

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

Facultad de Ciencias Forestales



**Evaluación de la influencia del raleo en
el crecimiento de *Pinus patula* Schl. et
Cham. aplicando técnicas
dendrocronológicas en plantaciones de
Cajamarca - Perú**

Tesis para optar el Título de
INGENIERO FORESTAL

Daigard Ricardo Ortega Rodriguez

Lima – Perú

2014

RESUMEN

La Dendrocronología a través del análisis de tronco ha permitido estudiar la relación entre la tasa de crecimiento de las especies forestales con la anatomía de su madera, las variaciones climáticas, fenológicas y el efecto de la edad e intensidad de los tratamientos silviculturales. El crecimiento de los árboles está relacionado directamente a factores climáticos y de sitio, sin embargo puede variar si se maneja la densidad de la población con tratamientos como el raleo. Este crecimiento y su alteración positiva producto de la intervención son registrados en la estructura anatómica de la madera y su análisis a través de modelos de crecimiento puede brindar información que hasta entonces no tenía seguimiento; siendo posible evaluar la influencia de la edad e intensidad del raleo en el crecimiento de los anillos de la especie *Pinus patula* mediante el análisis dendrocronológico.

En el presente estudio se muestrearon treinta y cinco árboles de *Pinus patula* de una parcela raleada y treinta y cinco de una parcela no raleada o testigo pertenecientes a las plantaciones experimentales de la Cooperativa Agraria Atahualpa - Jerusalén, más conocida como “Granja Porcón” ubicada en el departamento de Cajamarca. Por medio de los anillos de crecimiento se determinó la edad de los árboles y la relación de la cronología de cada zona con las variables climáticas previo sincronizado mediante la utilización de los programas COFECHA, ARSTAN, RESPO, siendo la edad de los árboles en ambas zonas de 22 años y la variable precipitación la responsable de la formación de los anillos de crecimiento. Con los valores de ancho de anillo se modelaron ecuaciones matemáticas para describir el crecimiento en cada una de las zonas a través del programa Curve Expert v. 2.0.2, seleccionando el modelo Chapman-Richards para ambas zonas por presentar un mejor ajuste estadístico. Se encontró que el raleo aplicado a los 15 años a una intensidad del 63% afectó positivamente el crecimiento en la zona raleada cuya tasa promedio de crecimiento fue de 1,3 cm anuales comparada con la de la zona testigo de 1,2 cm anuales. Así mismo, el raleo aplicado evitó la disminución drástica en el crecimiento de anchos de anillo producto del estado de madurez de la plantación; sin embargo, no significó un aumento en la capacidad de producción final de madera comercial (m^3/ha) la cual fue mayor para la zona sin intervención.

K10.
07
T

ÍNDICE

Página

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN	V
ÍNDICE.....	VI
LISTA DE CUADROS.....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
1. INTRODUCCIÓN	10
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	11
2.1 LA ESPECIE	11
2.1.1 <i>Distribución geográfica</i>	11
2.1.2 <i>Descripción botánica</i>	11
2.1.3 <i>Descripción anatómica</i>	12
2.1.4 <i>Características de la madera y usos</i>	13
2.1.5 <i>Crecimiento y manejo</i>	13
2.2 ANILLOS DE CRECIMIENTO	14
2.2.1 <i>Factores que influyen en la formación de anillos de crecimiento</i>	14
2.2.2 <i>Periodicidad de formación de anillos en regiones tropicales</i>	15
2.3 LA DENDROCRONOLOGÍA.....	15
2.3.1 <i>Principios de Dendrocronología</i>	16
2.3.2 <i>El clima y su relación con la Dendrocronología (Dendroclimatología)</i>	18
2.3.3 <i>La Dendrocronología como estimación del crecimiento de árboles</i>	18
2.3.4 <i>Potencialidad de LA ESPECIE para estudios dendrocronológicos</i>	19
2.4 EL RALEO Y SU INFLUENCIA EN EL CRECIMIENTO DE ÁRBOLES	20
2.4.1 <i>Efectos de los raleos</i>	20
2.5 MODELOS MATEMÁTICOS DE CRECIMIENTO DE ÁRBOLES	21
2.5.1 <i>Ecuaciones de crecimiento</i>	21
2.5.2 <i>Características deseables de los modelos de crecimiento</i>	21
2.5.3 <i>Aplicaciones de los modelos de crecimiento</i>	22
3. MATERIALES Y MÉTODOS	23
3.1 SELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	23
3.1.1 <i>Selección del área de muestreo</i>	24
3.1.2 <i>Evaluación de las parcelas de muestreo</i>	26
3.2 DEMARCACIÓN, COLECCIÓN Y EXTRACCIÓN DE MUESTRAS.....	30
3.3 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE LAS SERIES METEOROLÓGICAS	31
3.4 ANÁLISIS DENDROCRONOLÓGICO	32
3.4.1 <i>Acondicionamiento de muestras demadera</i>	32
3.4.2 <i>Digitalización y medición de anillos decrecimiento</i>	34
3.4.3 <i>Sincronización (CO-FECHADO) de anillos decrecimiento y elaboración de la serie maestra</i>	35
3.4.4 <i>Obtención de cronologías</i>	36
3.5 ANÁLISIS DENDROCLIMATOLÓGICO	37
3.6 ANÁLISIS DENDROECOLÓGICO	37
3.6.1 <i>Modelamiento del crecimiento diamétrico</i>	38
3.6.2 <i>Validación de modelos de crecimiento</i>	38

43674

3.6.3	<i>Determinación de la tasa decrecimiento</i>	39
3.7	ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE MADERA COMERCIAL.....	39
3.7.1	<i>Obtención de los volúmenes comerciales remanentes para cada zona</i>	39
3.7.2	<i>Determinación de la producción</i>	40
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
4.1	ANÁLISIS DENDROCRONOLÓGICO	42
4.1.1	<i>Variabilidad del ancho de los anillos de crecimiento</i>	42
4.1.2	<i>Sincronización (CO-FECHADO) de los anillos decrecimiento (Control de calidad de las series de los anillos de crecimiento)</i>	42
4.1.3	<i>Obtención de cronologías de la especie</i>	45
4.2	ANÁLISIS DENDROCLIMATOLÓGICO	46
4.2.1	<i>Variables climáticas y su correlación con las cronologías de cada zona</i>	46
4.2.2	<i>Respuesta climática en el crecimiento de la especie</i>	49
4.3	ANÁLISIS DENDROECOLÓGICO	52
4.3.1	<i>Crecimiento diamétrico</i>	52
4.3.2	<i>Modelamiento del crecimiento diamétrico</i>	54
4.3.3	<i>Validación de los modelos de crecimiento</i>	62
4.3.4	<i>Comparación de tasas de crecimiento diamétrico</i>	65
4.3.5	<i>Crecimiento corriente anual y crecimiento medio anual</i>	66
4.4	ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE MADERA COMERCIAL.....	69
5.	CONCLUSIONES	71
6.	RECOMENDACIONES	72
ANEXO 1	80
	INTER-CORRELACIÓN DE LAS SERIES CRONOLÓGICAS A PARTIR DE LOS ANCHOS DE ANILLOS DE CRECIMIENTO PARA LA ESPECIE "PINUS PATULA" EN LA ZONA NO RALEADA	80
ANEXO 2	83
	INTER-CORRELACIÓN DE LAS SERIES CRONOLÓGICAS A PARTIR DE LOS ANCHOS DE ANILLOS DE CRECIMIENTO PARA LA ESPECIE "PINUS PATULA" EN LA ZONA RALEADA	83
ANEXO 3	86
	VARIABLES METEOROLÓGICAS ESTACIÓN "GRANJA PORCÓN-CAJAMARCA"	86
ANEXO 4	89
	VOLUMENES COMERCIALES POR PARCELA Y VOLUMEN REMANENTE PARA CADA ZONA	89

Lista de cuadros

Página

CUADRO 1	CONTROL DE CALIDAD DE LAS SERIES EJECUTADAS POR EL PROGRAMA COFECHA.....	44
CUADRO 2	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN PEARSON ENTRE ÍNDICES DE ANCHOS DE ANILLOS (CRONOLOGÍAS MÁSTER) Y VALORES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN ACUMULADA (MM) Y TEMPERATURA MEDIA (°C).....	49
CUADRO 3	MODELOS PROBADOS PARA EL TOTAL DE SERIES DE DATOS DE EDAD Y DIÁMETRO ACUMULADO, CON SUS RESPECTIVOS ESTADÍSTICOS Y COEFICIENTES DE LA ECUACIÓN.....	56
CUADRO 4	MODELOS PROBADOS PARA LAS SERIES DE DATOS MÁS REPRESENTATIVOS DE EDAD Y DIÁMETRO ACUMULADO, CON SUS RESPECTIVOS ESTADÍSTICOS Y COEFICIENTES DE LA ECUACIÓN.....	57
CUADRO 5	MODELO ESTADÍSTICO CHAPMAN-RICHARDS (CH-Ri) VALIDADO CON EL 10 % DE LOS DATOS TOTALES, CON SUS RESPECTIVOS ESTADÍSTICOS Y COEFICIENTES DE LA ECUACIÓN.....	62
CUADRO 6	TASAS DE CRECIMIENTO DIAMÉTRICO DE " <i>PINUS PATULA</i> " POR ZONA.....	66

Lista de figuras

Página

FIGURA 1	UBICACIÓN DE ÁREA DE ESTUDIO. GRANJA PORCÓN – CAJAMARCA.	24
FIGURA 2	UBICACIÓN DE ÁREAS DE MUESTREO DENTRO DE LA GRANJA PORCÓN – CAJAMARCA.	25
FIGURA 3	DISTRIBUCIÓN DE LAS PARCELAS DE MUESTREO (A) ZONA NO RALEADA; (B) ZONA RALEADA.	27
FIGURA 4	HISTOGRAMAS DE FRECUENCIA POR CATEGORÍA DIAMÉTRICA CON CORTEZA (CC) PARA EL TOTAL DE ÁRBOLES EN (A) ZONA NO RALEADA; (B) ZONA RALEADA.	28
FIGURA 5	HISTOGRAMAS DE FRECUENCIA POR CATEGORÍA DE ALTURAS PARA EL TOTAL DE ÁRBOLES EN (A) ZONA NO RALEADA; (B) ZONA RALEADA.	29
FIGURA 6	MUESTREO CON Sonda PRESSLER, (A) BARRENADO DE ÁRBOL; (B) COLECTA DE MUESTRA; (C) CODIFICACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO EN SORBETES; (D) ALMACENAMIENTO DE MUESTRAS PARA SU TRASLADO.	31
FIGURA 7	ACONDICIONAMIENTO DE MUESTRAS, (A) MUESTRA LISTA PARA SER ENCOLADA Y SOPORTE CODIFICADO; (B) ENCOLADO DE MUESTRA EXPONANDO LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA MISMA; (C) LIJADORA ORBITAL Y LIJAS DE DIFERENTE GRANULOMETRÍA; (D) PULIDO DE MUESTRAS.	33
FIGURA 8	DIGITALIZACIÓN Y MEDICIÓN DE ANILLOS DE CRECIMIENTO, (A) DEMARCACIÓN DE ANILLOS DE CRECIMIENTO; (B) DIGITALIZACIÓN DE MUESTRAS; (C) IMAGEN DE MUESTRAS DIGITALIZADAS; (D) MEDICIÓN DE ANCHOS DE ANILLOS EN MUESTRAS DIGITALIZADAS.	34
FIGURA 9	VARIABILIDAD DEL ANCHO DE LOS ANILLOS DE CRECIMIENTO EN RADIOS DE LA (A) ZONA NO RALEADA; (B) ZONA RALEADA.	42
FIGURA 10	SERIES INDIVIDUALES DE ANCHO DE ANILLOS (A) ÁRBOLES DE ZONA NO RALEADA; (B) ÁRBOLES DE ZONA RALEADA.	43
FIGURA 11	SERIES MAESTRAS OBTENIDAS CON EL PROGRAMA COFECHA, ZONA NO RALEADA (LÍNEA PUNTEADA) Y ZONA RALEADA (LÍNEA CONTINUA).	44
FIGURA 12	SERIES CRONOLÓGICAS DESPUÉS DE LA REMOCIÓN DE TENDENCIAS CON EL PROGRAMA ARSTAN (ESTANDARIZACIÓN) (A) ZONA NO RALEADA; (B) ZONA RALEADA.	46
FIGURA 13	TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN MENSUAL REGISTRADAS EN LA ESTACIÓN GRANJA PORCÓN (PERIODO 1990-2013).	47
FIGURA 14	(A) PRECIPITACIÓN ANUAL ACUMULADA (MM) Y (B) TEMPERATURA PROMEDIO ANUAL (C°) VERSUS LAS SERIES CRONOLÓGICAS DE LA ZONA NO RALEADA (LÍNEA PUNTEADA) Y RALEADA (LÍNEA CONTINUA).	48
FIGURA 15	CORRELACIONES ENTRE LOS ÍNDICES DE ANILLOS DE CRECIMIENTO CON LA VARIABLE CLIMÁTICA PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL (A) ZONA NO RALEADA; (B) ZONA RALEADA.	50
FIGURA 16	TENDENCIAS DE CRECIMIENTO ACUMULADO EN DIÁMETRO DE LOS ÁRBOLES DE <i>PINUS PATULA</i> (A) ZONA NO RALEADA; (B) ZONA RALEADA.	53
FIGURA 17	CURVAS DE CRECIMIENTO OBTENIDAS EN BASE AL MODELO CHAPMAN-RICHARDS PARA EL TOTAL DE DATOS.	58
FIGURA 18	CURVAS DE CRECIMIENTO OBTENIDAS EN BASE AL MODELO CHAPMAN-RICHARDS PARA LOS DATOS MÁS REPRESENTATIVOS.	59
FIGURA 19	DISTRIBUCIÓN DE RESIDUALES PARA EL MODELO AJUSTADO CHAPMAN-RICHARDS PARA EL TOTAL DE DATOS.	60
FIGURA 20	DISTRIBUCIÓN DE RESIDUALES PARA EL MODELO AJUSTADO CHAPMAN-RICHARDS PARA LOS DATOS MÁS REPRESENTATIVOS.	61
FIGURA 21	DISTRIBUCIÓN DE RESIDUALES PARA EL MODELO AJUSTADO CHAPMAN-RICHARDS CON EL 10% DE LOS DATOS (A) ZONA NO RALEADA; (B) ZONA RALEADA.	63
FIGURA 22	CURVAS DE CRECIMIENTO VALIDADAS EN BASE AL MODELO CHAPMAN-RICHARDS (A) ZONA NO RALEADA; (B) ZONA RALEADA.	64
FIGURA 23	CRECIMIENTO DIAMÉTRICO ACUMULADO PROYECTADO A LOS 25 AÑOS.	65
FIGURA 24	COMPARACIÓN ENTRE EL ICA (INCREMENTO CORRIENTE ANUAL) E IMA (INCREMENTO MEDIO ANUAL) (A) ZONA NO RALEADA; (B) ZONA RALEADA.	68
FIGURA 25	PRODUCCIÓN DE MADERA COMERCIAL A LOS 22 AÑOS.	70

1. INTRODUCCIÓN

El *Pinus patula* Schl. et Cham. es una especie conífera nativa de México con potencialidad para estudios dendrocronológicos, es intensamente utilizada en regiones tropicales y subtropicales como especie exótica debido a su rápida adaptabilidad y buena tasa de crecimiento. A pesar que en el Perú no se ha evaluado dendrocronológicamente la especie en otros países de América Latina como Brasil, Venezuela, Colombia y Ecuador se han realizado distintos estudios de anillos de crecimiento de la especie debido a su importancia económica en plantaciones; habiéndose evaluado por ejemplo, modelos de crecimiento para generar curvas de índice de sitio; o analizando el efecto de los raleos en la formación de elementos xilemáticos, propiedades físicas de su madera y el incremento de la biomasa de la especie.

