

Calidad de árboles de 11 especies forestales en el Arboretum Departamental Yulûh, Siuna 2010-2025

Tree quality of 11 forest species in the Yulûh Departmental Arboretum, Siuna 2010-2025

Efraín de Jesús Peralta Tercero¹

Javier Osmar Artola García²

RESUMEN

Las plantaciones forestales representan una estrategia clave para la restauración ecológica y la producción sostenible de madera en el Caribe nicaragüense, donde la calidad de los árboles determina su potencial comercial y ecológico. Este estudio evaluó el crecimiento y calidad de 11 especies forestales nativas de alto valor establecidas entre los años 2009 y 2015 en el Arboretum Departamental Yulûh (Siuna, RACCN, Nicaragua), analizando parámetros dendrométricos y morfológicos durante los años 2010-2025. Se censaron 1,163 árboles mediante muestreo total, midiendo diámetro (base y DAP), altura total, bifurcación, inclinación, daños mecánicos, estado fitosanitario y mortalidad. Se aplicaron análisis estadísticos (ANOVA, redes neuronales) y modelado matemático para identificar patrones de crecimiento. Los resultados indican que todas las especies superaron el IMA mínimo nacional (0.5 cm/año), destacando *Calophyllum brasiliense* var. *Rekoi* (1.58 cm/año diámetro, 1.05 m/año altura), *Pithecellobium arboreum* (1.45 cm/año) y *Platymiscium pinnatum* (1.44 cm/año). El 66.25% presentó calidad excelente, aunque daños mecánicos (100% importancia normalizada), el estado fitosanitario (93.5%) y la bifurcación (88.2%) limitaron la calidad general. Los modelos polinómicos ($R^2 > 0.90$) describieron satisfactoriamente el crecimiento. Se concluye que las prácticas silviculturales aplicadas a la plantación son efectivas, pero requieren énfasis en control fitosanitario y corrección mecánica para optimizar el rendimiento. Estos resultados aportan modelos predictivos y aspectos técnicos para reforestaciones similares en el Caribe.

Palabras Clave: Calidad arbórea, crecimiento forestal, modelado dendrométrico, manejo silvicultural, Arboretum Yulûh

¹ Máster en Docencia Universitaria. Ingeniero Forestal, Especialización en gestión del riesgo y cambio climático, Profesor Titular Área del Conocimiento Agricultura, Universidad de las Regiones Autónomas de la Costa Caribe Nicaragüense (URACCAN) CUR Las Minas. Correo electrónico: efrain.peralta@uraccan.edu.ni Código ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5622-3241>

Master in University Teaching, Agroforestry Engineer. University of the Autonomous Regions of the Nicaraguan Caribbean Coast.

² Máster Universitario en Matemática Computacional, Coordinador del Área del Conocimiento Ciencias, Tecnologías e Ingenierías, Universidad de las Regiones Autónomas de la Costa Caribe Nicaragüense (URACCAN) CUR Las Minas. Correo electrónico: javier.artola@uraccan.edu.ni. Código ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7047-1914>

Master's Degree in Computational Mathematics, Coordinator of the Science, Technology, and Engineering area at the University of the Autonomous Regions of the Nicaraguan Caribbean Coast (URACCAN), CUR Las Minas.

ABSTRACT

Forest plantations are key for ecological restoration and sustainable timber production in Nicaragua's Caribbean, where tree quality determines ecological and commercial potential. This study assessed growth and quality of 11 high-value native species established 2009-2015 at Yulùh Departmental Arboretum (Siuna, RACCN, Nicaragua), evaluating dendrometric and morphological parameters from 2010-2025. A total census of 1,163 trees was conducted following Murillo & Camacho (1997) methodology, measuring diameter (ground level and DBH), total height, bifurcation, inclination, mechanical damage, phytosanitary condition, and mortality. Statistical analyses (ANOVA, neural networks) and mathematical modeling identified growth patterns. All species exceeded national minimum annual diameter increment (0.5 cm/year), with *Calophyllum brasiliense* var. *rekoi* (1.58 cm/year diameter, 1.05 m/year height), *Pithecellobium arboreum* (1.45 cm/year), and *Platymiscium pinnatum* (1.44 cm/year) performing best. 66.25% showed excellent quality, though mechanical damage (100% normalized importance), phytosanitary condition (93.5%), and bifurcation (88.2%) were limiting factors. Polynomial models ($R^2 > 0.90$) accurately described growth. It is concluded that URACCAN's silvicultural practices are effective but require enhanced phytosanitary control and mechanical damage correction. Results provide predictive models and technical guidelines for similar Caribbean reforestations.

Keywords: Tree quality, forest growth, dendrometric modeling, silvicultural management, Yulùh Arboretum

I. INTRODUCCIÓN

El establecimiento y manejo de plantaciones forestales constituye una estrategia fundamental para reducir la presión sobre los bosques naturales y promover la restauración ecológica de ecosistemas degradados en el Caribe nicaragüense. La calidad de los árboles en estas plantaciones depende de múltiples factores, entre ellos el manejo silvicultural, las condiciones edáficas y climáticas, así como las perturbaciones antrópicas y naturales (Murillo y Camacho, 1997; Imaña y Encimas, 2008).

En este contexto, la Universidad de las Regiones Autónomas de la Costa Caribe Nicaragüense (URACCAN) ha impulsado iniciativas de reforestación orientadas a la sostenibilidad ambiental y la formación profesional. Una de las más representativas es el Arboretum Departamental Yulùh, ubicado en el Laboratorio Natural Awawas del campus Las Minas. Este arboretum fue establecido en el año 2009 como parte de la Jornada Nacional de Reforestación, inicialmente con 7,000 plantas de caoba (*Swietenia macrophylla*) y 3,000 plantas de cedro real (*Cedrela odorata*). Con el paso de los años, se incorporaron otras especies nativas de alto valor ecológico, hasta alcanzar más de 25 especies forestales, convirtiéndose en un laboratorio natural de enseñanza, investigación y conservación.

