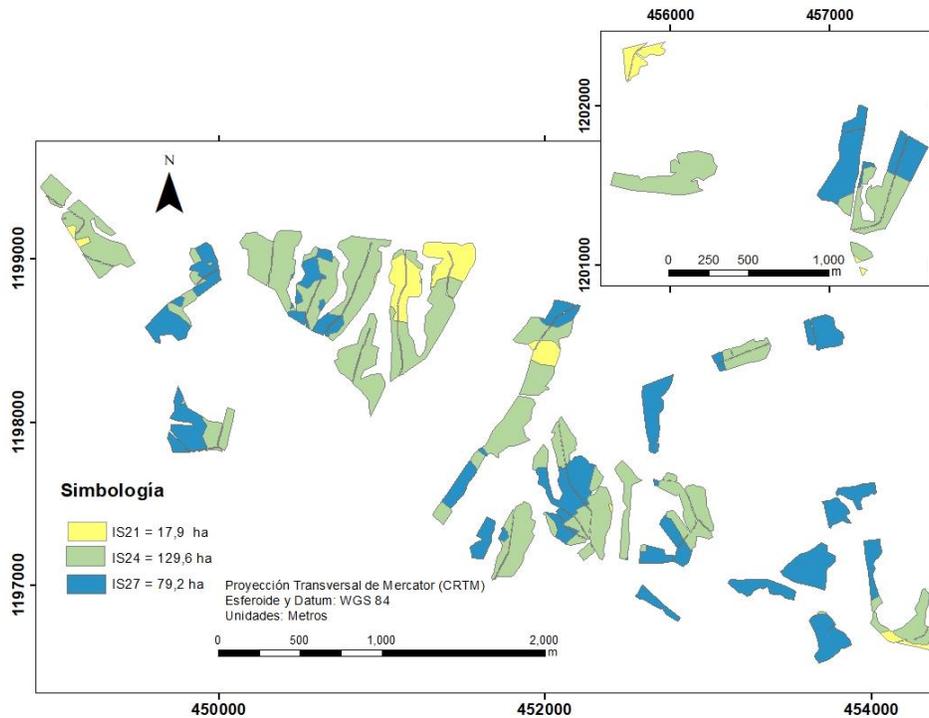


Figura 12. Interpolación de la altura dominante por el método Kriging Ordinario empleando el modelo lineal y clasificación según el índice de sitio.

Figure 12. Interpolation of the dominant height by the Ordinary Kriging method using the linear model and classification according to the site index.

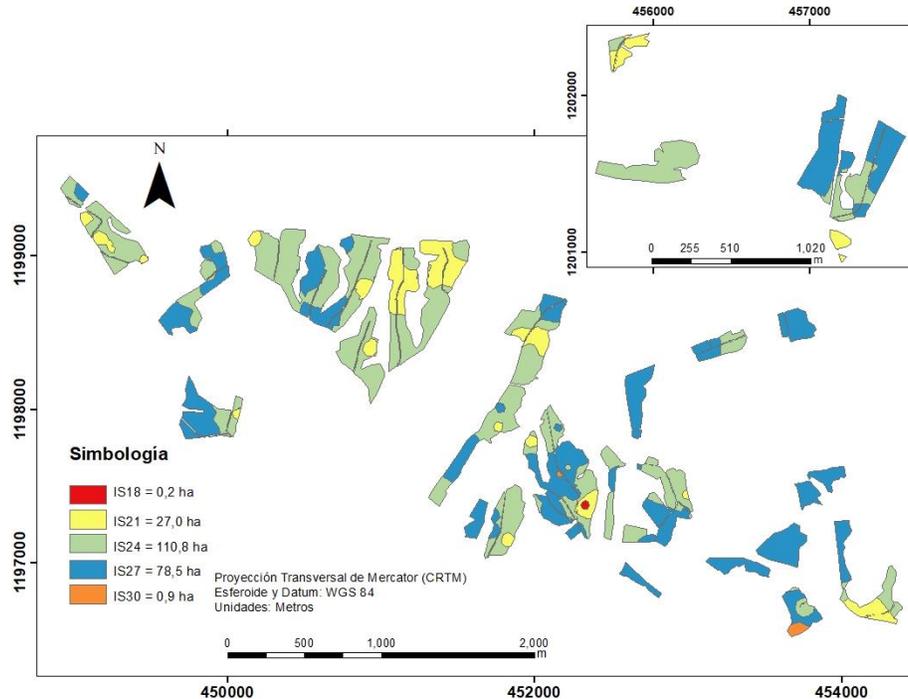


Figura 13. Interpolación de la altura dominante por el método IDW y clasificación según el índice de sitio.

Figure 13. Interpolation of the dominant height by the IDW method and classification according to the site index.