La Dendrocronología es una ciencia cuya aplicación ha permitido estudiar distintas relaciones entre el crecimiento anillar de las especies forestales con la anatomía del árbol, la influencia de las variaciones climáticas y fenológicas y el efecto de la edad e intensidad de los tratamientos silviculturales. Actualmente existe en la Granja Porcón - Cajamarca plantaciones experimentales de esta especie, en la cual se han realizado escasos monitoreos del crecimiento a través de parcelas permanentes y las actividades silviculturales han sido poco controladas. Además no se han desarrollado estudios dendrocronológicos producto de la respuesta de la especie a las intervenciones silviculturales como raleos; por ello, el monitoreo y datos de crecimiento anual y periódicos de *Pinus patula* y la respuesta de ésta al raleo resulta ser valioso e importante para el manejo forestal de la especie.

El presente trabajo pretende determinar la influencia de la edad e intensidad de raleo considerando la naturaleza anual de los anillos de crecimiento de la especie *Pinus patula* a través de un análisis dendrocronológico. Así como, verificar estadísticamente la naturaleza anual en la formación de anillos de crecimiento de la especie y la relación de su cronología con las variables de precipitación y temperatura y comparar la tasa de crecimiento de los árboles de *Pinus patula* en dos tipos de plantaciones una raleada y una testigo.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 LA ESPECIE

2.1.1 DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA

El *Pinus patula* es una especie conífera nativa de regiones subtropicales de México, se distribuye en la Sierra Madre Oriental, Eje Neovolcánico y Sierra Madre de Oaxaca, desde el norte del estado de Hidalgo hasta Cofre de Perote, en latitudes entre 16°N a 24°N, en altitudes entre 1500 a 3100 m, precipitaciones anuales de 600 a 2500 mm, puede crecer en masas puras o asociado con otras especies como *Pinus teocote* (Dvorak *et al.*, 2000).

Como especie exótica y por su rápido crecimiento ha sido extensamente utilizado en países como Sudáfrica, India y Australia, en Sudamérica se han establecido plantaciones experimentales de la especie en Argentina, Brasil, Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú alcanzando importancia económica por su madera y material genético (Ospina *et al.*, 2011).

2.1.2 DESCRIPCIÓN BOTÁNICA

Nombre Científico: *Pinus patula* Schlecht. & Cham.

Familia: Pinaceae

Nombre Común: Pino, Pino pátula, (Perú). En el área de su distribución natural se denomina: pino chino, pino llorón mexicano, pino colorado, pino pátula, ocote macho, pino xalocote. En países de habla inglesa: patula pine, mexican weeping pine, spreading leaved pine.

Según Ospina *et al.* (2011), la especie es de porte mediano a grande, con ejemplares longevos que puede alcanzar alturas de hasta 40 m y 120 cm de diámetro. El tronco es recto, cilíndrico en un comienzo y bastante cónico en casi toda su longitud. En árboles jóvenes, inicialmente la corteza es lisa y rojiza, y luego, ésta se torna marrón, áspera y se desprende en escamas. La distribución de las ramas es desuniforme, aunque en general son verticiladas, las ramas pequeñas son escamosas y rojizas. Los rebrotes con algunos nódulos glabros, son verde pálidos hasta pardo rojizos. La copa es extendida con ramas largas y colgantes. Esta especie desarrolla un buen sistema radical, pivotante y profundo.

Las hojas son aciculadas, normalmente agrupadas en fascículos de 3 ó 4 agujas, de 20 cm de longitud, flexibles y péndulas de color verde – azulado, las vainas de las acículas son de color ceniza, persistentes y de 1,5 cm de largo. Las yemas terminales son largas, erguidas y amarillentas (Ospina *et al.*, 2011).

Ospina *et al.* (2011), señala que las flores son estróbilos unisexuales sobre el mismo árbol. Las inflorescencias femeninas son de color púrpura, principalmente laterales, pedunculadas, solitarias o en pequeños racimos de hasta ocho escamas, con pequeñas espinas deciduas. Las inflorescencias masculinas son amentos, ubicados en la parte terminal de las ramas, de color verde cuando jóvenes y amarillos al madurar, de hasta 1,0 cm de diámetro, agrupadas alrededor del nuevo brote y aparecen con las nuevas hojas.

Los frutos son de forma ovoide a cónico, duros, puntiagudos, asimétricos, curvados en el extremo, persistentes en el árbol, de 4,0 a 12,0 cm de largo por 2,5 a 5,0 cm de diámetro, dispuestos en pedúnculos cortos hasta de 1,5 cm y, frecuentemente agrupados de tres a siete. Las escamas que recubren los frutos son redondeadas, con espinas deciduas, gruesas, de 2,0 cm de largo por 1,0 cm de ancho y se abren periódicamente (Ospina *et al.*, 2011).

2.1.3 DESCRIPCIÓN ANATÓMICA

Huerta (1978), menciona que macroscópicamente la madera presenta diferencia de color entre albura y duramen, la madera temprana es castaña clara y amarillenta y la tardía castaña muy pálida; no tiene olor ni sabor característicos, tiene brillo bajo y veteado pronunciado dado por los anillos de crecimiento; la textura es de fina a media y su grano es recto. Los anillos de crecimiento se encuentran perfectamente delimitados por una banda oscura de madera tardía y una banda clara de madera temprana, su anchura es homogénea, la madera temprana ocupa más de la mitad del total del anillo, la transición de madera temprana a madera tardía es gradual. Los radios son visibles a simple vista en la cara transversal y presenta canales resiníferos.

Microscópicamente presenta traqueidas largas, con diámetro tangencial del lumen mediano y con pared celular muy delgada en la madera temprana, y de diámetro tangencial del lumen fino y pared celular delgada en la madera tardía, sus caras radiales presentan una hilera de punteaduras areoladas; los radios son de tipo homogéneo, poco numerosos y muy bajos; los que no presentan canal son uniseriados y los que lo presentan son fusiformes de 2 a 3 series en

la parte cercana al canal; en los campos de cruzamiento se ven de 1 a 3 punteaduras de tipo pinoide; las traqueidas de radio presentan bordes dentados; los canales longitudinales son poco numerosos por mm², el parénquima axial se encuentra ausente (Huerta, 1978).

2.1.4 CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA Y USOS

Ospina *et al.* (2011), indica que el *Pinus patula* posee una densidad anhidra de 0,48 g/cm³ y una densidad básica de 0,43 g/cm³. La madera es blanda, recién cortada presenta olor agradable a resina, de color ligeramente amarillento, de durabilidad natural baja; debido a la susceptibilidad al ataque de insectos xilófagos y de hongos que descomponen la madera. Se seca relativamente bien, tanto al aire libre como en el secado artificial, lo que permite que sea ampliamente utilizada como madera de aserrío; cuando se seca al aire tiende a presentar ligeras torceduras. Es de fácil preservación por los métodos de inmersión, baño caliente-frío y vacío presión, lo cual permite utilizarla en construcción como vigas y columnas, tablillas para pisos y revestimiento de interiores y exteriores. Además, en postes para servicios públicos y madera aserrada.

En el norte del Perú en la provincia de Cajamarca se ha desarrollado desde 1986 el Proyecto Piloto de Forestación que comprende alrededor de 3 500 ha de bosques de pino, donde el *Pinus patula* representa un 62,5% de la superficie plantada; así mismo, uno de los principales objetivos del proyecto fue abastecer de madera rolliza las industrias dedicadas a la obtención de productos madereros como tableros de partículas, parihuelas y madera aserrada en las provincias de La Libertad y Cajamarca (ADEFOR, 2005).

2.1.5 CRECIMIENTO Y MANEJO

Rodríguez (2010), afirma que durante el primer año de plantación la altura alcanzada es de 0,9 a 1,5 m y deja de crecer aproximadamente a los 25 años, en rodales bien manejados y con buena calidad de sitio puede alcanzar 35 m³ de Incremento Medio Anual volumétrico (IMAv), de los cuales 27 m³ pueden ser utilizables en rotaciones de 30 años; en sitios de menor calidad el IMAv es menor de 20 m³; en plantaciones el IMA por lo general alcanza su máximo valor entre los 14 a 18 años; los mejores crecimientos se logran en etapas tempranas, hasta los 15 años de edad en suelos profundos y elevaciones entre 1800 y 2000 m, cuando se utiliza como especie exótica. En Veracruz – México las plantaciones, con material procedente de un huerto

semillero de segunda generación de Sudáfrica, mostraron un crecimiento inicial acelerado en diámetro, el cual correlacionó positivamente con la altitud.

El espaciamiento inicial de plantación recomendado es de 2,4 a 2,75 m (1508 plantas ha⁻¹ en promedio), aunque también es utilizado el de 3 x 3 m (1111 plantas ha⁻¹), en turnos de producción que van de 18 a 21 años dependiendo del desarrollo de la especie y el destino final de la madera (Ospina *et al.*, 2011). Domínguez *et al.* (1997), menciona que la especie es sensible a la competencia durante sus primeros años, ya que puede llegar a ocupar la totalidad del sitio en dos años; se recomiendan aclareos pre comerciales a los 6 años, para dejar de 15 a 40 m² ha⁻¹ de AB residual y así afectar gradualmente la distribución temporal y diamétrica de los rendimientos; así mismo, la aplicación de podas debe realizarse desde los 2,5 m, las cuales permiten tener mejores respuestas en el crecimiento de altura y calidad de la madera al año de ser aplicadas, aunque reducen el crecimiento en diámetro.

2.2 ANILLOS DE CRECIMIENTO

Rosero (2011), indica que los anillos de crecimiento se dan como consecuencia del crecimiento radial, originado por el cambium formando xilema secundario durante el periodo de crecimiento. A nivel anatómico el cambium produce elementos de mayor diámetro en primavera (Leño primavera) y de menor diámetro y paredes más gruesas en invierno (Leño verano); la actividad de todo el año forma un anillo de crecimiento.

2.2.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FORMACIÓN DE ANILLOS DE CRECIMIENTO

El crecimiento de un árbol se encuentra condicionado por la variable ambiental primaria más limitante. Incluso, dicha variable ambiental o factor limitante frecuentemente actúa sobre otros factores no climáticos. Así tenemos por ejemplo, que en regiones áridas y semiáridas la precipitación es a menudo el factor más limitante para el crecimiento de las plantas y, por tanto, para la formación de anillos. En estas regiones, el crecimiento del árbol no puede proceder más rápido que lo permitido por la cantidad de precipitación, haciendo que el ancho de los anillos y con ello el volumen de madera producido sea una función de la precipitación (Díaz *et al.*, 2001). Según Rosero (2011), en las zonas tropicales el crecimiento se ve influenciado por periodos secos y húmedos necesarios para la formación de los tejidos del xilema clasificados

como inicial o de primavera (tejido formado en la época de lluvias) y tardío (tejido formado en la estación seca).

2.2.2 PERIODICIDAD DE FORMACIÓN DE ANILLOS EN REGIONES TROPICALES

El inicio y cese del crecimiento periódico se manifiesta en los árboles mediante características estructurales, que se reflejan en incrementos del tejido de la madera (xilema) del tallo. En plantas leñosas, el cambium vascular se activa durante la temporada de crecimiento, formando xilema hacia el interior y floema hacia el exterior. En climas templados, si estos cambios son anuales, se le nombra anillo de crecimiento anual y se asocian al fotoperiodo o al cambio en temperatura. En contraste, en las regiones tropicales y subtropicales, muchos de estos anillos son formados por una alternancia de temporadas secas y de lluvias (López *et al.*, 2006)

2.3 LA DENDROCROLOGÍA

Tomazello *et al.* (2001), señalan que la palabra Dendrocronología proviene del griego "Dendro" que significa "árbol", "Cronos" que significa "tiempo" y "Logos" "ciencia"; es decir, es el campo de la ciencia forestal a partir del cual se realiza un análisis de tronco para estudiar los anillos de crecimiento o capas de madera y su relación con la edad de los árboles, incluyendo la aplicación de la información registrada en su estructura para los estudios ambientales y la historia. Según Fritts (1976), la Dendrocronología estudia la data y la reconstrucción de los fenómenos meteorológicos, los incendios forestales, las actividades volcánicas, entre otras. Rosero (2009) y Zúñiga (2012), agregan que la Dendrocronología tiene su aplicación en múltiples eventos ambientales estudiados por disciplinas como dendroclimatología, dendroecología, dendroclimatografía, dendrohidrología, dendrogeomorfología, dendrosismología, dendroglaciología, dendroarqueología.

La Dendrocronología reúne una gran cantidad de datos de alto valor para la toma de decisiones en la gestión forestal, como los registros de crecimiento, caracterización y seguimiento de los volúmenes de madera producida, así como la estimación de la biomasa y el CO₂ fijado en la madera, siendo una fuente de información importante acerca de su calidad para permitir la observación de la heterogeneidad, su formación y defectos (Rodríguez, 2010).

2.3.1 PRINCIPIOS DE DENDROCRONOLOGÍA

Según Tomazello *et al.* (2001), como cualquier otra ciencia la Dendrocronología se rige por un conjunto de principios o reglas científicas, las cuales tienen sus raíces en el año 1785 con el “Principio de uniformidad” y recientemente en el año 1987 con el “Principio de la agregación de los factores ambientales”. Algunos de estos principios se aplican específicamente para estudios dendrocronológicos, mientras que otros son comunes a muchas disciplinas.

- Principio de uniformidad: Este principio indica que los procesos físicos y biológicos que influyen en el crecimiento de un árbol en la actualidad, también estuvieron presentes en el pasado. El principio de uniformidad no quiere decir que las condiciones del pasado son exactamente iguales a las del presente, sino que similares clases de influencias afectan similares tipos de procesos (Grissino, 2001).
- Principio de los factores limitantes: De acuerdo a este principio, el proceso de crecimiento de la planta puede ocurrir sólo tan rápido como lo permita el factor que actúa como principal limitante. Cuando las condiciones son limitantes, muchos factores relacionados con el proceso de crecimiento son limitados, produciéndose menor cantidad de células, anillos estrechos y las características de las células y densidad de la madera varían en función de que factor actúa como limitante (Fritts, 1976).
- Principio de amplitud ecológica: este principio señala que las especies pueden crecer, reproducirse y propagarse a través de un rango de hábitat que puede ser amplio, estrecho o restringido (Grissino, 2001).
- Principio de crecimiento agregado: cualquier serie individual de crecimiento en un árbol puede ser “descompuesta” en un conjunto de factores agregados que afectan el patrón de crecimiento del árbol a través del tiempo. Por ejemplo: el crecimiento que se produce en un año es una función de una serie de factores agregados tales como edad, clima, ocurrencia de eventos dentro (por ejemplo, la caída de un árbol) y fuera (por ejemplo, defoliación causada por insectos) del bosque. Para maximizar la influencia de un factor ambiental en particular, los otros factores deben ser minimizados. Este principio puede ser expresado, de forma matemática, con la siguiente ecuación (McCarthy, 1998):

$$R_t = A_t + C_t + D1_t + D2_t + E_t$$

Esta ecuación expresa que cualquier anillo de crecimiento (R) formado en un determinado año (t) es una función de la tendencia de crecimiento relacionada con la edad (A), condiciones climáticas (C), factores internos del bosque que puedan afectar el crecimiento (D1), factores externos del bosque que puedan afectar el crecimiento (D2) y la acción de cualquier otro factor aleatorio (E) que no sea tomado en consideración por los anteriores.