Los procesos de crecimiento forestal están influenciados tanto por factores fisiológicos como por condiciones ambientales. Variables como el diámetro, la altura, la bifurcación, la inclinación, los daños mecánicos y el estado fitosanitario determinan la calidad de las plantaciones (Ochoa, 2015; Murillo y Camacho, 1997). En este sentido, la evaluación sistemática de estos parámetros es esencial para ajustar las estrategias de manejo forestal y mejorar la productividad y calidad de los árboles establecidos.

Los resultados de la presente investigación muestran que la mayoría de las especies evaluadas en el Arboretum departamental Yulùh presentan incrementos medios anuales (IMA) en diámetro superiores al mínimo establecido por las Normas Técnicas Obligatorias Nicaragüenses (0.5 cm/año), lo que refleja un desarrollo satisfactorio de las plantaciones. Las especies *Calophyllum brasiliense* var. *rekoi* (IMA diámetro = 1.58 cm/año; IMA altura = 1.05 m/año), *Pithecellobium arboreum* (IMA diámetro = 1.45 cm/año; IMA altura = 0.86 m/año) y *Platymiscium pinnatum* (IMA diámetro = 1.44 cm/año; IMA altura = 1.11 m/año) destacaron como las de mejor desempeño en crecimiento. Asimismo, especies de mayor antigüedad como *Swietenia macrophylla* y *Cedrela odorata* mostraron incrementos significativos en comparación con estudios previos realizados en el mismo sitio (Peralta Tercero, 2015).

No obstante, se evidenció que factores como los daños mecánicos (100% de importancia normalizada), el estado fitosanitario (93.5%) y la bifurcación (88.2%) influyen negativamente en la calidad de los árboles, siendo los daños mecánicos la variable más determinante. A pesar de ello, el 66.25% de los árboles evaluados se clasificaron con calidad excelente, un 10.35% en calidad aceptable y un 23.40% en calidad mala, lo que demuestra el éxito de las prácticas silviculturales implementadas por estudiantes y docentes de URACCAN en el mantenimiento y manejo del arboretum.

El impacto de los huracanes Eta e Iota en el año 2020 afectó notablemente la estructura tanto vertical como horizontal de las distintas especies, incrementando el porcentaje de árboles en calidad baja, particularmente en *Swietenia macrophylla* y *Calophyllum brasiliense* var. *rekoi*. Estos eventos ponen de manifiesto la vulnerabilidad de los sistemas forestales frente a fenómenos climáticos extremos y la necesidad de aplicar estrategias de manejo adaptativo (Lombardi *et al.*, 2014; Bruce y Schumacher, 1950).

Este estudio permite valorar la evolución de 11 especies forestales en condiciones de manejo controlado en el Arboretum departamental Yulùh, aportando información valiosa para el diseño de modelos de crecimiento y estrategias de manejo silviculturales sostenibles en el Caribe nicaragüense. Además, contribuye al fortalecimiento del aprendizaje intercultural y científico dentro de la formación profesional en ingeniería agroforestal que impulsa URACCAN, orientada al equilibrio entre la producción forestal, la conservación y el desarrollo comunitario sostenible.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Plantaciones forestales en el Caribe nicaragüense

El establecimiento de plantaciones forestales en Nicaragua se ha consolidado como alternativa estratégica para reducir la presión sobre bosques naturales y contribuir a la restauración ecológica. En el Caribe nicaragüense, URACCAN ha promovido la integración de silvicultura en procesos educativos y comunitarios, estableciendo desde el año 2009 en el Arboretum Departamental Yulùh más de 25 especies nativas y exóticas de valor ecológico/comercial, destacando *Swietenia macrophylla*, *Cedrela odorata*, *Carapa guianensis*, *Calophyllum brasiliense* var. *rekoi*. y *Pithecellobium arboreum*. Este espacio representa restauración participativa y manejo sostenible por parte de los estudiantes y docentes del área de agricultura (Peralta Tercero, 2015).

Factores que determinan el crecimiento forestal

El crecimiento (altura, diámetro, área basal, volumen) dependen de factores fisiológicos, edáficos, climáticos y manejo silvicultural. Las perturbaciones naturales como huracanes influyen significativamente (Imaña y Encinas, 2008; Bruce y Schumacher, 1950). Estudios previos en el Laboratorio Natural Awawas muestran que *S. macrophylla* es superior a *C. odorata* (IMA diámetro: 0.86 vs 0.66 cm/año a 5 años; Peralta Tercero, 2015). La Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense (NTON 18 001-12) establece explícitamente que el valor del Incremento Medio Anual (IMA) en diámetro para bosque tropical húmedo es de 0.50 cm/DAP/árbol/año, sirviendo como base para calcular la intensidad de corte y la corta anual permisible (CAP) (Comisión Nacional de Normalización Técnica y Calidad [CNTNC], 2013).

Comportamiento silvicultural de especies tropicales

Canales *et al.* (2021) identificaron diferencias significativas en Nicaragua, destacando *Hymenaea courbaril* y *S. macrophylla*. Chinchilla Mora *et al.* (2021) reportan para *S. macrophylla* en sistemas agroforestales 7.66 m altura, 7.55 cm diámetro a 3 años, condicionado por altitud y exposición solar.

Modelos matemáticos de crecimiento forestal

La modelización del crecimiento constituye una herramienta esencial para la planificación y proyección del manejo forestal sostenible; se recomiendan modelos polinómicos/lineales para especies tropicales con

crecimiento inicial acelerado, mientras que los no lineales como $v = \beta_0 + \beta_1 d^2 h$ o formas neiloides y cónicas segmentadas mejoran la precisión al evaluar la bondad de ajuste con el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio; este enfoque resulta especialmente relevante para ecosistemas tropicales donde la heterogeneidad ambiental y genética influyen significativamente en la variabilidad del crecimiento, permitiendo tablas de volúmenes específicas por especie y coeficientes de forma que ajustan la geometría real del fuste (Prodan *et al.*, 1997; Romahn de la Vega *et al.*, 2010).