4. Discusión

El análisis espacial producto de la interpolación con el método Kriging Ordinario presentó una media absoluta del error (MAE) de los valores estimados de 0,89 m, al compararlos con los valores reales de altura dominante empleados para la estimación, donde, si se analiza por medio de la MAPE, indica que el Kriging Ordinario tendió a errar en un 5 %. Así mismo, las diferencias entre valores medidos y estimados mostraron un rango desde -3,57 m y hasta 3,67 m; es decir, indicando que el análisis espacial con este interpolador tiende a subestimar y sobreestimar la variable bajo estudio, presentando un 46,2, 49,0 y 4,8 % de valores sobreestimados, subestimados y exactos. El IDW, por su parte, no presentó error alguno. Lo anterior sugiere, que el análisis espacial realizado con el interpolador IDW es exacto en los puntos de muestreo utilizados, caso contrario el del interpolador Kriging Ordinario.

La validación del análisis espacial efectuado mediante los dos interpoladores, con base en las 27 PTM independientes, mostró que el Kriging Ordinario determinó la distribución de la altura dominante con una media absoluta del error (MAE) de 1,70 m; asimismo, registró un rango de las diferencias entre valores medidos y estimados, desde -4,42 m y hasta los 2,40 m, indicando que este interpolador subestima y sobreestima, tendiendo mayormente a sobreestimar, puesto que el 77,8 % de los datos estimados presentaron dicha característica. Por su parte, el interpolador IDW determinó la distribución de la variable a un valor de la media absoluta de error (MAE) de 1,73 m, con un rango de diferencias entre valores medidos y estimados, desde -4,42 m y hasta 1,94 m, lo que indica que este al igual que el Kriging

Ordinario, tiende a subestimar y sobreestimar, donde la sobreestimación tiende a predominar, y esta con un porcentaje de datos mayor que al Kriging Ordinario, con un 85,2 % de los valores estimados con dicha característica. De forma general, tomando en cuenta el valor de la media absoluta del porcentaje del error (MAPE), el análisis espacial con ambos métodos, tiende a desviarse en un 10 % del valor real de la altura dominante, lo cual, no es un valor muy alto de error, donde pese a que el Kriging Ordinario elimina las clases extremas, ambos métodos permiten hacer un análisis espacial bastante acertado de la distribución del crecimiento de teca en la zona de estudio y que sería de esperar que valores cercanos a este se den en análisis de crecimiento en fincas cercanas.

5. Conclusiones

El modelo lineal es el que mejor se ajusta a la semivarianza de la variable altura dominante en el área estudiada.

El Kriging Ordinario genera una continuidad espacial un poco arbitraria, mientras que el IDW respeta los valores empleados para la interpolación, lo que permite graficar al menos un pequeño porcentaje de cada crecimiento.

El Kriging Ordinario registró en promedio un 5 % del error sobre el valor real de altura dominante en los puntos utilizados para la interpolación.

Ambos interpoladores, en las áreas fuera de los puntos utilizados para la interpolación, al realizar la validación de los modelos con las 27 parcelas adicionales, tienden a sobreestimar el valor real de la altura dominante y registran en promedio un 10 % del error sobre el valor real de esta variable.

Ambos interpoladores, permiten hacer un análisis espacial del crecimiento de teca bastante acertado de la distribución del crecimiento de la variable altura dominante.

El análisis espacial del crecimiento de teca con los métodos Kriging Ordinario e IDW es bastante confiable (MAPE de 10 %) y permite clasificar con valores muy semejantes (IS medio ponderado a los 16 años de 24,8 m y 24,7 m, respectivamente) el crecimiento en altura dominante de las plantaciones estudiadas sobre suelos rojos fuertemente meteorizados, ubicando dicho crecimiento ligeramente arriba del intermedio (> 24 m). Dicho valor es de tomar en consideración, dado que el mismo fue alcanzado bajo un sistema de plantación intensivo, con lo que se puede inferir, que establecer plantaciones de teca en el sitio de estudio o zonas aledañas bajo un sistema deficiente en el manejo del suelo, de la masa forestal y sumado un material genético con características de mejora baja, no permitiría alcanzar una producción rentable, en el escenario descrito, es de esperarse un crecimiento medio ponderado bajo (< 24 m en altura dominante a los 16 años de edad) y difícilmente rentable para la producción de madera de alto valor.

La interpolación por el método IDW, puede ser una muy buena herramienta para análisis exploratorios previo al establecimiento de PPM en plantaciones forestales de teca o para la estimación de áreas con un grado mayor de detalle espacial, permitiendo al técnico forestal designar una mayor intensidad de muestreo a determinadas zonas, con la cual, podría tomar decisiones más precisas y eficaces al momento de aplicar enmiendas, fertilizantes o, incluso, ayudar a priorizar áreas que demanden más tempranamente, debido a su rápido crecimiento, podas, raleos, entre otros.