- Principio del fechado cruzado (crossdating): es el principio básico de la Dendrocronología y consiste en asignar a cada anillo el año exacto de su formación mediante un proceso de “superposición” de la variación del ancho y otras características estructurales de los anillos de crecimiento (Kham, 1997).
- Principio de selección de sitio: los sitios útiles para la Dendrocronología pueden ser identificados y seleccionados con base a criterios que indiquen que se producirán series de anillos sensibles a las variables ambientales que están siendo examinados. Se debe seleccionar sitios que maximizaran la señal que está siendo investigada (McCarthy, 1998).
- Principio de replicación: Este principio indica que se debe tomar más de una muestra del radio del tallo por árbol y más de un árbol por sitio. Esto permite realizar comparaciones estadísticas de variabilidad entre árboles y entre grupos de árboles. Al tomar más de una serie de anillos por árbol se reduce más la tasa de variación dentro de un mismo árbol (McCarthy, 1998).
- Principio de sensibilidad: La variación del ancho de los anillos como consecuencia de la presencia de un factor limitante recibe el nombre de sensibilidad, mientras que la carencia de variación recibe el nombre de complacencia (Fritts, 1976). Los árboles muestran anillos “sensibles” cuando su crecimiento es afectado por factores tales como pendiente, suelos pobres o poca humedad, mientras que la presencia de anillos “complacientes” se produce bajo la acción de condiciones climáticas constantes tales como la alta disponibilidad de agua, suelos fértiles o crecimiento en regiones protegidas (McCarthy, 1998). Martínez (1996), señala que en los estudios de Dendrocronología se prefieren los patrones de crecimiento en donde exista sensibilidad ya que el proceso de crossdating se facilita más mientras mayor sea la variación en el ancho de los anillos.

2.3.2 EL CLIMA Y SU RELACIÓN CON LA DENDROCRONOLOGÍA (DENDROCLIMATOLOGÍA)

Inicialmente la Dendrocronología se centró en los estudios del clima. El descubrimiento de los ciclos estacionales de crecimiento de las especies tropicales y subtropicales encontró en la Dendrocronología una herramienta prometedora para el estudio de la estructura y sobre todo la dinámica de los bosques; sin embargo, el número de especies conocidas potencialmente para investigaciones dendrocronológicas es todavía pequeño, especialmente cuando se compara con la inmensa biodiversidad de estos ecosistemas (Gonçalves, 2007).

Según Fritts (1976), la Dendrocronología es uno de los métodos fundamentales para determinar la variabilidad climática posible en el tiempo; de este modo el ancho de los anillos puede ser medido fácilmente para una secuencia continua de años y estas medidas pueden ser calibradas con datos climáticos; adicionalmente, a los anillos se les puede asignar el año exacto de su formación de manera tal que la información climática puede ser ubicada, de forma precisa, en el tiempo. En este tipo de estudios se pueden establecer redes dendroclimatológicas, es decir, un conjunto de lugares de muestreo distribuidos uniformemente en un área.

2.3.3 LA DENDROCRONOLOGÍA COMO ESTIMACIÓN DEL CRECIMIENTO DE ÁRBOLES

El conocimiento del crecimiento registrado en un árbol puede ser obtenido a través de técnicas dendrocronológicas que permiten verificar como un árbol crece en diámetro y altura, y como cambia su forma a medida que aumenta el volumen siendo posible rescatar los incrementos anuales por medio de la medición de anillos de crecimiento (Chagas y Garcia, 2002). Carrillo (2008), menciona también que la técnica consiste en la reconstrucción del crecimiento e incremento que el árbol ha tenido en todas sus dimensiones, durante toda su vida o en un tiempo determinado. Brienen y Zuidema (2006), mencionan que los datos de anillos de árboles permiten estudiar el crecimiento en periodos de tiempo más largos comparados con los datos obtenidos de parcelas permanentes de muestreo.

Según Fichtler *et al.* (2004), los métodos dendrocronológicos son útiles, ya que indican la variación existente inter e intra-anual en la formación de la madera de muchas especies. El incremento en el ancho de anillo se puede ver correlacionado con factores como precipitación y

temperatura, como lo demostraron Dunish *et al.* (2003), a través del análisis de tronco de *Swietenia macrophylla* y *Cedrela odorata* donde encontraron que el cambio en la disponibilidad de agua entre los años causó al menos una parte de la variación en el incremento anual del crecimiento anillar de ambas especies.

Estudios dendrocronológicos o de análisis de tronco aplicados en la ecología de los árboles (dendroecología) permiten determinar tasas de crecimiento, producción de leño, ciclos de rotación y tasas de reposición siendo informaciones de gran importancia en manejo forestal y la sostenibilidad de bosques naturales (Tomazello *et al.*, 2001). Meza y Mora (2003), mencionan que la evaluación de los anillos de crecimiento en plantaciones forestales proporciona datos sobre el ritmo de crecimiento de las especies tanto en diámetro como en altura, además de información como, calidad de sitio, influencia de la exposición solar, raleos, etc.

A pesar que son escasos los estudios de crecimiento de árboles tropicales de bosques naturales o plantaciones a través de técnicas dendrocronológicas, la tendencia de los últimos años viene en aumento con el desarrollo de estudios de frecuencia en la formación de anillos de crecimiento y el modelamiento matemático del crecimiento en diámetro y volumen a través de ecuaciones empleando anillos de crecimiento (Giraldo y Del Valle, 2011).

2.3.4 POTENCIALIDAD DE LA ESPECIE PARA ESTUDIOS DENDROCRONOLÓGICOS

Según Goche (2007), el *Pinus patula* es una especie conífera nativa de México considerada potencial para estudios dendrocronológicos. Rodríguez (2010), cita distintos trabajos con muestras obtenidas a través del análisis de tronco y barreno Pressler donde se evaluó la expresión obtenida del ajuste de la ecuación de crecimiento “Richards modificada” para una cronología de 35 años de *Pinus patula*; el autor también menciona que utilizando datos obtenidos del análisis dendrocronológico y la medición de alturas de 23 árboles de *Pinus patula* se comparó el grado de ajuste de modelos de crecimiento para edades base de 50 años; así mismo, López (2010), probó modelos de crecimiento para generar curvas de sitio producto de la dispersión de edades y alturas generados a partir del análisis de tronco de 15 árboles de *Pinus patula*.

2.4 EL RALEO Y SU INFLUENCIA EN EL CRECIMIENTO DE ÁRBOLES

Después de la calidad de sitio, el manejo de la densidad por medio del raleo es el segundo factor en importancia para determinar la productividad de un sitio forestal. Los silvicultores utilizan esta técnica con la intención de mejorar el crecimiento y la calidad de los árboles, siendo posible la redistribución de la capacidad productiva del sitio entre los individuos que quedan en pie, los cuales tienen una mayor disponibilidad de radiación y nutrientes en el suelo. Los efectos del raleo pueden influir además en el establecimiento de individuos, la calidad del fuste y la tasa de crecimiento, al modificar las condiciones de sitio, suelo y fisiografía, (Rodríguez, 2010).

2.4.1 EFECTOS DE LOS RALEOS

La mayoría de investigaciones realizadas en raleos tratan sobre los efectos de este tratamiento sobre el crecimiento individual de los árboles o del rodal. Ruiz *et al* (1996), evaluó el efecto de distintas intensidades de raleos (0, 20, 40, 60, 80%) sobre la densidad inicial del rodal para una plantación de *Pinus caribaea* encontrando que a mayores intensidades de raleo mayores son los incrementos absolutos en diámetro, área basal y volumen, donde los dos últimos indicadores se incrementaron en forma inversa con la densidad residual del rodal, de manera que decrecieron con altos niveles de aclareos. Por otro lado, Jaakkola *et al.* (2005), evaluando *Picea abies* L. encontró que aclareos de intensidad normal ($27 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ de AB residual) y alta ($24 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ de AB residual) indujeron aumentos de 52 y 68% en el crecimiento de AB de árboles individuales, con relación a una intensidad baja de aclareo ($40 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ de AB residual). Para *Pinus patula*, Rodríguez (2010), encontró que intensidades de raleo entre 40% y 69% aumentaron el crecimiento diamétrico y de altura en 75% y 52% respectivamente, con relación al testigo.

El análisis del efecto de los raleos en árboles individuales y rodales de *Pinus patula* también permitió desarrollar estudios como la relación entre madera temprana / madera tardía y la densidad de la madera o el efecto del raleo sobre la densidad básica y los anchos de anillo (Goche, 2007); del mismo modo, se han probado modelos de crecimiento para generar curvas de índice de sitio (López, 2010); y se ha analizado la influencia del raleo en el incremento de biomasa del *Pinus patula* (Rodríguez *et al.*, 2011).

2.5 MODELOS MATEMÁTICOS DE CRECIMIENTO DE ÁRBOLES

Los modelos matemáticos constituyen las herramientas analíticas más utilizadas en la actualidad para la generación de conocimientos en el área de crecimiento y producción de masas forestales, ya que de esta forma, a través de fórmulas matemáticas que deben considerar un determinado horizonte de planeación en que ocurren procesos aleatorios, se representan los procesos biológicos que ocurren a nivel de árbol individual o del rodal completo (Ayerde, 1996). Acosta (1991), menciona que la cualidad de abarcar procesos dinámicos que implican un cambio continuo en el tiempo, ha sido uno de los puntos más relevantes para la adopción generalizada de los modelos matemáticos como una herramienta de investigación biológica, generalmente se usa el término “Modelo de Crecimiento” para hacer referencia a un sistema de ecuaciones con una predicción de crecimiento y producción de un rodal bajo una amplia variedad de condiciones. Los modelos generados durante el modelado prueban hipótesis que son una explicación clara de las presuposiciones del modelo.

2.5.1 ECUACIONES DE CRECIMIENTO

Según Kiviste *et al.* (2002), las funciones o ecuaciones de crecimiento describen las variaciones que experimentan el tamaño de un organismo o una población con la edad. El crecimiento biológico, que es el resultado de un gran número de procesos complejos, puede resumirse de una forma muy simple, particularmente cuando el organismo o población analizada es un árbol o una masa forestal.

La evolución de las características de un árbol o de una masa forestal a lo largo del tiempo, sigue usualmente un patrón definido y estable conocido como curva sigmoide, cuyas características principales son la presencia de un punto de inflexión, que coincide con el máximo crecimiento corriente de dicha variable, y una asíntota, que representa el tamaño máximo que puede alcanzar la variable (Kiviste *et al.*, 2002).

2.5.2 CARACTERÍSTICAS DESEABLES DE LOS MODELOS DE CRECIMIENTO

Kiviste *et al.* (2002), mencionan las características que deben cumplir los modelos empleados para construir las curvas de crecimiento, las principales son (i) existencia de un punto de inflexión, (ii) existencia de una asíntota horizontal, (iii) comportamiento lógico desde el punto de vista biológico y (iv) base biológica del conocimiento teórico sobre el crecimiento de la

variable dependiente analizada; otra característica deseable de los modelos de crecimiento es su flexibilidad, entendida ésta como la capacidad de ajuste a una cierta precisión para diferentes conjuntos de datos de la misma población.

2.5.3 APLICACIONES DE LOS MODELOS DE CRECIMIENTO

En los últimos años se ha venido utilizando los conceptos de modelos para ayudar a predecir o describir un aspecto dinámico de los bosques como por ejemplo el crecimiento; sin embargo, es importante considerar que el modelo según Sanquetta (1996), es una representación física o abstracta de la forma o función de entidades u objetos reales. Por ejemplo puede ser: ecuaciones matemáticas de procesos fisiológicos, Figuras o estatuas. También se puede decir que un modelo de crecimiento es una abstracción de la dinámica forestal natural, abarcando crecimiento, mortalidad y otros cambios en la composición y estructura del rodal (Vanclay, 1994). Los modelos son usados para observar las consecuencias de las predicciones que de ser hechas naturalmente serían muy complicadas, tomarían demasiado tiempo, o no podrían realizarse por razones prácticas o éticas (Moscovich , 2004).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 SELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La toma de muestras se realizó en las plantaciones forestales de la Cooperativa Agraria Atahualpa - Jerusalén, mejor conocida como “Granja Porcón” ubicada en el departamento de Cajamarca (Figura 1), presenta una extensión aproximada de 10 000 ha de bosques de pino, se localiza en la parte noroeste de la Provincia de Cajamarca a 30 Km de la ciudad del mismo nombre, entre las coordenadas UTM 766457 y 753270 Este y 9228960 y 9216997 Norte; siendo sus límites:

- Al Norte: Chaupiloma, Pucará, Muruisha y la Shioglia
- Al Sur: Porcón Alto, Chancas y Callancas
- Al Este: Minera Yanacocha y Chilimpampa
- Al Oeste: Pozo Seco, Agua Colorada y El Progreso

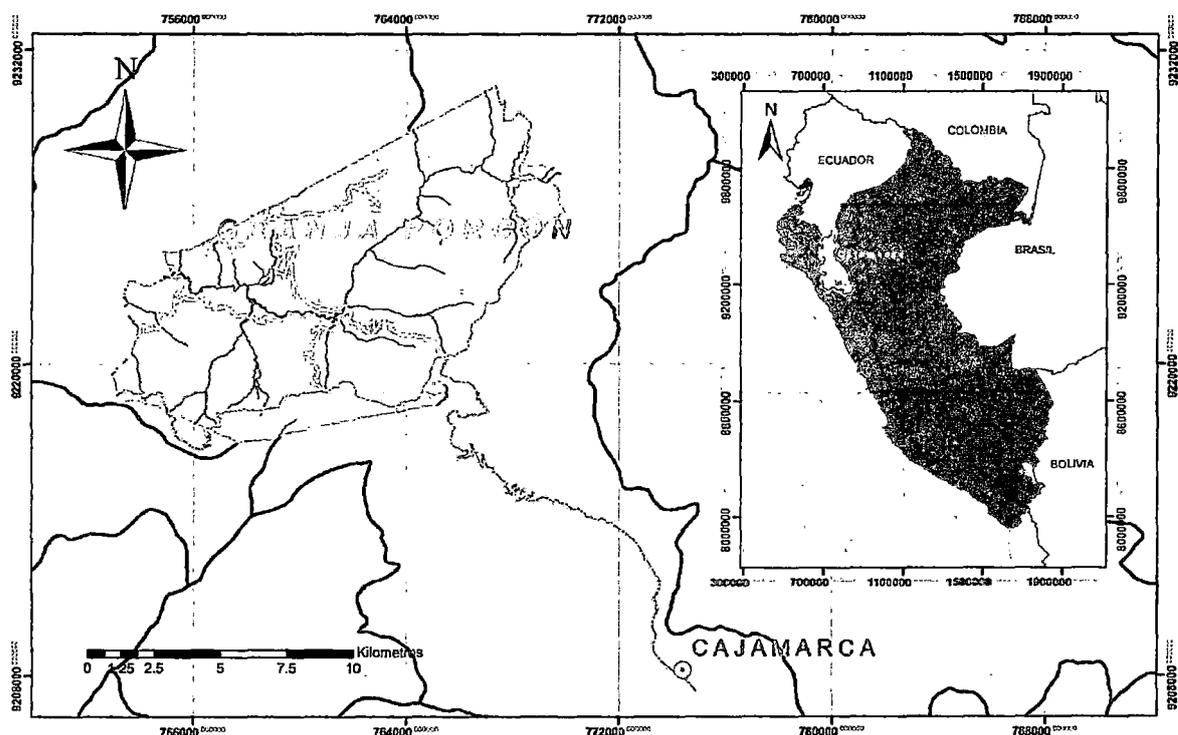


Figura 1 Ubicación de área de estudio. Granja Porcón – Cajamarca.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.1 SELECCIÓN DEL ÁREA DE MUESTREO

Las plantaciones iniciadas en el año 1984 presentan una división de unidades de manejo descritas en cuarteles, bloques y parcelas. El Plan General de Manejo Forestal (PGMF) ejecutado por ADEFOR (2005) trata de concentrar la producción de biomasa en un número adecuado de árboles, seleccionados por sus mejores características fenotípicas tales como: mayor tamaño, forma y rectitud de fuste, elevado vigor de crecimiento y buen estado sanitario; así mismo, en el PGMF se programó que algunas parcelas reciban raleos selectivos y a la vez sistemáticos a partir del año 2005 con una intensidad del 50% de los individuos inicialmente establecidos.