Evaluación de calidad en plantaciones forestales

La calidad depende de características morfológicas/fitosanitarias: bifurcación, inclinación, daños mecánicos, estado fitosanitario, mortalidad (Murillo y Camacho, 1997; Ochoa, 2015). *Hypsipyla grandella* afecta las Meliaceae, causando bifurcaciones (Cibrián Tovar *et al.*, 1995). Las especies tropicales son vulnerables a factores climáticos/manejo (Lombardi *et al.*, 2014).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se desarrolló en el Arboretum Departamental Yulúh, ubicado dentro del Laboratorio Natural Awawas de la Universidad de las Regiones Autónomas de la Costa Caribe Nicaragüense (URACCAN), en el municipio de Siuna, Región Autónoma de la Costa Caribe Norte (RACCN) de Nicaragua. Este espacio forma parte de una unidad productiva adquirida por la universidad en el año 2008, que anteriormente había sido destinada a actividades mineras. A partir de 2009, mediante la Jornada Nacional de Reforestación, se estableció una plantación con especies de alto valor ecológico y comercial, especialmente *Swietenia macrophylla* y *Cedrela odorata*, que con el tiempo fueron enriquecidas con otras especies nativas, formando actualmente un ecosistema forestal diverso con más de 25 especies.

Diseño metodológico

La investigación se enmarca en un enfoque cuantitativo y con nivel descriptivo, orientado al análisis del crecimiento y la calidad de árboles de once especies forestales mediante la evaluación de variables morfológicas, fitosanitarias y estructurales. Se aplicó un diseño no experimental y transversal, basado en la medición directa en campo y el análisis estadístico de datos dendrométricos.

Población y muestra

La población en estudio estuvo conformada por 1,163 árboles pertenecientes a 11 especies establecidas entre año el 2009 y 2015 en el Arboretum departamental Yulúh. Estas especies fueron: *Swietenia macrophylla*, *Cedrela odorata*, *Carapa guianensis*, *Ceiba pentandra*, *Tabebuia chrysantha*, *Platymiscium pinnatum*, *Hymenaea courbaril*, *Cordia alliodora*, *Tabebuia rosea*, *Calophyllum brasiliense* var. *rekoi* y *Pithecellobium arboreum*.

No se seleccionó muestra, por tanto, se seleccionó el 100% de los árboles existentes de estas 11 especies, distribuidas en todo el arboretum. Cada árbol se consideró una unidad de análisis, permitiendo una caracterización integral de la calidad del conjunto de especies bajo estudio.

Tabla 1*Variables evaluadas*

Variable	Descripción	Método
Calidad de los árboles	Porcentual	Valor
Altura total (m)	Base a ápice	Cinta métrica, clinómetro SUNTO (15-20)
Diámetro base/DAP (cm)	Nivel suelo/1.30 m	Calibrador/Cinta diamétrica
Bifurcación	División fuste <DAP	Visual (Sí/No)
Inclinación	Ángulo fuste ($\leq 30^\circ$ / $\geq 30^\circ$)	Clinómetro
Daños mecánicos	Heridas/deformaciones	Escala 1-3
Estado fitosanitario	Plagas/enfermedades	Escala 1-3
Mortalidad	Árboles muertos/ausentes	Registro
Sombra	Cobertura de copa ($\leq 30\%$ / $30\% - 60\%$ / $\geq 60\%$)	Escala 1-3

Cabe mencionar que, las variables (bifurcación, inclinación, daños mecánicos, estado fitosanitario, mortalidad y sombra) se resumen en la variable calidad (Murillo y Camacho, 1997), considerado un indicador integral obtenido a partir de las variables anteriores, clasificando los árboles en tres categorías de calidad según la siguiente escala:

Excelente: árboles con calificación de 1 en todas las variables.

Aceptable: árboles con al menos una calificación de 2 en inclinación o estado fitosanitario.

Mala: árboles con más de dos calificaciones de 2, o con valores de 3 en alguna variable, así como los muertos en pie.

Técnica de recolección

La recolección de la información se realizó a través de levantamientos anuales (2010-2024) por estudiantes de la carrera de Ingeniería Agroforestal-URACCAN, supervisados por docentes. Se utilizó un formato estandarizado de campo que permitió registrar cada una de las variables.

Los instrumentos utilizados incluyeron cintas diamétricas, cintas métricas, calibradores digitales, marcadores, tablas de campo y cámaras fotográficas. Los datos se tomaron con precisión y se consignaron en hojas de registro diseñadas para este propósito.

Procesamiento estadístico

En Microsoft Excel se realizaron los cálculos de incrementos medios anuales (IMA), elaboración de tablas comparativas y gráficas descriptivas. En IBM SPSS Statistics, se aplicaron análisis de varianza (ANOVA) de un factor para determinar diferencias significativas entre especies, así como redes neuronales artificiales para identificar la importancia relativa de las variables sobre la calidad de los árboles.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis se estructuró de acuerdo a los objetivos específicos definidos en la investigación, abordando el crecimiento en diámetro y altura, los modelos matemáticos de crecimiento y la calidad de los árboles, según variables las morfológicas y fitosanitarias. Los resultados se discuten con base en investigaciones previas (Peralta Tercero, 2015; Canales *et al.*, 2021; Chinchilla Mora *et al.*, 2021; Imaña y Encimas, 2008), permitiendo contextualizar el desempeño de las especies bajo las condiciones ecológicas y de manejo propias del sitio de estudio.

Crecimiento en diámetro y altura de 11 especies forestales en el Arboretum Departamento Yulúh

El crecimiento de los árboles se expresa mediante el aumento de las variables: diámetro, altura, área basal o volumen, en esta investigación se analizan las variables diámetro y altura, con base a estas se identificaron las especies que están presentando el mejor desarrollo. También es importante mencionar que *Swietenia macrophylla* y *Cedrela odorata* tienen 15 años de establecidas, las demás tienen 10 años.