6. Referencias

- Alvarado, A. y Fallas, J. L. (2004). La saturación de acidez y el encalado sobre el crecimiento de la teca (*Tectona grandis* L. f.) en suelos ácidos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 28(1), 81-87. Recuperado de <https://n9.cl/6eho2>
- Burrough, P. A. y McDonnell, R. A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. New York, US: Oxford Univ. Recuperado de <https://n9.cl/ekwib>
- Cely, J. W., Siabato, W. L., Sánchez, A. H. y Rangel, A. P. (2002). Geoestadística aplicada a estudios de contaminación ambiental. *Ingeniería*, 7(2), 31-38. Recuperado de <https://n9.cl/pi7bl>
- Childs, C. (2004, july-september). *Interpolating surfaces in ArcGis spatial analyst*. Recuperado de <https://n9.cl/f4nby>
- Chirinos, L. R. y Mallqui, C. G. (2016). Comparación entre interpoladores espaciales en el estudio de distribución de partículas sedimentables insolubles en la Cuenca Atmosférica de Lima y Callao. *Información Tecnológica*, 27(4), 111-120. doi:10.4067/S0718-07642016000400012
- Gallardo, A. y Maestre, F. T. (2008). Métodos geoestadísticos para el análisis de datos ecológicos espacialmente explícitos. En F. T. Maestre, A. Escudero y A. Bonet, *Introducción al análisis espacial de datos en ecología y ciencias ambientales: métodos y aplicaciones* (págs. 215-272). Madrid, ES: DYKINSON, S.L.
- Gotway, C. A., Ferguson, R. B., Hergert, G. W. y Peterson, T. A. (1996). Comparison of Kriging and Inverse Distance Methods for mapping soil parameters. *Soil Science Society of American*, 60, 1237-1247.
- Hernández, R., Torres, A., Márquez, O. y Franco, W. (1993). Contenido foliar de nutrimentos y crecimiento en plantaciones de teca en Ticoporo, Venezuela. *Turrialbana*, 43(1), 11-15. Recuperado de <https://n9.cl/ajt6>
- Li, J. y Heap, A. D. (2008). *A review of spatial interpolation methods for enviromental scientists*. Canberra, AUS: Geoscience Australia. Recuperado de <https://n9.cl/hqyzx>
- Mollinedo, M., Ugalde, L., Alvarado, A., Verjans, J. M. y Rudy, L. C. (2005). Relación suelo-árbol y factores de sitio en plantaciones jóvenes de teca (*Tectona grandis*) en la zona oeste de la cuenca del canal de Panamá. *Agronomía Costarricense*, 29(1), 67-75. Recuperado de <https://n9.cl/vxm8w>
- Montero, M. (1999). *Factores de sitio que influyen en el crecimiento de Tectona grandis L.f y Bombacopsis quinata (Jacq.) Dugand, en Costa Rica*. [Tesis de maestría, Universidad Austral de Chile]. <https://n9.cl/t353>
- Mora, F. y Meza, V. (2003). *Curvas de índice de sitio para teca (Tectona grandis Linn.) en la Vertiente del Pacífico de Costa Rica*. Heredia, CR: INISEFOR-UNA.
- Moral, F. J. (2004). Aplicaciones de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Ecosistemas*, 13(1), 78-86. Recuperado de <https://n9.cl/jqq3o>

- Murillo, D., Ortega, I., Carrillo, J. D., Pardo, A. y Rendón, J. (2012). Comparación de métodos de interpolación para la generación de mapas de ruido en entornos urbanos. *Ing. USBMed*, 3(1), 62-68. Recuperado de <https://n9.cl/c374o>
- Oliveira, J. R. (2003). *Sistema para cálculo de balanço nutricional e recomendacao de calagem e adubacao de povoamentos de teca - Nutriteca*. [Tesis de maestria, Universidad Federal de Vicosa]. <https://n9.cl/iedc4>
- Sarlin, P. (1957). *Le Teck et les sols au Togo-et Annex: Le Teck et le calcium du sol*. Division de Pédologie.
- Schloeder, C. A., Zimmerman, N. E. y Jacobs, M. J. (2001). Comparison of methods for interpolating soil properties using limited data. *Soil Science Society of American Journal*, 65, 470-479. Recuperado de <https://n9.cl/t2pn>
- Thiele, H. (2008). *Variables edáficas que afectan en crecimiento de la teca (Tectona grandis L. f.) en la vertiente del Pacífico de Costa Rica*. [Tesis de maestria, Universidad de Costa Rica].
- Vaides-López, E., Alvarado-Hernández, A. y Moya-Fernández, R. (2019). Site characteristics that determine the growth and productivity of teak (*Tectona grandis* L. f.) of young plantations in Guatemala. *Agronomía Costarricense*, 43(1), 135-148. Recuperado de <https://n9.cl/igvzr>
- Vallejos, O. S. (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 de maestria, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. <https://n9.cl/cb3q0>
- Vásquez, W. y Ugalde, L. A. (1996). *Rendimiento y calidad de sitio para Gmelina arborea, Tectona grandis, Bombacopsis quinatum y Pinus caribaea en Guanacaste, Costa Rica*. Cartago, CR: CATIE. Recuperado de <https://n9.cl/11pr>
- Villatoro, M., Henríquez, C. y Sancho, F. (2008). Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial del pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense*, 32(1), 95-105. Recuperado de <https://n9.cl/tk9wl>