Para fines del estudio fueron seleccionadas dos zonas de muestreo (Figura 2):

- Parcela Cushuro con numeración 2103 perteneciente al cuartel Huanga y bloque Cushuro. Clasificada según el PGMF como una parcela ubicada en una altitud alta (3460 msnm). Área sin raleo, instalada el año 1990 con las especies *Pinus patula* y *Pinus*

muricata con espaciamento tresbolillo (distanciamiento de 3 m entre árboles y filas instaladas). Individuos de condición fitosanitaria sana, de fuste más ahusado y con mayor presencia de ramas en comparación a la parcela raleada. Se observaron algunos árboles caídos, sin embargo, se desconoce la mortalidad de la plantación.

- Parcela Enterador con numeración 4402 perteneciente al cuartel Piedrulo y bloque Enterador. Clasificada según el PGMF como una parcela ubicada en una altitud alta (3561 msnm). Área raleada el año 2005, instalada el año 1990 con la especie *Pinus patula* con espaciamento tresbolillo (distanciamiento de 3 m entre árboles y filas instaladas). Individuos de condición fitosanitaria sana, de fuste menos ahusado y con menor presencia de ramas en comparación a la parcela no raleada. No se observó árboles caídos y se desconoce la mortalidad de la plantación.

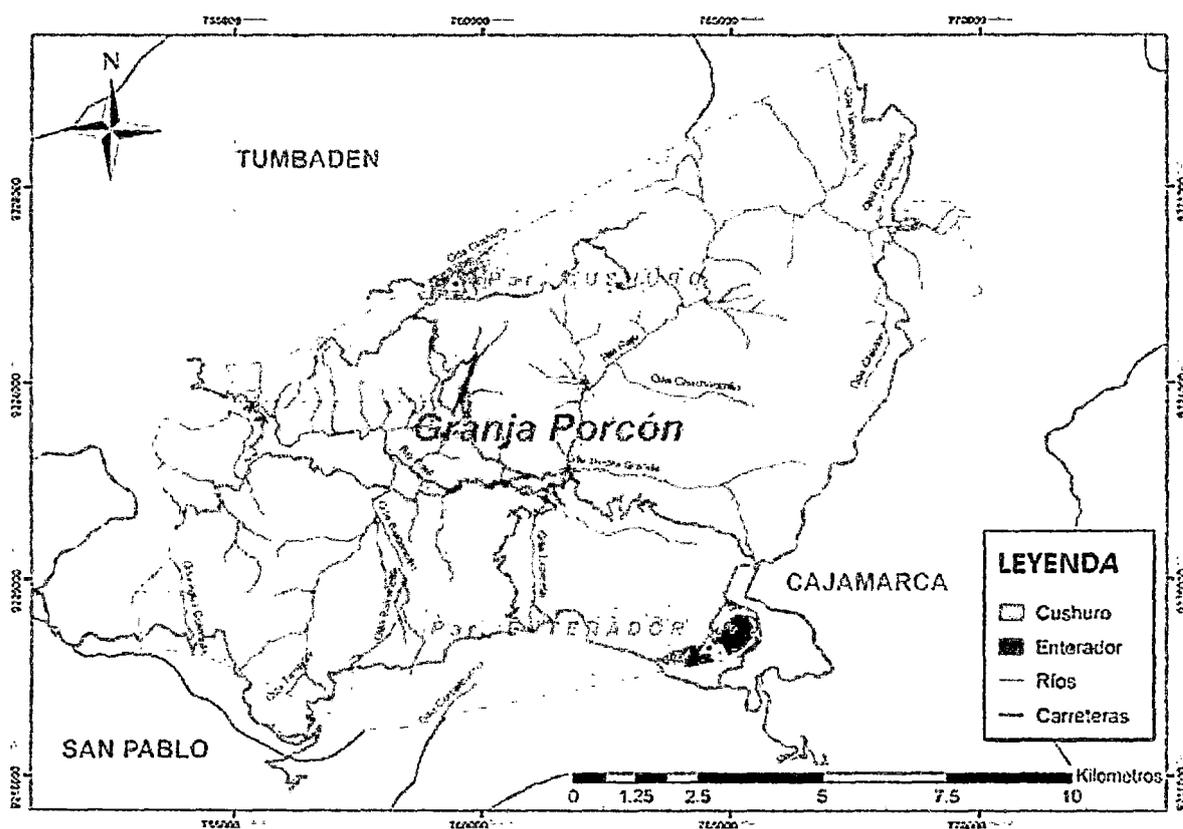


Figura 2 Ubicación de áreas de muestreo dentro de la Granja Porcón – Cajamarca.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 EVALUACIÓN DE LAS PARCELAS DE MUESTREO

Los sitios seleccionados fueron delimitados a través de la toma de puntos GPS a lo largo del perímetro a fin de verificar el área efectiva plantada por parcela (m²), con estos datos se distribuyeron de manera aleatoria 10 (zona no raleada) y 9 (zona raleada) parcelas de muestreo con una intensidad del 5%, es decir por cada hectárea una parcela de muestreo de 0.05 ha, tal como lo sugiere Murillo *et al.* (2012) (Figura 3). En estas parcelas de muestreo se midieron todas las Circunferencias a la Altura del Pecho (CAP) y alturas totales de los árboles a fin de obtener clases diamétricas y alturas promedio (Figura 4 y 5)

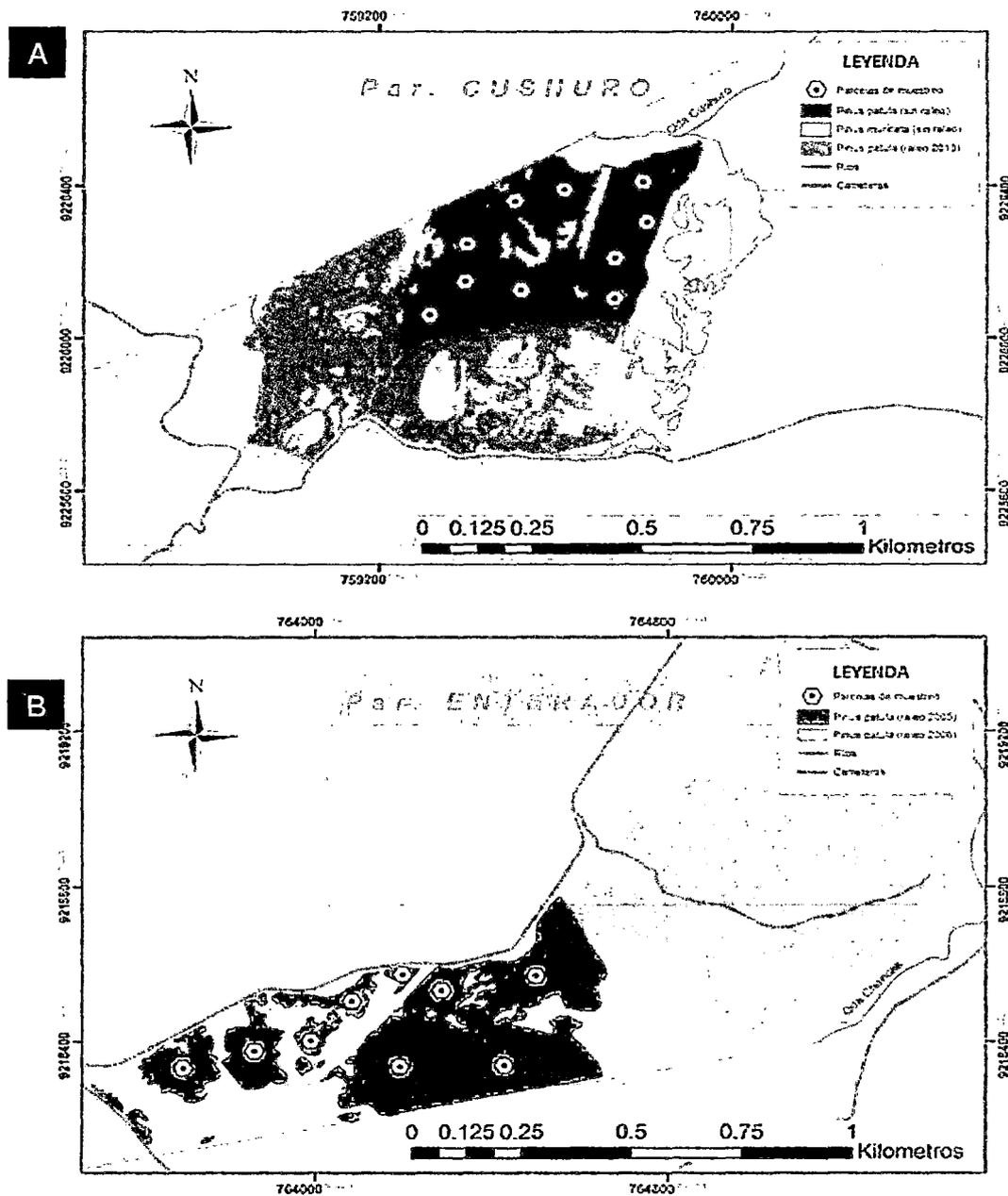


Figura 3 Distribución de las parcelas de muestreo (A) zona no raleada; (B) zona raleada.

Fuente: Elaboración propia.

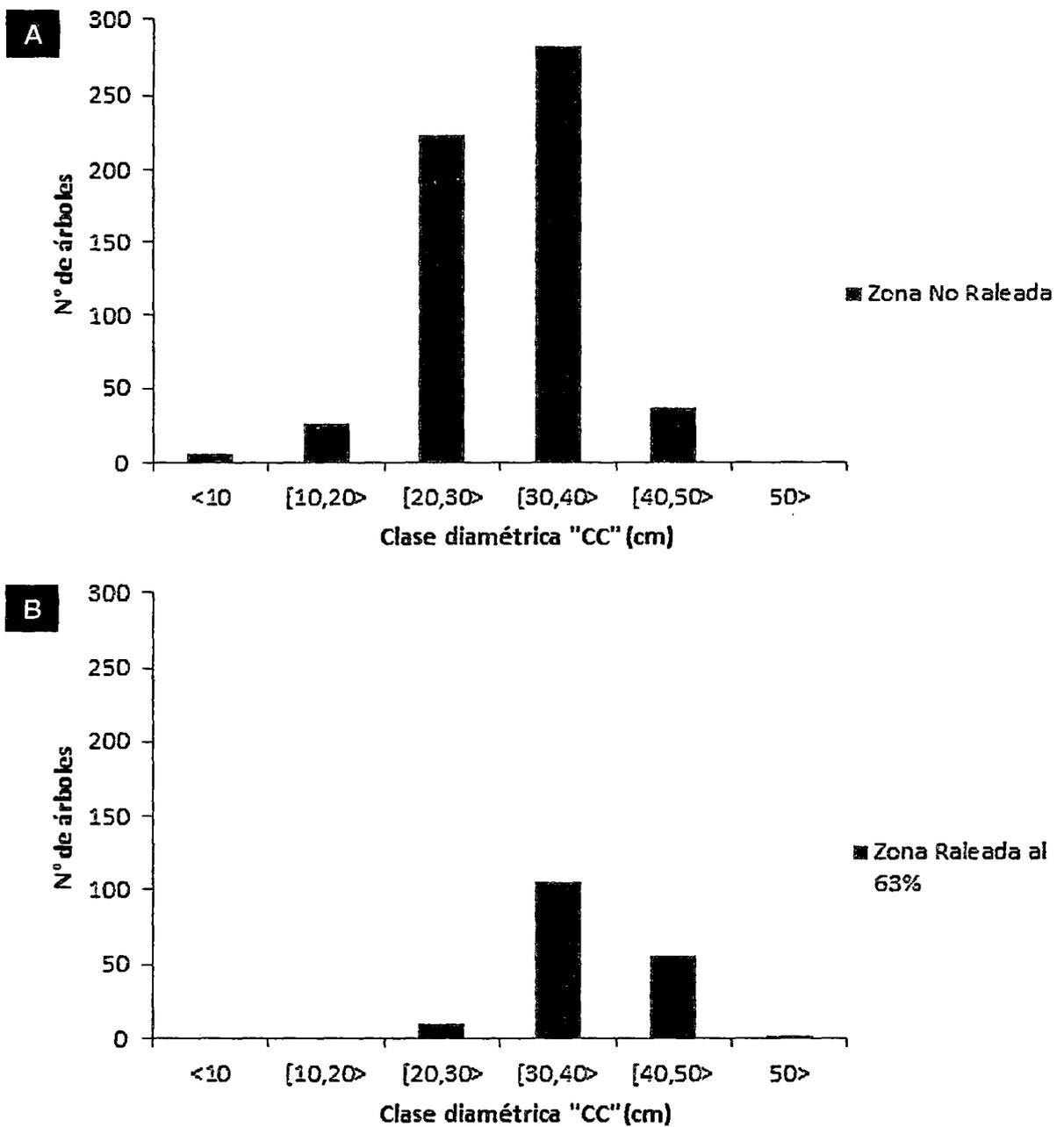


Figura 4 Histogramas de frecuencia por categoría diamétrica con corteza (CC) para el total de árboles en (A) zona no raleada; (B) zona raleada.

Fuente: Elaboración propia.

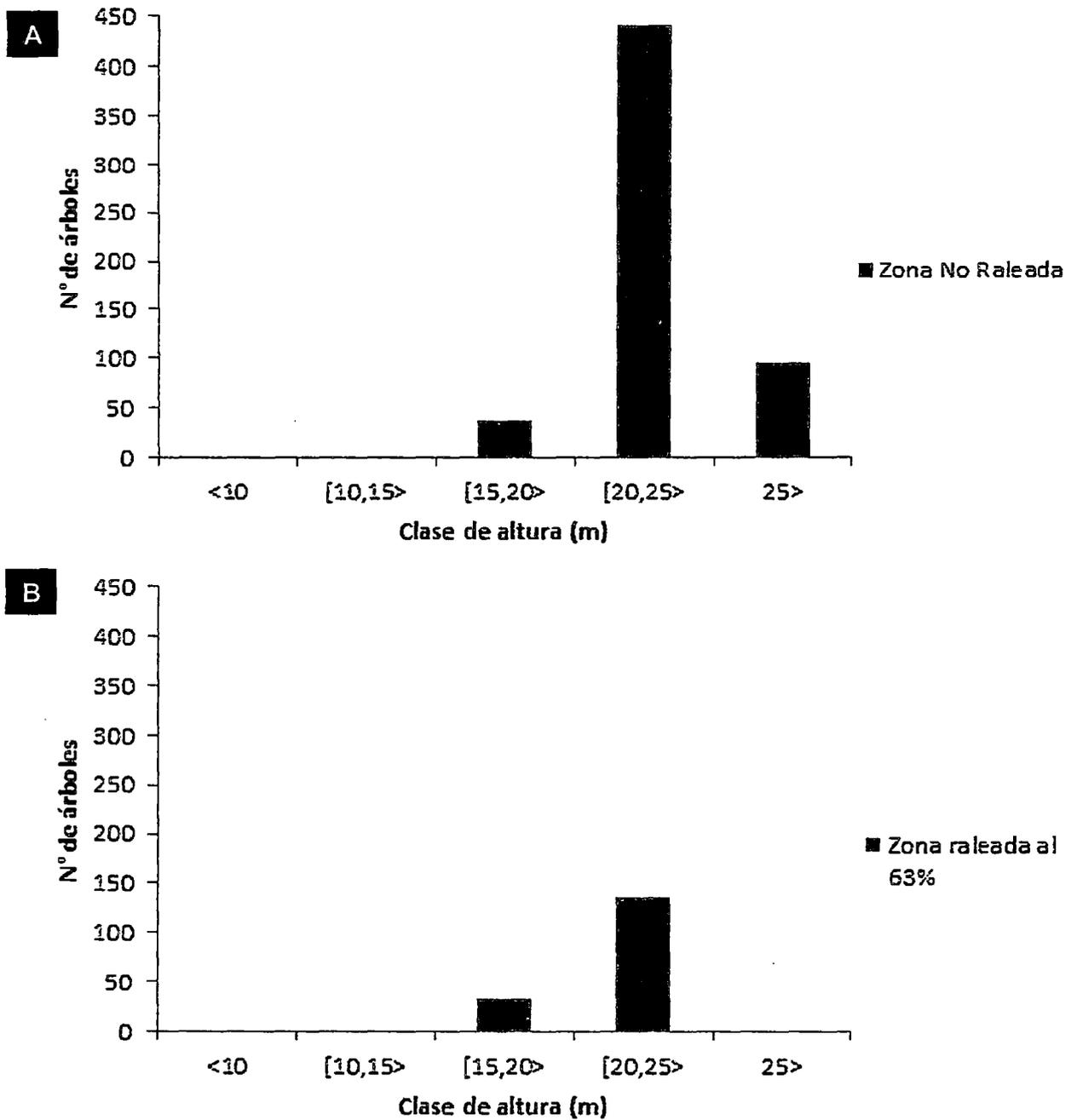


Figura 5 Histogramas de frecuencia por categoría de alturas para el total de árboles en (A) zona no raleada; (B) zona raleada.