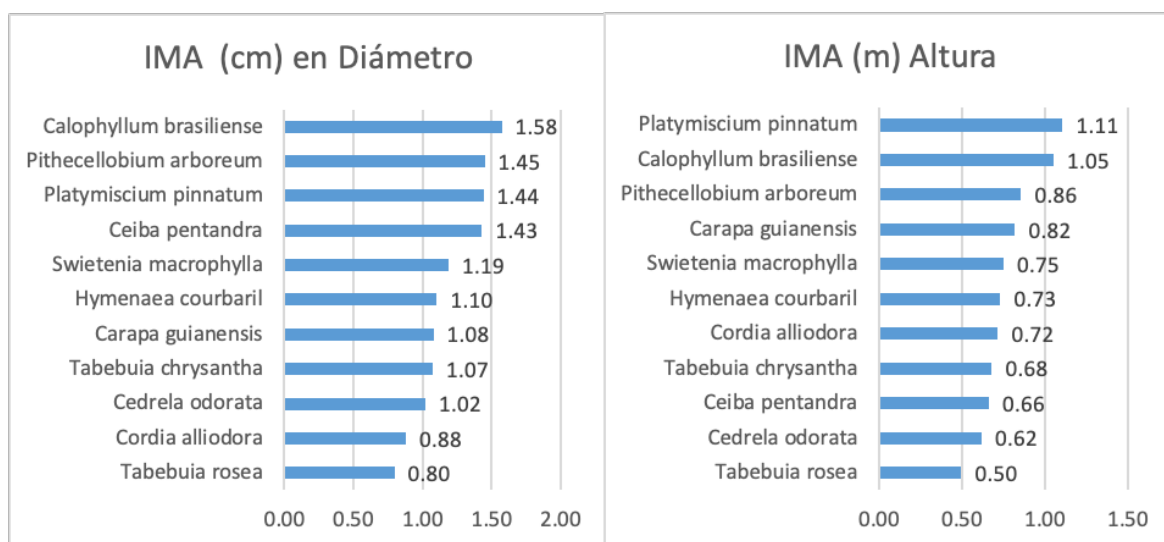
Teniendo en cuenta lo anterior, en la Figura 1 se observa que todas las especies independientemente que tengan 10 o 15 años presentan un IMA (Incremento Medio Anual en diámetro) por encima de lo establecido en la Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense para el manejo sostenible de los bosques naturales latifoliados y de coníferas (NTON 18 001-12) para el manejo forestal en especies de latifoliadas ($IMA=0.5$ cm anual para el diámetro) sin embargo, en la NTON no se refleja ningún dato para la comparación relacionada a la altura.

Además, se aprecia que tres especies sobresalen tanto en diámetro como en altura: *Calophyllum brasiliense* var. *rekoi* ($IMA_{diámetro} = 1.58$ cm/año, $IMA_{altura} = 1.05$ m/año); *Pithecellobium arboretum* ($IMA_{diámetro} = 1.45$ cm/año, $IMA_{altura} = 0.86$ m/año); *Platymiscium pinnatum* ($IMA_{diámetro} = 1.44$ cm/año, $IMA_{altura} = 1.11$ m/año).

Sin embargo, al comparar los resultados de esta investigación con los de Peralta Tercero (2015) para las especies de cedro real y caoba a la edad de 5 años en el mismo Arboretum, ambas especies han alcanzado un mejor crecimiento: *Swietenia macrophylla* ($IMA_{diámetro} 5$ años = 0.86 cm/año, 15 años = 1.19 cm/año) *Cedrela odorata* ($IMA_{diámetro} 5$ años = 0.66 cm/año, 15 años = 1.02 cm/año) teniendo ambas especies un crecimiento significativo en los últimos 10 años producto de las buenas prácticas de manejo que se han implementado con los estudiantes de la carrera de Ingeniería agroforestal.

Figura 1

Incremento Medio Anual (IMA) en diámetro y altura, según especies, 2010-2025



Comportamiento de las variables: Calidad de árboles, Diámetro, Altura con relación a la edad y calidad de los árboles

La Tabla 2, muestra los datos correspondientes a *Swietenia macrophylla* y *Cedrela odorata* en cada una de las variables evaluadas para determinar el crecimiento de los árboles. Aquí se puede apreciar que en los primeros cinco años en ambas especies el porcentaje de árboles que se encontraban en calidad 1 (9.1% y 13.1%) era menor, sin embargo, a los 10 años se tenía un 23.0% y 24.8% respectivamente de árboles en calidad 1 y en los 15 años el porcentaje en calidad 1 aumentó a 55.6% y 51.9%. lo que indica que a medida que los árboles van creciendo son menos afectados por la *Hypsipyla grandella* barrenador de las Meliaceae, y presentando menores afectaciones fitosanitarias y bifurcaciones como lo indican Cibrián Tovar *et al.* (1995).

En esta misma Tabla también se puede apreciar que la variable diámetro aumenta significativamente a medida que la edad aumenta, indicando así que, estos árboles no han llegado a estabilizar su crecimiento en diámetro. Sin embargo, en la variable altura se evidencia un aumento significativo de los 5 a los 10 años, pero al pasar a los 15 años se refleja una disminución en su ritmo de crecimiento. Cabe mencionar que en este último periodo fue cuando los árboles fueron afectados por los huracanes Eta y Iota, confirmandose así lo planteado por Imaña y Encinas, 2008 y Bruce y Schumacher 1950.

Tabla 2

Distribución del crecimiento de especies, según edad, calidad y variables de crecimiento, 2010-2025

Especies	Variables	5 años			10 años			15 años		
		1*	2	3	1	2	3	1	2	3
<i>Swietenia macrophylla</i>	% de árboles	9.1	15.5	75.4	23.0	25.9	51.2	55.6	14.1	30.4
	Diámetro de la base (cm)	3.5	4.2	4.4	11.4	11.9	11.0	18.0	17.7	17.7
	Diámetro a 1.30 (cm)				9.0	9.8	8.7	15.1	14.3	14.6
	Altura total (m)	2.7	3.3	3.4	8.5	9.3	8.5	11.6	10.7	10.9
<i>Cedrela odorata</i>	% de árboles	13.1	10.9	76.0	24.8	31.5	43.6	51.9	16.9	31.2
	Diámetro de la base (cm)	3.2	3.1	3.3	9.8	7.6	8.3	16.3	14.2	14.3
	Diámetro a 1.30 (cm)				7.3	5.8	5.7	12.5	10.5	11.4
	Altura total (m)	2.1	2.3	1.9	7.2	6.2	6.3	10.0	8.4	8.5

Nota: *1, 2 y 3 representan la calidad del árbol: excelente, aceptable y mala respectivamente

En la Tabla 3 se presentan los datos de los árboles que tienen entre 7 y 10 años de establecidos en el arboretum, aquí se puede apreciar que la mayoría de las especies el porcentaje de árboles va aumentando a medida que la edad va en aumento similar a las que tienen 15 años de establecidos, sin embargo, la especie *Calophyllum brasiliense var. reko* a los 10 años el porcentaje de árboles que se encuentran en calidad 3 es muy alto (50%) apreciándose in situ presencia de plagas que afectan el fuste de estos y por ende disminuyen la calidad. Lo cual coincide con (Murillo y Camacho, 1997; Ochoa, 2015) quienes plantean que la calidad depende de características morfológicas/fitosanitarias: bifurcación, inclinación, daños mecánicos, estado fitosanitario, mortalidad.

Tabla 3

Distribución del crecimiento de especies con 7 a 10 años de establecidas, según edad, calidad y variables de crecimiento, 2010-2025

Especies	Variables	7 años			10 años		
		1*	2	3	1	2	3
<i>Carapa guianensis</i>	% de árboles	32.4	45.1	22.5	69.9	9.6	20.5
	Diámetro de la base (cm)	4.6	4.9	6.1	11.2	9.6	10.1
	Diámetro a 1.30 (cm)	3.7	3.5	4.5	8.9	8.3	7.9
	Altura total (m)	3.7	3.5	4.5	8.6	6.7	7.4
<i>Ceiba pentandra</i>	% de árboles	47.1	17.6	35.3	62.5	6.3	31.3
	Diámetro de la base (cm)	11.4	3.9	6.1	15.0	7.0	9.8
	Diámetro a 1.30 (cm)	7.9	3.2	3.1	12.7	5.0	7.7
	Altura total (m)	4.8	2.5	2.8	7.2	3.5	4.0
<i>Tabebuia chrysantha</i>	% de árboles	38.1	28.6	33.3	80.6	6.5	12.9
	Diámetro de la base (cm)	4.7	5.1	5.9	10.5	9.0	13.0
	Diámetro a 1.30 (cm)	2.1	3.7	4.1	7.9	6.0	11.1
	Altura total (m)	3.5	4.2	3.8	7.0	5.0	6.5
<i>Platymiscium pinnatum</i>	% de árboles	50.0	50.0		72.7	9.1	18.2
	Diámetro de la base (cm)	4.0	3.0		13.0	14.5	12.0
	Diámetro a 1.30 (cm)				10.4	10.5	9.0
	Altura total (m)	3.8	3.1		9.9	9.0	10.8
<i>Hymenaea courbaril</i>	% de árboles	17.4	41.3	41.3	81.5	7.4	11.1
	Diámetro de la base (cm)	5.0	4.4	5.1	11.1	13.0	9.7
	Diámetro a 1.30 (cm)	3.6	2.0	3.3	11.0	11.0	7.9
	Altura total (m)	4.0	3.1	3.5	7.6	6.7	5.7
<i>Cordia alliodora</i>	% de árboles	38.9	22.2	38.9	77.7	6.8	15.5
	Diámetro de la base (cm)	4.3	4.4	5.0	8.6	10.9	8.7
	Diámetro a 1.30 (cm)	2.9	3.2	3.5	7.0	8.1	6.7
	Altura total (m)	4.1	4.2	4.6	6.9	9.3	7.5
<i>Tabebuia rosea</i>	% de árboles	37.2	23.0	39.8	63.8	12.3	23.8
	Diámetro de la base (cm)	4.5	5.6	6.1	7.4	11.2	7.8
	Diámetro a 1.30 (cm)	2.0	4.1	3.8	5.3	7.9	5.5
	Altura total (m)	3.4	4.7	4.3	4.8	6.6	4.5
<i>Calophyllum brasiliense</i> var. <i>reko</i>	% de árboles		40.0	60.0	25.0	25.0	50.0
	Diámetro de la base (cm)		4.7	4.0	22.0	18.0	11.5
	Diámetro a 1.30 (cm)		3.9	3.1	18.0	15.0	8.0
	Altura total (m)		5.6	4.5	14.0	10.0	9.0
<i>Pithecellobium arboretum</i>	% de árboles	25.0	25.0	50.0	87.5		12.5
	Diámetro de la base (cm)	4.5	5.8	6.0	10.0		11.1
	Diámetro a 1.30 (cm)	3.1	4.4	3.8	8.1		10.0
	Altura total (m)	3.7	5.0	5.3	5.7		8.0

Nota: *1, 2 y 3 representan la calidad del árbol: excelente, aceptable y mala respectivamente

Los resultados coinciden con los de Canales *et al.* (2021), quienes identifican en las plantaciones nicaragüenses diferencias de crecimiento entre especies, destacando el guapinol y la caoba como especies de mejor comportamiento en volumen. Además, Chinchilla Mora *et al.* (2021) reportan que el crecimiento está condicionado por factores de sitio y manejo. Diversos autores resaltan la importancia del manejo silvicultural intensivo y adaptado, siendo clave para el éxito de las plantaciones, además la genética y el ambiente se deben monitorear constantemente (Imaña y Encimas, 2008; Bruce y Schumacher, 1950).

Modelos matemáticos que describen el comportamiento de las especies en cuanto a su crecimiento

Los modelos matemáticos presentados en la Tabla 4, presentan coeficientes de determinación elevados ($R^2 > 0.90$). Específicamente, *Swietenia macrophylla* y *Cedrela odorata* responden bien a modelos polinómicos de segundo orden, mientras que *Cordia alliodora* y *Platymiscium pinnatum* se ajustan mejor a modelos lineales, facilitando proyecciones futuras del crecimiento; estos resultados coinciden con Prodan *et al.* (1997) y Romahn de la Vega *et al.* (2010), quienes enfatizan que la modelización del crecimiento mediante ecuaciones polinómicas/lineales para especies tropicales con aceleración inicial o no lineales como formas neiloides y cónicas segmentadas constituyen una herramienta esencial para la planificación del manejo forestal sostenible, evaluando precisión con R^2 y error cuadrático medio en contextos de heterogeneidad ambiental/genética, permitiendo tablas de volúmenes o tarifas específicas y coeficientes de forma que optimizan la estimación de producción en sistemas agroforestales como el Arboretum Departamental Yulúh.