Fuente: Elaboración propia.

3.2 DEMARCACIÓN, COLECCIÓN Y EXTRACCIÓN DE MUESTRAS

Con las clases diamétricas definidas, 10-20, 21-30, 31-40 y 41- 50 cm de Diámetro a la Altura del Pecho con corteza (DAP_{CC}) para el área no raleada y 10-20, 21-30, 31-40, 41-50 y 51-60 cm de DAP_{CC} para el área raleada y siendo el tamaño de muestra sugerido por Kitzberger *et al.* (2000) para estudios dendrocronológicos de entre 20 y 60 individuos por especie se seleccionaron y demarcaron de manera uniforme 35 árboles de *Pinus patula* de cada área. Considerando solo las clases con un porcentaje representativo de individuos y teniendo en cuenta los aspectos fitosanitarios y de sitio, finalmente se demarcaron para la zona no raleada 1 árbol de la clase 10-20 cm, 13 árboles de la clase 21-30 cm, 17 árboles de la clase 31-40 cm y 4 árboles de la clase 41-50 de DAP_{CC} y para la zona raleada 4 árboles de la clase 21-30 cm, 18 árboles de la clase 31-40cm, 11 árboles de la clase 41-50 cm y 2 árboles de la clase 51-60 cm de DAP_{CC}; la fecha de colección del material de estudio se realizó en Febrero del 2013.

Con auxilio del barreno Pressler (5,1 x 400 mm; diámetro x largo) se colectaron 3 a 4 muestras radiales del leño (distanciadas a 120° o 90° respectivamente) a nivel del DAP del tronco de los árboles seleccionados, tal como lo sugiere Rosero (2009) y Zúñiga (2012). Previo a la extracción se desinfectó el barreno con alcohol al 80% y se lubricó con aceite especial. Después se procedió a sellar los orificios generados utilizando sellante orgánico. Luego las muestras fueron codificadas y acondicionadas en sorbetes de plástico para su posterior análisis en el Laboratorio de Anatomía e Identificación de Maderas de la Universidad Nacional Agraria La Molina (Figura 6).



Figura 6 Muestreo con sonda Pressler, (A) barrenado de árbol; (B) colecta de muestra; (C) codificación y acondicionamiento en sorbetes; (D) almacenamiento de muestras para su traslado.

3.3 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE LAS SERIES METEOROLÓGICAS

Los datos meteorológicos de precipitación y temperatura mensual fueron proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI a partir de la estación

meteorológica denominada Granja Porcón localizada en el distrito de Cajamarca, Provincia de Cajamarca, Departamento de Cajamarca, con una latitud de 07°02'02", longitud de 78°37'36" y una altitud de 3261 msnm, la cual se ubica cerca de la zona de estudio; de esta estación se recopilieron los datos correspondientes al periodo entre 1990 y 2013 (Anexo 1 y 2). Así mismo, para una mejor observación de los datos meteorológicos se elaboraron histogramas de precipitación y temperatura mensual a fin de verificar su estacionalidad.

3.4 ANÁLISIS DENDROCRONOLÓGICO

3.4.1 ACONDICIONAMIENTO DE MUESTRAS DEMADERA

Las muestras radiales de madera obtenidas de los 35 árboles de *Pinus patula* de cada zona fueron encoladas en soportes de madera considerando las fibras dispuestas en sentido longitudinal y exponiendo en la parte superior la sección transversal. Dicha sección transversal fue pulida con una lijadora orbital haciendo uso de lijas de diferentes granos 120, 240, 320, 400 y 600 (grano/pulgada²), finalmente para resaltar los anillos de crecimiento se limpió la superficie aplicando aire comprimido (Figura 7).



Figura 7 Acondicionamiento de muestras, (A) muestra lista para ser encolada y soporte codificado; (B) encolado de muestra exponiendo la sección transversal de la misma; (C) lijadora orbital y lijas de diferente granulometría; (D) pulido de muestras.

3.4.2 DIGITALIZACIÓN Y MEDICIÓN DE ANILLOS DECRECIMIENTO

Pegadas las muestras en los soportes se identificaron y caracterizaron los anillos de crecimiento de *Pinus patula* basándose en la descripción macroscópica para la determinación de anillos de crecimiento (verdaderos) expuesto por Huerta (1978). En la sección transversal de las muestras radiales se demarcaron los límites de los anillos de crecimiento con auxilio de un estereoscopio (40X) marca Olympus. Luego con el uso de un escáner marca HP Scanjet 4400 c, (resolución 600 dpi) se digitalizaron las secciones transversales de los radios montados para su posterior análisis y medición (Figura 8).



Figura 8 Digitalización y medición de anillos de crecimiento, (A) demarcación de anillos de crecimiento; (B) digitalización de muestras; (C) imagen de muestras digitalizadas; (D) medición de anchos de anillos en muestras digitalizadas.

Con las imágenes digitalizadas se procedió a la medición de anchos de anillos considerados como una serie de tiempo; estas mediciones se realizaron utilizando el Programa Image Pro Plus v4.5, según la metodología propuesta por Moya *et al.* (2007) para análisis de imágenes

digitales (Figura 8d). Inicialmente se calibro de manera manual el software con el uso de una escala digitalizada mediante la unión de dos puntos que determinaron la distancia entre los mismos (precisión de 0,001mm). Luego, obtenida la medición de los anchos de anillos de crecimiento, se exportaron los valores obtenidos hacia Microsoft Office Excel para ser analizados.

3.4.3 SINCRONIZACIÓN (CO-FECHADO) DE ANILLOS DE CRECIMIENTO Y ELABORACIÓN DE LA SERIE MAESTRA

Posteriormente se realizó el crossdating o cruzado de cronologías de anillos de crecimiento de los 3 o 4 radios obtenidos de cada árbol muestreado. El control de la calidad de las mediciones de los anillos de crecimiento y la verificación de la sincronización (cofechado) fue realizado con el programa COFECHA, que analiza estadísticamente la correlación entre las porciones de las series individuales y la serie maestra verificadas de forma independiente, lo que permite identificar la existencia de falsos anillos de crecimiento o anillos faltantes para el control posterior, además permite comprobar y corregir el cofechado de las series (Holmes *et al.*, 1986).

Una vez realizada la sincronización de cada radio medido con la serie maestra (promedio de las series individuales), correlacionando segmentos de 20 años con intervalos de 5 años y determinados los errores en la medición debido a la presencia de anillos de crecimiento ausentes o falsos, evidenciados por bajas correlaciones entre las series y altas correlaciones en posiciones no fechadas dentro de la serie de anillos de crecimiento. Con ayuda del programa COFECHA, según lo expuesto por Holmes *et al.* (1986) y Grissino (2001), se suprimieron de cada serie de anillos las tendencias de crecimiento (ruido) mediante el ajuste de una función de remoción (*spline* cúbico) en la tendencia de crecimiento de los árboles de cada zona analizada, en la cual cada valor de la serie fue dividida por su valor correspondiente en la curva *spline* obtenida, con un valor de límite de respuesta-frecuencia de 50% y una longitud de serie predeterminada de 22 años. La remoción de la tendencia de las series de los anillos de crecimiento y su consecuente estandarización permitió que la señal común de las series fuera maximizada formando una serie máster que representa las series que la compone; así como resultado el software calcula las correlaciones (Pearson) entre las series individuales y la serie maestra.

Así mismo, se retiraron algunas series cuyos anillos de crecimiento no se distinguían o que presentaban correlaciones bajas con la serie maestra, entendiendo que en una colección usualmente se pueden cotejar sólo una parte de estas. Según Lara *et al.* (2000), el porcentaje de muestras varía entre 43% y 90%, dependiendo de las características de sitio. Las muestras que no cotejan normalmente provienen de árboles cuyo crecimiento ha estado fuertemente influenciado por condiciones locales (competencia, liberaciones, incendios, etc).

3.4.4 OBTENCIÓN DE CRONOLOGÍAS

Para la obtención de las cronologías de la especie en cada sitio (zona no raleada y raleada) se usó el programa ARSTAN, aplicación que pertenece al paquete estadístico llamado Dendrochronological Program Library o DPL desarrollado por Richard Holmes, del Laboratory of Tree – ring Research de la Universidad de Arizona, EEUU. Igualmente se aplicaron los conceptos de Cook y Kairiukstis (1989), quienes consideran a la serie de anillos como un agregado lineal compuesto por "señales" donde las series se estandarizan eliminando la tendencia de crecimiento del ancho de anillos, asumiendo que se trata de funciones de tamaño y edad de los árboles de *Pinus patula* y trastornos endógenos y exógenos.

La tendencia de crecimiento analizada con el programa ARSTAN, Holmes *et al.* (1986) ajusta una función de regresión a los anchos de los anillos de crecimiento. La remoción de las tendencias será realizada conforme la metodología indicada por Fritts (1976), cuyos datos fueron procesados en el índice del ancho de los anillos de crecimiento (I_i) también denominado simplemente como "Índice". Una vez obtenidas las series cotejadas, se desarrollaron las cronologías de anchos de anillos de cada zona mediante el programa ARSTAN, según lo propuesto por Cook y Holmes (1985). Éste programa realiza la estandarización de las series individuales de cada árbol, existiendo la opción de ajustarlas a diferentes curvas teóricas (recta, exponencial negativa, horizontal o spline de diferente rigidez), las cuales tratan de reproducir las tendencias biológicas del crecimiento. Mientras más rígida la curva de ajuste, se preserva un mayor porcentaje de la varianza de baja frecuencia (ondas largas) permitiendo la detección de respuestas sostenidas en el tiempo (Veblen *et al.*, 1991). Se eligió la opción de línea horizontal del programa para ambos sitios (área no raleada y raleada), opción que ajusta la curva a una regresión lineal, lo cual asegura revelar periodos de liberación (si lo hubiera), y preservar la varianza de baja frecuencia.

Dicha estandarización posee la ventaja de corregir la heterogeneidad de la variancia del ancho de los anillos de crecimiento, una vez que la desviación estándar de los índices deja de ser una función del promedio, como ocurría antes de la estandarización; por lo que los datos estandarizados (índices) se producen como un cálculo de las cronologías medias de los anillos de crecimiento, denominadas *ESTANDAR*, generadas a partir de la utilización del programa ARSTAN para la población de árboles de *Pinus patula* de cada zona a través de la media entre las series.

3.5 ANÁLISIS DENDROCLIMATOLÓGICO

Obtenidas las cronologías de la especie con el programa ARSTAN y recopilada la serie climatológica se procedió a correlacionar ambas y determinar el factor (precipitación o temperatura) que más influye en el crecimiento de la especie y su anualidad en la formación de anillos de crecimiento para cada sitio. Además se realizó un análisis con mayor detalle como lo indican Holmes *et al.* (1986), utilizando el programa RESPO, programa que analiza la respuesta de los árboles al clima mensual mediante coeficientes de correlación de Pearson.

RESPO, transforma los parámetros climáticos en componentes principales, para realizar una regresión en donde las cronologías de los árboles son variables dependientes y los parámetros climáticos son variables independientes. El resultado es una función de respuesta para cada cronología que expresa la relación independiente entre el crecimiento de los árboles y el clima. Se probó diferentes escenarios con el programa RESPO para inicio de crecimiento como por ejemplo inicio de época de lluvias (agosto) o fin de época de lluvias (mayo), seleccionando el primer escenario por describir mejor la relación del crecimiento con el clima.

3.6 ANÁLISIS DENDROECOLÓGICO

Determinadas las series cronológicas de la especie para cada sitio, se calcularon los diámetros de cada árbol con ayuda de los radios y se procedió a elaborar curvas de crecimiento acumulado por año, para determinar las respectivas tendencias de crecimiento y el modelo general de crecimiento diamétrico de *Pinus patula* en cada zona.

3.6.1 MODELAMIENTO DEL CRECIMIENTO DIAMÉTRICO

El análisis del modelo general más apropiado para describir el crecimiento diamétrico acumulado de *Pinus patula* de la plantación raleada y no raleada se determinó mediante el uso del software propuesto por Vanclay (2000) denominado *Curve Expert* en su versión profesional 2.0.2 (2013); el cual permite determinar la fortaleza de relación entre un par de valores (x, y) y mediante un análisis rápido ajusta una curva de pares de datos (edad, diámetro acumulado) donde compara automáticamente 60 modelos de crecimiento biológicos preestablecidos (Hyams, 2011).

Se probaron los modelos no lineales preestablecidos para plantaciones (Richards, Logistic, Gompertz, Weibull y Chapman-Richards) descritos por Vanclay (2000) y Giraldo y Del Valle (2011), los cuales se evaluaron a través de sus valores estadísticos como el error estándar (ES) suma de cuadrados residuales (SCR), coeficiente de determinación (r^2) y coeficiente de Akaike (ACI), seleccionando el modelo que presente un mejor ajuste para el total de datos, permitiendo hacer el modelamiento matemático de la especie en los sitios de muestreo. También se evaluaron los estadísticos para el modelo con los datos (edad, diámetro acumulado) más representativos, tal como lo proponen Clutter *et al.* (1983), verificando y eliminando los valores atípicos después del análisis gráfico de normalidad de residuales con el objetivo de probar que el modelo seleccionado sigue siendo el de mejor ajuste.

3.6.2 VALIDACIÓN DE MODELOS DE CRECIMIENTO

Para la validación independiente del modelo general, probado con 660 (zona no raleada) y 620 (zona raleada) pares de datos de edad y diámetro acumulado obtenidos de los árboles muestreados de cada zona, se tomaron al azar aproximadamente el 10% de estos datos, recalculando los coeficientes de las ecuaciones, según lo sugerido por Giraldo y Del Valle (2011). Además, se obtuvo el valor promedio del diámetro acumulado de los valores reales para cada año, y se aplicó una prueba de χ^2 con el fin de determinar si existían diferencias estadísticas entre los diámetros promedios de esta muestra (esperados) y los estimados con el modelo (teóricos).

3.6.3 DETERMINACIÓN DE LA TASA DECRECIMIENTO

Determinados y validados los modelos de crecimiento de la especie se procedió a elaborar curvas de crecimiento diamétrico acumulado por año, haciendo uso de las ecuaciones y los coeficientes calculados para cada zona obteniendo valores de media, máxima, mínima y desviación estándar del crecimiento. Finalmente, siguiendo la metodología planteada por Bogino y Villalba (2008) se determinó el incremento corriente anual (ICA) y el incremento medio anual (IMA) con las siguientes formulas:

$$ICA = (r_i - r_{i-1})$$

$$IMA = r_i / i$$

Donde "r" representa el ancho del anillo en el año i.

Posteriormente se obtuvieron las curvas ICA e IMA para los dos sitios evaluados. De este modo se comparó la tasa y la tendencia de crecimiento del área no raleada y raleada, así como se verificó la influencia de la intervención de raleo en la plantación de *Pinus patula*.

3.7 ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE MADERA COMERCIAL

Analizado el crecimiento se procedió al cálculo y la comparación de la producción de madera comercial (m³/ha) entre ambas zonas. Para esto se debe distinguir la diferencia entre los términos incremento y producción, los cuales son más evidentes cuando se comparan los resultados de dos plantaciones o bosques. Klepac (1983), sostiene que cuando se habla del incremento del árbol(es) se refiere a su crecimiento diamétrico, de altura o su volumen, pero cuando se habla de producción se refiere a cuanto volumen o biomasa se encuentra en un espacio y tiempo definido, entendiéndose este concepto desde un punto de vista de manejo forestal donde se debe tratar separadamente la producción de una parcela definida (plantación o bosque) y el incremento que experimentan sus individuos.

3.7.1 OBTENCIÓN DE LOS VOLÚMENES COMERCIALES REMANENTES PARA CADA ZONA

Haciendo uso de las CAP y alturas totales medidas a cada uno de los árboles muestreados tanto en la zona no raleada como en la zona raleada (tal como se menciona en el punto 3.1.2 de la

metodología) se determinaron los valores de volumen comercial para cada árbol mediante la aplicación de la fórmula utilizada por ADEFOR (2005):

$$V_c = 1,68 * 10^{(-2)} + 2,776 * 10^{(-6)} * CAP^2 * (Ht - 3)$$

Dónde:

- a) Vc: Volumen Comercial
- b) CAP: Circunferencia a la Altura del Pecho
- c) Ht: Altura total

Estos volúmenes comerciales fueron promediados para cada parcela de muestreo determinándose finalmente el valor del volumen comercial remanente para cada zona en m³/ha. (Anexo 4).

3.7.2 DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

Obtenidos los valores de volúmenes remanentes para cada zona se determinó la producción (m³/ha) teniendo en cuenta lo señalado por Chagas y Garcia (2002), quienes mencionan que para el caso de las parcelas sin intervención el valor de producción es igual al volumen remanente, mientras que para el caso de una zona donde se hayan llevado a cabo raleos o cortas la producción es igual al volumen remanente sumado con el volumen raleado o cortado. Cabe señalar que para el presente estudio no se consideró la producción neta sino la producción líquida, ya que no se contaba con valores de mortalidad de ninguna de las dos zonas. Ejemplificando:

$$1^\circ P = V_r \text{ (Zona no raleada)}$$

$$2^\circ P = V_r + C \text{ (Zona raleada)}$$

Dónde:

- a) P: Producción Líquida (sin considerar Mortalidad)
- b) Vr: Volumen remanente

c) C: Volumen raleado o cortado*

*Para el presente estudio el valor de volumen comercial de la parcela Enterador (4402) fue extraído de los resúmenes del Inventario Forestal realizado en las plantaciones de la Granja Porcón descrito en el PGMF, ADEFOR (2005).

Finalmente se procedió a la comparación de la producción de madera comercial (m^3/ha) de *Pinus patula* entre la zona no raleada y raleada.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ANÁLISIS DENDROCRONOLÓGICO

4.1.1 VARIABILIDAD DEL ANCHO DE LOS ANILLOS DE CRECIMIENTO

La comparación de las muestras radiales de madera de los árboles de *Pinus patula* de la zona no raleada y raleada (Figura 9) revelan una variabilidad caracterizada por la secuencia de anillos de crecimiento más anchos y estrechos. Esta variabilidad en el incremento radial indica la sensibilidad de los árboles de *Pinus patula* a las condiciones locales de crecimiento así como a las climáticas; por lo tanto se puede argumentar que los anillos de crecimiento funcionan como identificadores de eventos climáticos y ecológicos y en consecuencia presentan un potencial para la aplicación de estudios dendrocronológicos.

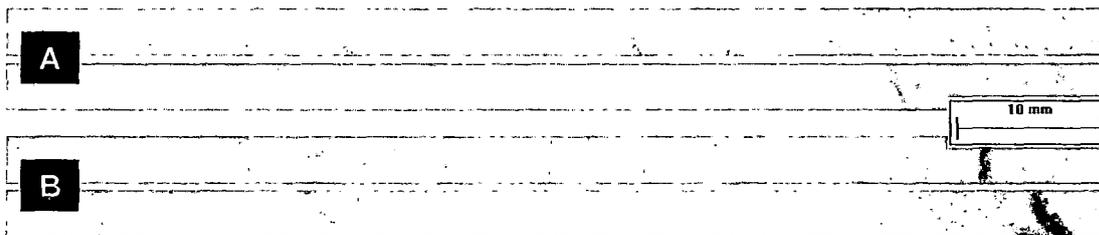


Figura 9 Variabilidad del ancho de los anillos de crecimiento en radios de la (A) zona no raleada; (B) zona raleada.

4.1.2 SINCRONIZACIÓN (CO-FECHADO) DE LOS ANILLOS DE CRECIMIENTO (CONTROL DE CALIDAD DE LAS SERIES DE LOS ANILLOS DE CRECIMIENTO)

Verificada la variabilidad de los anillos de crecimiento de *Pinus patula* se realizaron las mediciones de anchos de anillos construyéndose las respectivas series individuales para la zona no raleada y raleada. Se puede observar que existe una señal común entre las series de cada zona y una tendencia a la disminución del ancho de anillo conforme aumenta la edad de los árboles (Figura 10). Goche *et al.* (2003), señala que la disminución del ancho de anillo en árboles de plantaciones es atribuido a la competencia por luz y nutrientes del suelo.

Así mismo en árboles de la zona raleada se puede distinguir un incremento particular en el ancho de anillo del año 2006 (un año después de efectuado el raleo a una intensidad del 63%). Goche *et al.* (2003), atribuye este incremento acelerado principalmente a que los cambios climáticos y la humedad edáfica afectan de manera más significativa el crecimiento de los anillos después del raleo, menciona además que incrementos no significativos pueden deberse a las bajas intensidades de raleo (15%) y la madurez de la plantación.

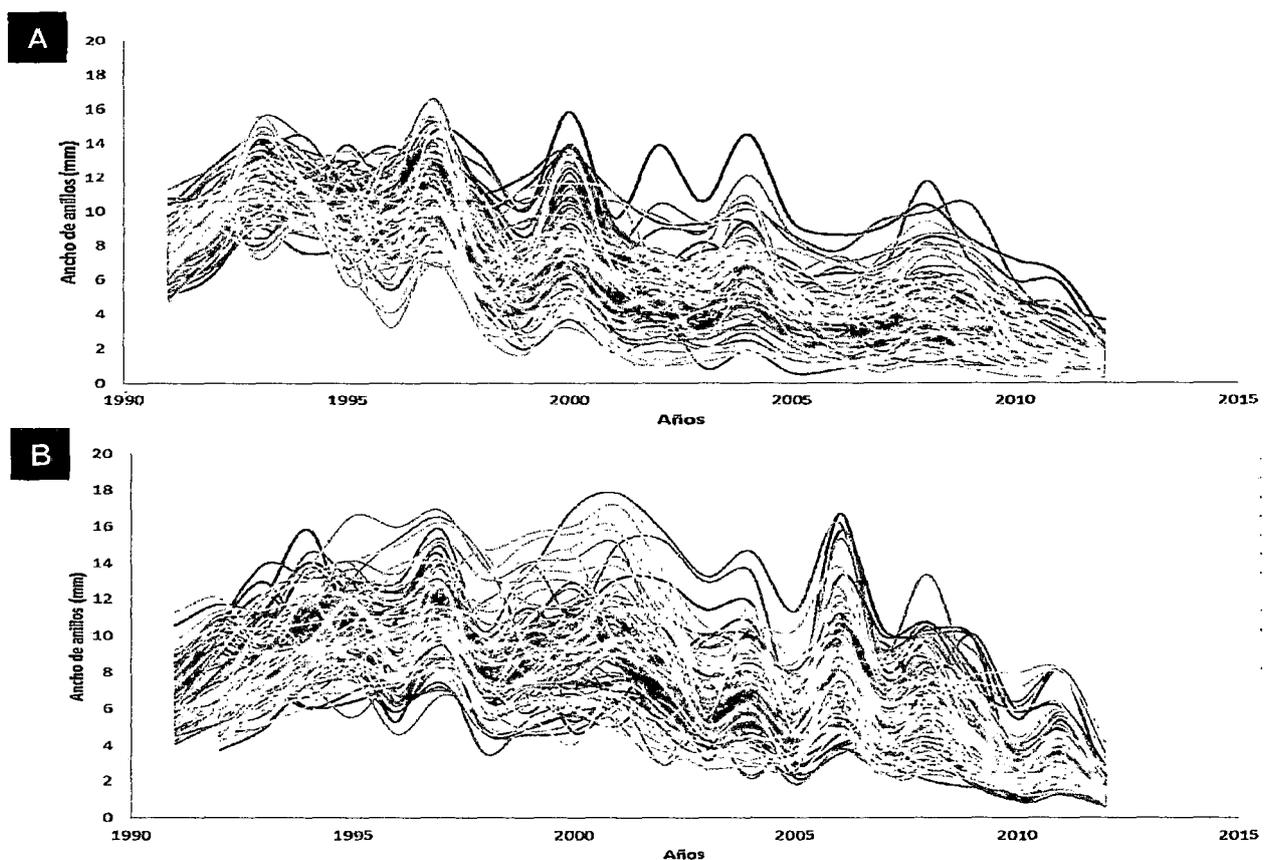


Figura 10 Series individuales de ancho de anillos (A) árboles de zona no raleada; (B) árboles de zona raleada.

Identificados los errores de medición, por causa de anillos de crecimiento falsos o ausentes, evidenciados por las bajas correlaciones entre las series y altas correlaciones en posiciones no datadas dentro de las series de anillos de crecimiento, se excluyeron del análisis aquellas series que no llegaban al nivel de correlación crítico de significancia (Pearson 99%). De esta

manera la señal común de las series restantes (Anexo 1 y 2) fue maximizada formando una serie maestra sólida para la zona no raleada y raleada que representa el comportamiento similar entre las series individuales de cada zona (Figura 11). Rosero (2009), indica que la transformación de los valores de ancho de anillos de crecimiento en índices (o series maestras) reduce la variabilidad de la tendencia de crecimiento de las series individuales.

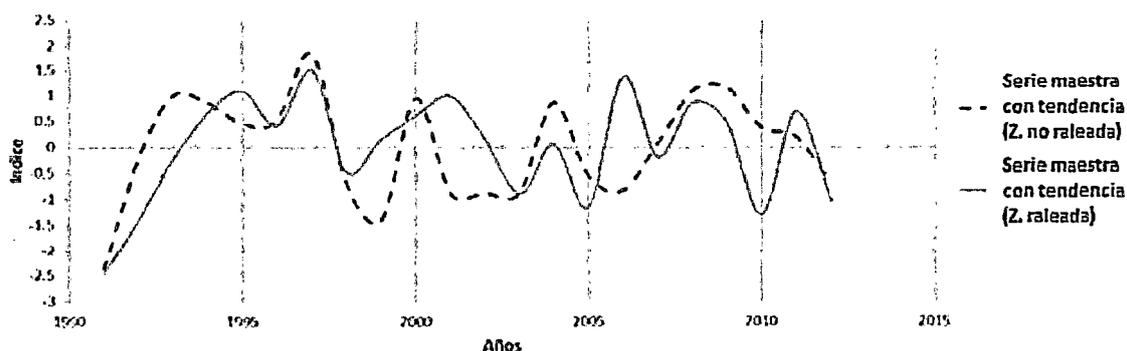


Figura 11 Series maestras obtenidas con el programa COFECHA, zona no raleada (línea punteada) y zona raleada (línea continua).

Finalmente de los 35 árboles de *Pinus patula* de cada zona (98 y 108 series individuales respectivamente), solo 34 árboles (89 series individuales) y 33 árboles (99 series individuales) presentaron una inter-correlaciones (Pearson al 99%) significativas de 0,697 y 0,693 para la zona no raleada y raleada respectivamente, esto indica la existencia de características comunes (coincidencias) evidenciando una señal común en los árboles datados de cada sitio estudiado (Cuadro 1).

Cuadro 1 Control de calidad de las series ejecutadas por el programa COFECHA.

Especie (condición)	N° de Árboles (series)		N° total de anillos observados	Intercorrelación Media	Intercorrelación Crítica COFECHA
	Antes	Después			
<i>P. patula</i> (no raleado)	35 (98)	34 (89)	1958	0,697	0,515
<i>P. patula</i> (raleado)	35 (108)	33 (99)	2325	0,693	0,515

4.1.3 OBTENCIÓN DE CRONOLOGÍAS DE LA ESPECIE

Determinadas las series maestras se realizó el análisis anillar de la plantación no raleada y raleada con ayuda del programa ARSTAN, donde se determinó la cronología final para cada zona (Figura 12). El objetivo de producir cronologías, a diferencia de las series individuales, es determinar el comportamiento en el crecimiento de un grupo de individuos; punto importante en aplicaciones de reconstrucción de disturbios (raleos por ejemplo) ya que el comportamiento del grupo versus los patrones individuales permiten diferenciar eventos de daño individual (solo para un árbol) de disturbios a mayor escala (toda la plantación).

En estudios de reconstrucción de disturbios en el crecimiento como es el caso del raleo, las respuestas son sostenidas en el tiempo, particularmente cuando la severidad del disturbio involucra grandes aperturas del dosel. En estos casos el ajuste de las series individuales (estandarización) con líneas horizontales coincidentes con la de crecimiento medio de la serie (relación entre el crecimiento y valor ajustado que produce un índice adimensional siendo su media igual a 1) ha demostrado ser el método más adecuado para revelar periodos de liberación, tal como lo indican Veblen *et al.* (1991). Se puede observar en la cronología de la zona raleada, que años posteriores al 2005 (periodo después de raleo) se presenta un incremento en los índices de ancho de los anillos, distinguibles gracias a la estandarización con línea horizontal, la cual mostró de mejor manera el efecto del raleo a largo plazo.

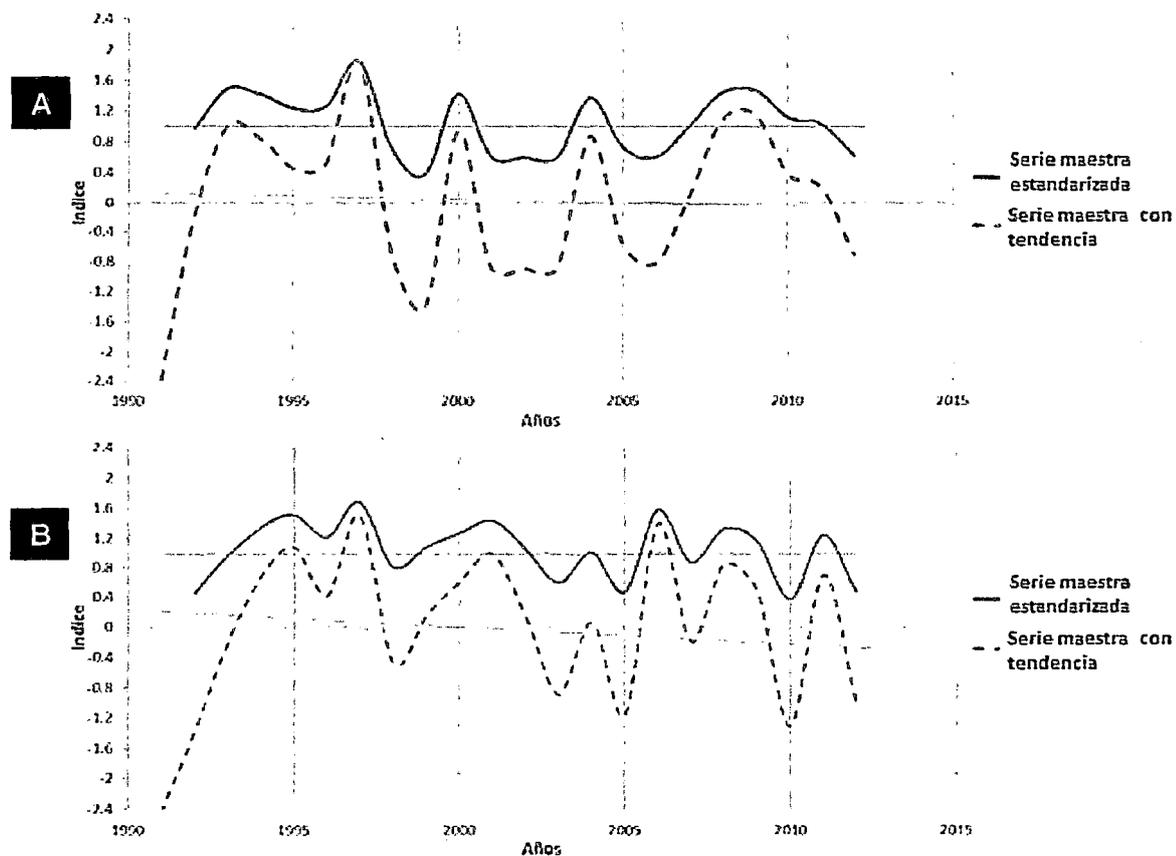


Figura 12 Series cronológicas después de la remoción de tendencias con el programa ARSTAN (estandarización) (A) zona no raleada; (B) zona raleada.