Tabla 4

Modelos matemáticos que predicen el crecimiento en diámetro, según especies, 2010-2025

N°	Especie	Edad	Modelo	Ecuación	R^2	Tipo de modelo
1	<i>Tabebuia rosea</i>	10 años	$d=b_1x+b_0$	$d=0.6619x+1.6526$	$R^2=0.9382$	Lineal
2	<i>Cordia alliodora</i>	10 años	$d=b_1x+b_1$	$d=0.9285x-0.0445$	$R^2=0.9516$	Lineal
3	<i>Cedrela odorata</i>	15 años	$d=b_2x^2+b_1x+b_0$	$d=0.0403x^2+0.5001x-0.1396$	$R^2=0.9791$	Polinómica de orden 2
4	<i>Tabebuia chrysantha</i>	10 años	$d=b_2x^2+b_1x+b_0$	$d=-0.0197x^2+1.3793x-0.7808$	$R^2=0.9708$	Polinómica de orden 2
5	<i>Carapa guianensis</i>	10 años	$d=b_1x+b_0$	$d=1.0707x+1.0454$	$R^2=0.8627$	Lineal
6	<i>Hymenaea courbaril</i>	10 años	$d=b_2x^2+b_1x+b_0$	$d=0.0353x^2+0.8401x-0.3846$	$R^2=0.9827$	Polinómica de orden 2
7	<i>Swietenia macrophylla</i>	15 años	$d=b_2x^2+b_1x+b_0$	$d=0.0026x^2+1.2028x-0.853$	$R^2=0.9933$	Polinómica de orden 2
8	<i>Ceiba pentandra</i>	9 años	$d=b_2x^2+b_1x+b_0$	$d=-0.0135x^2+1.3695x+1.1924$	$R^2=0.9360$	Polinómica de orden 3
9	<i>Platymiscium pinnatum</i>	9 años	$d=b_1x+b_0$	$d=1.6937x-1.5506$	$R^2=0.9255$	Lineal
10	<i>Pithecellobium arboretum</i>	7 años	$d=b_2x^2+b_1x+b_0$	$d=-0.0238x^2+1.2681x+2.9542$	$R^2=0.9196$	Polinómica de orden 2
11	<i>Calophyllum brasiliense</i> var. <i>reko</i>	10 años	$d=b_2x^2+b_1x+b_0$	$d=0.1458x^2+0.1312x+0.0537$	$R^2=0.9853$	Polinómica de orden 2

Calidad de los árboles por especies, tomando en cuenta bifurcación, inclinación, daños mecánicos, estado fitosanitario, y mortalidad

Los datos encontrados muestran que, a excepción de *Calophyllum brasiliense* var. *Rekoi*, las demás especies se encuentran en calidad 1 (excelente). Sin embargo, se puede apreciar que, al comparar la *Swietenia macrophylla* con la investigación realizada por Peralta Tercero (2015) se nota el aumento del porcentaje (30.36%) de árboles que se encuentran en calidad 3 (5% de las plantas en calidad mala en el 2015), esto se debe precisamente por afectaciones que se tuvieron por los huracanes Eta y Iota en el 2020, donde algunos especímenes fueron dañados a causa de los fuertes vientos (ver Tabla 5).

El promedio proporcional de la cantidad de árboles por categoría de calidad de planta se encuentra en: excelente (66.25%), aceptable (10.35%) y mala (23.40%). Las especies que mayor proporción de árboles en calidad excelente son *Pithecellobium arboreum*, *Hymenaea courbaril* y *Tabebuia chrysantha*. Las especies que presentan mayor proporción de árboles en calidad "mala" son *Calophyllum brasiliense* var. *rekoi* y *Swietenia macrophylla*, debido a la sensibilidad a daños y afectación por plagas como *Hypsipyla grandella* y daños mecánicos causados por los huracanes Eta y Iota, corroborando lo reportado por Cibrian Tovar *et al.* (1995); Lombardi *et al.* (2014) y Peralta Tercero (2015).

Esta evaluación indica que es necesario aplicar tratamientos silviculturales para corregir estos daños y así asegurar que los árboles que tiene calidad mala pasen a una calidad aceptable.

Tabla 5

Distribución relativa de la calidad de los árboles calidad, por especies

Nombre común	Nombre científico	Calidad		
		1*	2	3
Quebracho	<i>Pithecellobium arboreum</i>	87.50%	0.00%	12.50%
Guapinol	<i>Hymenaea courbaril</i>	81.48%	7.41%	11.11%
Cortez	<i>Tabebuia chrysantha</i>	80.65%	6.45%	12.90%
Laurel negro	<i>Cordia alliodora</i>	77.67%	6.80%	15.53%
Granadillo	<i>Platymiscium pinnatum</i>	72.73%	9.09%	18.18%
Cedro macho	<i>Carapa guianensis</i>	69.86%	9.59%	20.55%
Macuelí o Falso roble	<i>Tabebuia rosea</i>	63.85%	12.31%	23.85%
Ceiba	<i>Ceiba pentandra</i>	62.50%	6.25%	31.25%
Caoba	<i>Swietenia macrophylla</i>	55.58%	14.06%	30.36%
Cedro real	<i>Cedrela odorata</i>	51.95%	16.88%	31.17%
María, Santamaría	<i>Calophyllum brasiliense</i> var. <i>rekoi</i>	25.00%	25.00%	50.00%
Promedio		66.25%	10.35%	23.40%

Nota: *1, 2 y 3 representan la calidad del árbol: excelente, aceptable y mala respectivamente