4.2 ANÁLISIS DENDROCLIMATOLÓGICO

4.2.1 VARIABLES CLIMÁTICAS Y SU CORRELACIÓN CON LAS CRONOLOGÍAS DE CADA ZONA

Para conocer la correlación de los datos climatológicos con la cronología de la zona no raleada y raleada se analizaron los valores meteorológicos de precipitación acumulada mensual y temperatura promedio mensual registrados por la estación Granja Porcón (3261 msnm) en el periodo de 1990-2013. (Anexo 3). Se elaboró la gráfica de las condiciones climáticas (Figura 13), la cual según Giraldo y Del Valle (2011), es útil para la interpretación del clima de una región en términos ecológicos. Se puede observar que existe una variabilidad marcada en la precipitación mensual en comparación a la temperatura que se mantiene constante todo el año, siendo los meses de junio, julio y agosto los meses

ecológicamente secos ($pp < 50$ mm) mientras que de octubre a mayo los meses ecológicamente húmedos ($pp > 100$ mm).

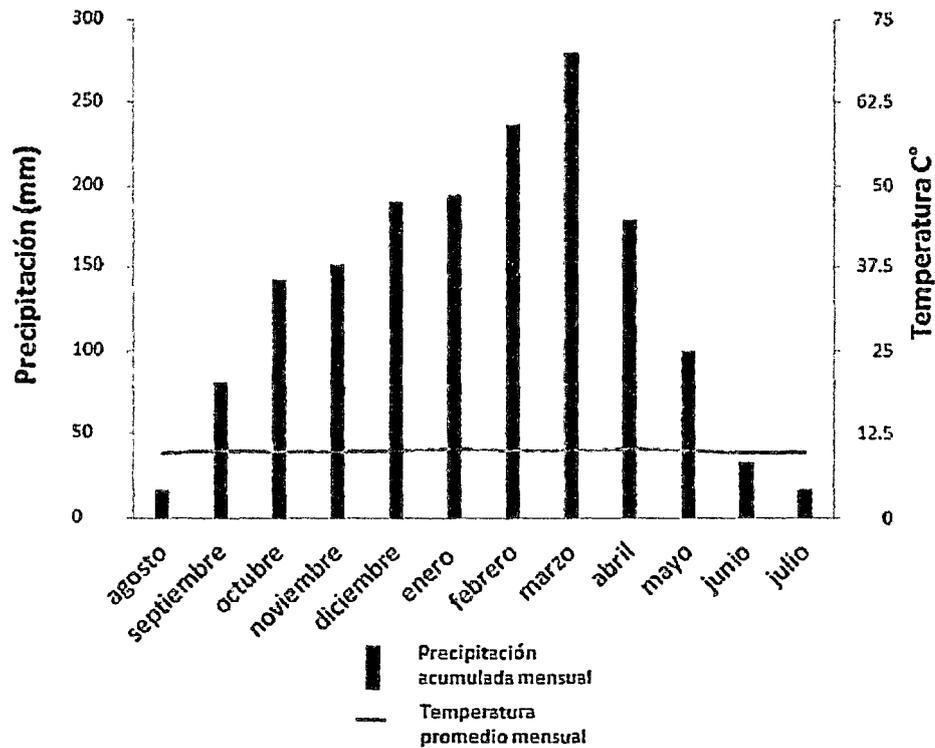


Figura 13 Temperatura y Precipitación mensual registradas en la Estación Granja Porcón (periodo 1990-2013).

Al realizar el análisis de la correlación entre la serie cronológica de los árboles de *Pinus patula* y los datos de precipitación registrados en la zona de la Granja Porcón desde el año 1990 hasta el 2013 se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson significativa y positiva de $r = 0,55$ y $r = 0,38$ para la zona no raleada y raleada respectivamente, en tanto, cuando se hace una correlación entre la temperatura registrada en la misma fecha se obtuvo un coeficiente de correlación Pearson no significativo y negativo de $r = -0,14$ y $r = -0,23$ para la zona no raleada y raleada respectivamente, ambos análisis con un nivel de confianza de 95%.

El coeficiente de correlación significativo y positivo entre la precipitación y la series cronológicas de ambas zonas indica que la precipitación anual acumulada, a diferencia de la

temperatura, es un factor limitante en el crecimiento de los árboles e influye fuertemente en la formación de anchos de anillos, tal como se observa en la Figura 14 donde la formación de anillos de crecimiento anchos y estrechos se presentan como respuesta de la periodicidad a una mayor y menor actividad cambial producto del efecto de la precipitación. Dunish *et al.* (2003), realizando estudios de eco-fisiología en árboles de *Cedrela odorata* y *Swietenia macrophylla* demostraron que las especies responden sensiblemente a condiciones locales de agua y demanda de nutrientes indicando una alta sensibilidad de las cronologías posiblemente a variaciones de micro sitio de las zonas estudiadas.

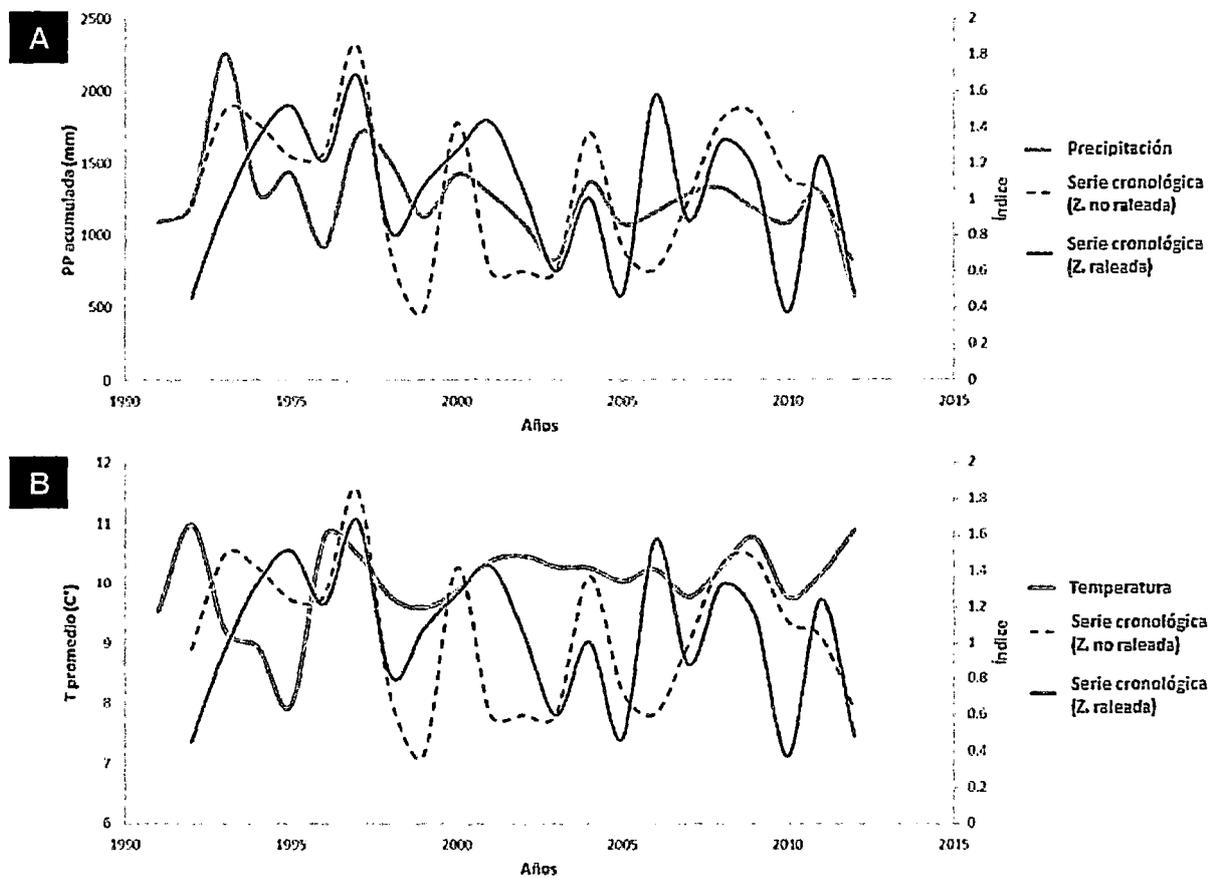


Figura 14 (A) Precipitación anual acumulada (mm) y (B) Temperatura promedio anual (C°) versus las series cronológicas de la zona no raleada (línea punteada) y raleada (línea continua).

Torres y López (2009), señalan que el aporte de precipitación horizontal o neblina incrementan las entradas de agua a ecosistemas de jalca (zona donde ecológicamente se

encuentran las plantaciones) generando una variabilidad en la precipitación producto de la orientación de este ecosistema hacia las masas de aire húmedo provenientes del Pacífico; sin embargo, para el presente estudio estos datos de precipitación horizontal o neblina no se tomaron en cuenta por falta de registro en la zona de la Granja Porcón.

4.2.2 RESPUESTA CLIMÁTICA EN EL CRECIMIENTO DE LA ESPECIE

Para encontrar las relaciones existentes entre el crecimiento de los árboles de cada zona y los factores climáticos se utilizó el programa RESPO, donde se correlacionaron las cronologías obtenidas por el programa ARSTAN y las variables climáticas precipitación mensual acumulada y temperatura media mensual para los últimos 23 años respectivamente, obteniéndose como principal resultado que la precipitación en el mes de enero del año corriente (t) influye de manera positiva y significativa en el crecimiento de los anchos de anillo de los árboles de la zona no raleada, mientras que en la zona raleada los meses de noviembre y diciembre de un año anterior (t-1) influyen de manera negativa y significativa en el crecimiento de los anchos de anillo tal como se muestran en el cuadro 2 y la figura 15.

Cuadro 2 Coeficiente de correlación Pearson entre índices de anchos de anillos (cronologías máster) y valores mensuales de precipitación acumulada (mm) y temperatura media (°C).

		Zona No Raleada		Zona Raleada	
		Precipitación	Temperatura	Precipitación	Temperatura
Mes		Correlación Pearson	Correlación Pearson	Correlación Pearson	Correlación Pearson
Año anterior (t-1)	A (-1)	0.120	-0.128	-0.257	-0.109
	S (-1)	0.069	0.129	0.147	-0.140
	O (-1)	0.056	0.147	0.053	0.029
	N (-1)	-0.094	0.095	-0.398	-0.071
	D (-1)	-0.240	0.110	-0.333	-0.061
Año corriente (t)	E	0.464	-0.133	0.133	-0.039
	F	0.262	0.095	0.106	-0.158
	M	0.275	-0.170	0.012	-0.089
	A	0.135	-0.090	-0.240	-0.194
	M	0.183	-0.079	-0.030	-0.151
	J	-0.275	-0.030	-0.236	-0.133
	J	-0.100	-0.179	0.131	-0.023
	A	0.136	-0.268	0.171	-0.131

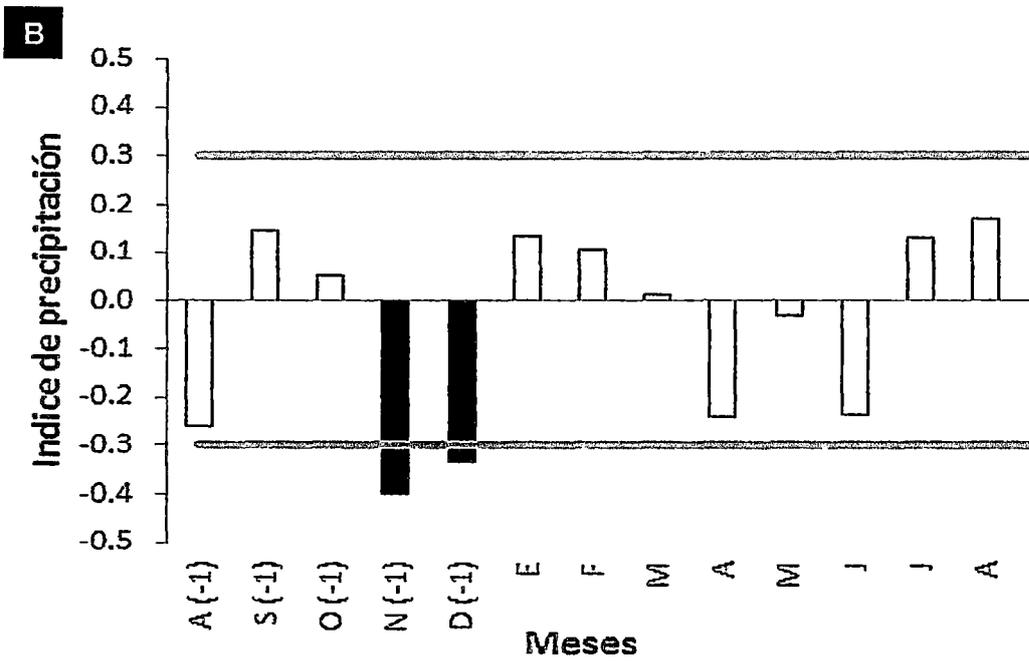
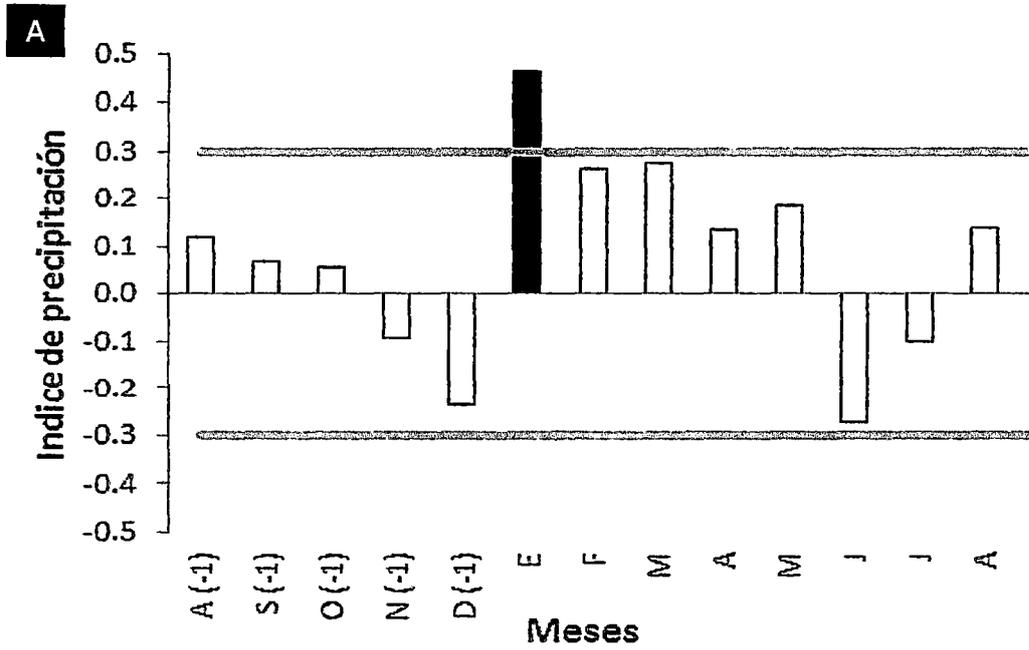


Figura 15 Correlaciones entre los índices de anillos de crecimiento con la variable climática precipitación media mensual (A) zona no raleada; (B) zona raleada.