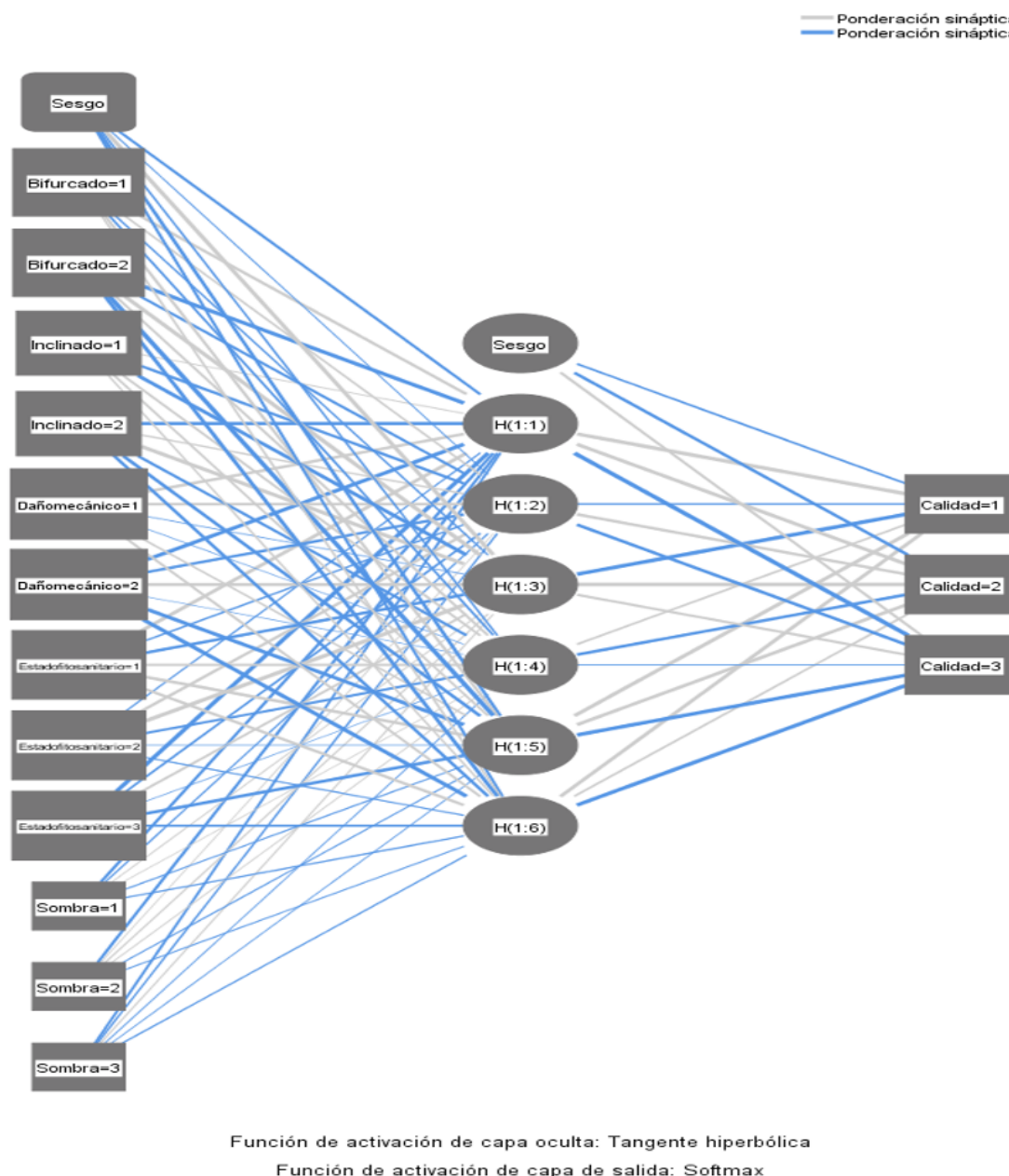
Importancia de las variables que determinan la calidad de los árboles

Para encontrar la importancia relativa e importancia normalizada de las variables que determinan la calidad de los árboles se procedió a entrenar una red neuronal en SPSS, logrando obtener un modelo con: 5 factores como capa de entrada (bifurcado, inclinado, daño mecánico, estado fitosanitario, sombra) en total sumando 12 unidades; una capa oculta con 6 unidades; una función de activación tangente hiperbólica; y tres capas de salida indicando la calidad (1: excelente, 2: aceptable, 3: mala).

En el entrenamiento se obtuvo un error de entropía cruzada de 0.392 y un porcentaje de pronósticos incorrectos de 0.0% con un criterio de razón del error de entrenamiento de 0.001. Así mismo, en la prueba del modelo, se logró un error de entropía cruzada de 0.161, con un porcentaje de pronósticos incorrectos de 0.0% (ver Figura 2).

Figura 2

Modelo de la red neuronal entrenado para encontrar la importancia relativa y la importancia normalizada de las variables que determinan la calidad



En la Tabla 6 se muestran los valores de importancia de cada una de las variables, identificándose que la variable daño mecánico es la más relevante para la calidad de los árboles (100% de importancia normalizada), seguida del estado fitosanitario (93.5%), la bifurcación (88.2%) y la inclinación (73.8%). Estas variables son indicadores clave del éxito de las prácticas de manejo y deben priorizarse en futuras estrategias de restauración y conservación forestal.

Este análisis coincide con el de Murillo y Camacho (1997) y Ochoa (2015) sobre la influencia de factores morfológicos y fitosanitarios en la calidad. Se destaca que el manejo sanitario y la prevención de daños mecánicos son esenciales para mantener la calidad y sobrevivencia en plantaciones forestales, tal como establecen Lombardi et al. (2014), además, la distorsión del crecimiento por plagas, bifurcaciones e inclinaciones debe ser atendida mediante prácticas silviculturales correctivas.

Tabla 6

Importancia de las variables que determinan la calidad de los árboles, según entrenamiento y análisis de red neuronal, 2025

Variables	Importancia	Importancia normalizada
Daño mecánico	0.278	100.0%
Estado fitosanitario	0.260	93.5%
Bifurcado	0.245	88.2%
Inclinado	0.205	73.8%
Sombra	0.011	3.90%

Con estos resultados podemos afirmar que los daños mecánicos influyen directamente en la calidad del árbol y en el manejo silvicultural se tiene que orientar hacia la corrección de estas afectaciones, sin descuidar las otras variables, ya que tanto el estado fitosanitario, las bifurcaciones y la inclinación en los árboles también son variables determinantes por estar por encima del 70% del nivel de importancia.

V. CONCLUSIONES

- El análisis de crecimiento mostró que todas las especies evaluadas presentan incrementos medios anuales (IMA) en diámetro superiores a los establecidos en las Normas Técnicas Obligatorias Nicaragüenses (NTON = 0.5 cm/año). Las especies *Calophyllum brasiliense* var. *rekoi*, *Pithecellobium arboreum* y *Platymiscium pinnatum* alcanzaron los mayores valores de incremento en diámetro y altura, lo que evidencia un adecuado desarrollo bajo las condiciones del Arboretum Yulúh. Este comportamiento sugiere que las prácticas silviculturales aplicadas han sido efectivas para optimizar el crecimiento de las plantaciones.
- Los modelos polinómicos de segundo orden se ajustaron mejor al comportamiento del crecimiento de las especies, alcanzando coeficientes de determinación superiores a 0.90. Esto permite proyectar con mayor precisión el desarrollo futuro de los árboles y facilitar la planificación del manejo forestal. Las especies de crecimiento rápido, como la caoba y el cedro real, mantienen una tendencia estable en el tiempo, lo que demuestra la viabilidad de estos modelos como herramientas de gestión para plantaciones tropicales.
- La mayoría de las especies presentan una proporción elevada de árboles en calidad excelente o aceptable, con porcentajes superiores al 70% en *Pithecellobium arboreum*, *Hymenaea courbaril* y *Tabebuia chrysantha*. No obstante, se identificaron limitaciones en *Calophyllum brasiliense* var. *rekoi* y *Swietenia macrophylla*, debido a daños mecánicos y afectaciones por plagas como *Hypsipyla grandella*. Estos resultados subrayan la necesidad de mantener un monitoreo sanitario permanente y la aplicación de tratamientos silviculturales correctivos.
- El análisis de redes neuronales evidenció que las variables con mayor peso sobre la calidad general fueron el daño mecánico (100%), el estado fitosanitario (93.5%) y la bifurcación (88.2%).
- Este estudio aporta información técnica valiosa sobre el comportamiento de especies forestales nativas en el contexto del Caribe nicaragüense, contribuyendo al fortalecimiento de las estrategias de enseñanza en la Universidad URACCAN, para la educación ambiental y la gestión sostenible de los recursos

forestales. Además, los resultados servirán como referencia para futuras investigaciones orientadas a la mejora genética, resiliencia post-huracanes y sostenibilidad ecológica de las plantaciones.

VI. REFERENCIAS

- Bruce, D., y Schumacher, F. X. (1950). *Forest mensuration*. McGraw-Hill.
- Canales, A. M., Meza Laguna, G. M., y Noguera Talavera, A. (2021). *Diagnóstico en plantaciones forestales establecidas en comunidades del municipio El Castillo del departamento de Río San Juan* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria]. <https://repositorio.una.edu.ni/4389/1/tnk10c212d.pdf>
- Chinchilla Mora, O., Corea Arias, E., Meza Picado, V., y Ávila Arias, C. (2021). Growth, yield, and costs during the first three years of mahogany (*Swietenia macrophylla* King) established in agroforestry systems. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 18(1), 45–57. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v16i42.5540>
- Cibrián Tovar, D., Méndez Montiel, J. T., Campos Bolaños, R., Yates III, H. O., y Flores Lara, J. E. (1995). *Insectos forestales de México (Forest insects of Mexico)*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Comisión Nacional de Normalización Técnica y Calidad. (2013). *Manejo sostenible de los bosques naturales latifoliados y de coníferas* (NTON 18 001-12, 2da revisión). <http://legislacion.asamblea.gob.ni/normaweb.nsf/9e314815a08d4a6206257265005d21f9/e5f72bc32154fb1d06257bdb005a8ee7>
- Imaña, J., y Encinas, O. (2008). *Epidometría forestal*. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Florestal. <https://www.monografias.com/trabajos-pdf2/epidometria-forestal/epidometria-forestal.pdf>
- Lombardi, I., Garnica, C., Carranza, J., Barrena, V., Ortiz, H., Gamarra, J., y Ponce, B. (2014). *Evaluación de la recuperación de las poblaciones naturales de caoba y cedro en el Perú* (1ra ed.). Editores: Consultores Asociados en Naturaleza y Desarrollo S.A.C. <https://www.itto.int/files/user/cites/peru/FINAL%20Recuperaci%C3%B3n%20Caoba%20y%20Cedro%20en%20el%20Per%C3%BA.pdf>
- Murillo, O., y Camacho, P. (1997). Metodología para la evaluación de la calidad de plantaciones recién establecidas. *Agronomía Costarricense*, 21(2), 189–206. http://www.mag.go.cr/rev_agr/v21n02_189.pdf
- Ochoa, C. (2015, 5 de mayo). *Muestreo probabilístico: Muestreo sistemático* [Publicación de blog]. Netquest. <https://www.netquest.com/blog/es/blog/es/muestreo-sistemático>
- Peralta Tercero, E. J. (2015). Crecimiento de cedro real y caoba en el laboratorio natural San Pablo URACCAN-Las Minas (2009–2014). *Ciencia e Interculturalidad*, 16(1), 122–131. <https://doi.org/10.5377/rci.v16i1.2357>
- Prodan, M., Peters, R., Cox, F., y Real, P. (1997). *Mensura forestal*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA); Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ). <https://hdl.handle.net/11324/15038>
- Romahn de la Vega, C. F., Ramírez Maldonado, H., y Treviño García, J. L. (2010). *Dendrometría*. Universidad Autónoma de Chapingo. <http://dicifo.chapingo.mx/pdf/publicaciones/dendrometria.pdf>