Para explicar los resultados obtenidos para la especie *Pinus patula* de la zona no raleada y raleada debe entenderse que para el Hemisferio Sur el año dendrocronológico no coincide con el año calendario, dado que la estación de crecimiento es compartida por dos años: se inicia en septiembre-octubre del año t-1 y finaliza en febrero-marzo del año t, relacionados al inicio y cese de las precipitaciones respectivamente. En este caso por convención, el año dendrocronológico corresponde al año en que el crecimiento se inició (t-1) (Schulman, 1956). Para ambas zonas analizadas el crecimiento se inicia en el mes de Septiembre del año t-1.

Considerando esto se puede entender que para la zona no raleada donde la correlación con la precipitación del mes de enero del año corriente (t) se presenta positiva, los incrementos en anchos de anillo serán mayores y consecuentemente el crecimiento se verá favorecido por una mayor cantidad de agua. Rosero (2009), menciona que la época de inicio de las temporadas de lluvias está relacionada por el aumento gradual del agua en el suelo producto de las precipitaciones y que después de 2 a 3 meses de lluvia ayuda al árbol a superar los niveles críticos y lograr mantener un balance positivo de agua, permitiendo de esa manera utilizar todos los nutrientes almacenados producto de la fotosíntesis, en los meses de latencia dando lugar así al inicio del crecimiento.

En tanto para la zona raleada las correlaciones negativas con la precipitación en los meses de noviembre y diciembre del año anterior (t-1) representan un factor que dificulta el crecimiento por ende cuanto mayor es la precipitación en esos meses, se producirán bajos valores en el incremento de anchos de anillo. Fortuna (2007), menciona que si se presenta un aumento no gradual en la cantidad de lluvia en los meses de superación de los valores críticos, que se traduce en una saturación del suelo, este exceso de agua actúa como un factor que dificulta el crecimiento y por ese motivo la correlación en esos meses será negativa; además, señala que la acumulación excesiva de agua en el suelo perjudica el desarrollo de nuevas raíces y consecuentemente el crecimiento diametral, siendo mayor el efecto en suelos con poco drenaje.

4.3 ANÁLISIS DENDROECOLÓGICO

4.3.1 CRECIMIENTO DIAMÉTRICO

Identificada la influencia anual de la precipitación sobre la cronología de la especie se elaboraron las curvas de crecimiento acumulado en diámetro utilizando todos los árboles tanto de la zona no raleada como de la zona raleada (Figura 16). Se observa que los árboles muestreados presentan tendencias de crecimiento diferentes pese a que las muestras provienen de un mismo lugar y presentan la misma edad, distinguiéndose algunos individuos con mayor crecimiento acumulado en cada una de las zonas. Valerio y Salas (1998), indican que se debe tener presente que el crecimiento total es la suma del crecimiento de los individuos, siendo resultado del efecto de las características genéticas de la especie, el vigor (su capacidad intrínseca para aprovechar los recursos disponibles), la etapa de desarrollo de los árboles (edad), el sitio (disponibilidad de agua, minerales, luz, y temperatura) y el manejo referido a la competencia (liberaciones o raleos).

Así mismo en todas las curvas de la zona raleada se identificó una inflexión en el año 16 (2006) un año después de efectuado el raleo (Figura 16b), observado como un punto no sincronizado entre la cronología de la zona y la serie de precipitación (Figura 14a); lo cual indica que la intervención silvicultural representa un disturbio a mayor escala, afectando todos los árboles evaluados por clase diamétrica. Los resultados coinciden con Louman *et al* (1999), quienes destacan que los tratamientos silviculturales propician una respuesta en términos de incremento en el crecimiento de los árboles individuales y del rodal; en este sentido se ha observado que el crecimiento individual es mayor conforme aumenta la intensidad del tratamiento, ya sea aprovechamiento, liberación, refinamiento, raleo, etc. Además, Nalvarte *et al* (1993), mencionan que con estas operaciones se incrementa la proporción original de los individuos de interés, ya que se favorece el desarrollo de aquellos que son sanos y bien conformados.

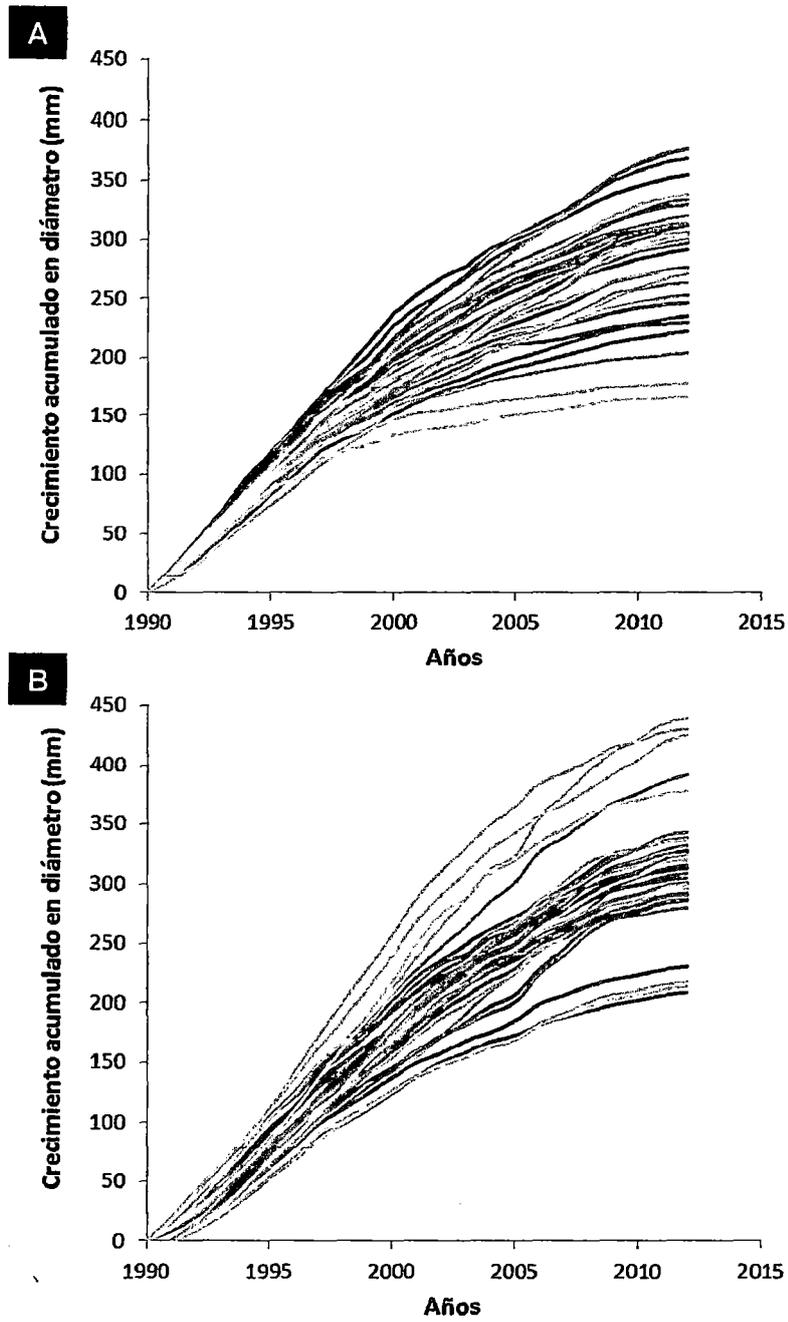


Figura 16 Tendencias de crecimiento acumulado en diámetro de los árboles de *Pinus patula* (A) zona no raleada; (B) zona raleada.

4.3.2 MODELAMIENTO DEL CRECIMIENTO DIAMÉTRICO

Descritas las curvas de crecimiento de todos los árboles en cada una de las zonas; se seleccionó el modelo de crecimiento en diámetro que mejor describe el desarrollo de los árboles de la zona no raleada y raleada, para ello se probaron cinco modelos no lineares preestablecidos para plantaciones descritos por Vanclay (2000) y Giraldo y Del Valle (2011), seleccionándose el modelo Chapman-Richards para ambas zonas por presentar menores valores de coeficiente de Akaike (AIC), error estándar (ES) y suma de cuadrados residuales (SCR) y un mayor valor de coeficiente de determinación (r^2) (Cuadro 3). Vanclay (1994), menciona que los modelos de crecimiento asisten a los investigadores de muchas maneras; algunos importantes usos incluyen la habilidad para predecir el rendimiento futuro y para explorar opciones silviculturales.

Si bien el modelo Chapman-Richards describe mejor el crecimiento, tanto en la zona no raleada como en la zona raleada se observa cierta variabilidad para explicar el total de los datos de edad y diámetro acumulado (Figura 17), reflejada además en el patrón de normalidad improbable de los residuales de la zona no raleada ($p=0,99\%$) y el bajo patrón de normalidad no improbable de los residuales de la zona raleada ($p=54,85\%$) (Figura 19). Clutter *et al.* (1983), señalan que puede existir un error en la selección del modelo si este no se analiza con los datos más representativos de las series muestreadas y se comprueba gráficamente la normalidad de sus residuales; por ese motivo, se evaluaron los estadísticos con los valores de edad y diámetro acumulado más representativos de cada zona (Figura 18), siendo nuevamente el modelo Chapman-Richards el que mejor se ajusta al crecimiento de los árboles (Cuadro 4), al presentar un coeficiente de determinación (r^2) de 0,94 para la zona no raleada y 0,97 para la zona raleada, lo cual refleja la capacidad del modelo para explicar casi el cien por ciento de los datos de edad y diámetro en cada una de las zonas; así mismo, la distribución de residuales para el modelo ajustado, verificados y eliminados los valores atípicos, mostró un patrón de normalidad no improbable de $p=87,30\%$ y $p=72,71\%$ para la zona no raleada y raleada respectivamente (Figura 20).

La utilidad del presente modelo es ayudar a explicar que sucedió, que sucede o que puede suceder en el futuro de las plantaciones, identificando el efecto del raleo en la tasa de crecimiento. Siendo el modelo resultado de un método con énfasis en la calidad de ajuste de los datos y de las predicciones, tal como lo indica Sanquetta (1996).

Cuadro 3 Modelos probados para el total de series de datos de edad y diámetro acumulado, con sus respectivos estadísticos y coeficientes de la ecuación.

	Nombre	Ecuación	ES	r ²	SCR	GL	AIC	a	b	c	d
Zona no Raleada	Chapman-Richards	$Da=ax[(1-bxe^{(-cxEdad^d)})]^{1/(1-d)}$	31,05	0,879	752827	744	7262,55	339,43	1,0229	0,0950	0,1667
	Weibull	$Da=a-bxe^{(-cxEdad^d)}$	31,06	0,875	752983	745	7268,96	328,02	337,46	0,0624	1,13
	Gompertz	$Da=axe^{[-e^{(b-cxEdad)}]^{1/d}}$	31,49	0,868	772279	745	7288,31	294	1,052	0,1812	
	Richards	$Da=a/[1+e^{(b-cxEdad)}]^{1/d}$	31,49	0,875	772308	745	7288,34	293,94	-6,239	0,1813	0,00068
	Logistic	$Da=a/[1+bxe^{(-cxEdad)}]$	32,42	0,879	813707	745	7331,81	279,20	8,3688	0,2765	
Zona Raleada	Chapman-Richards	$Da=ax[(1-bxe^{(-cxEdad^d)})]^{1/(1-d)}$	34,45	0,888	891266	750	7482,31	411,50	0,9726	0,0883	0,3631
	Weibull	$Da=a-bxe^{(-cxEdad^d)}$	34,47	0,888	891276	750	7484,32	390,70	390,3	0,0309	1,31
	Gompertz	$Da=axe^{[-e^{(b-cxEdad)}]^{1/d}}$	34,7	0,887	904061	751	7493,06	352,30	1,142	0,1563	
	Richards	$Da=a/[1+e^{(b-cxEdad)}]^{1/d}$	34,7	0,887	904101	750	7493,09	352,29	-5,594	0,1564	0,00119
	Logistic	$Da=a/[1+bxe^{(-cxEdad)}]$	35,48	0,882	945648	751	7526,97	323,10	10,55	0,2582	

ES: Error Estándar

r²: Coeficiente de Determinación

SCR: Suma de Cuadrados Residuales

GL: Grados de Libertad

AIC: Índice de Akaike

Parámetros de la Ecuación:

- Da(Diámetro acumulado): Variable dependiente
- Edad: Variable independiente

e: constante de Euler, $\approx 2,71828$

a, b, c, d: Coeficientes de la ecuación

Universidad Nacional Agraria
Biblioteca Agrícola Nacional

43674

Cuadro 4 Modelos probados para las series de datos más representativos de edad y diámetro acumulado, con sus respectivos estadísticos y coeficientes de la ecuación.

	Nombre	Ecuación	ES	r ²	SCR	GL	AIC	a	b	c	d
Zona no Raleada	Chapman-Richards	$Da=ax[(1-bxe^{-cxEdad})]^{1/(1-d)}$	21,12	0,941	292967	656	5904,08	338,10	1,021	0,0959	0,17355
	Weibull	$Da=a-bxe^{-cxEdad^d}$	21,14	0,941	293100	656	5906,38	332	338,6	0,0619	1,131
	Gompertz	$Da=axe^{-e^{(b-cxEdad)}}$	21,74	0,938	310647	657	5942,75	296,80	1,031	0,1800	
	Richards	$Da=a/[1+e^{(b-cxEdad)^{1/d}}]$	21,74	0,938	310653	656	5942,77	296,84	-7,562	0,1800	0,00019
	Logistic	$Da=a/[1+bxe^{-cxEdad}]$	23,04	0,930	348686	657	6018,99	281,40	8,155	0,2767	
Zona Raleada	Chapman-Richards	$Da=ax[(1-bxe^{-cxEdad})]^{1/(1-d)}$	16,92	0,969	179337	616	3389,03	362,30	0,966	0,116	0,4382
	Weibull	$Da=a-bxe^{-cxEdad^d}$	17,09	0,969	180003	616	3393,02	347,25	348,36	0,034	1,375
	Gompertz	$Da=axe^{-e^{(b-cxEdad)}}$	17,47	0,967	188304	617	3420,97	324,49	1,199	0,184	
	Richards	$Da=a/[1+e^{(b-cxEdad)^{1/d}}]$	17,47	0,967	191152	616	3423,15	324,42	-5,12	0,184	0,0018
	Logistic	$Da=a/[1+bxe^{-cxEdad}]$	19,49	0,959	234480	617	3534,42	301,33	11,243	0,298	

ES: Error Estándar

r²: Coeficiente de Determinación

SCR: Suma de Cuadrados Residuales

GL: Grados de Libertad

AIC: Índice de Akaike

Parámetros de la Ecuación:

- Da(Diámetro acumulado): Variable dependiente
- Edad: Variable independiente

e: constante de Euler, $\approx 2,71828$

a, b, c, d: Coeficientes de la ecuación

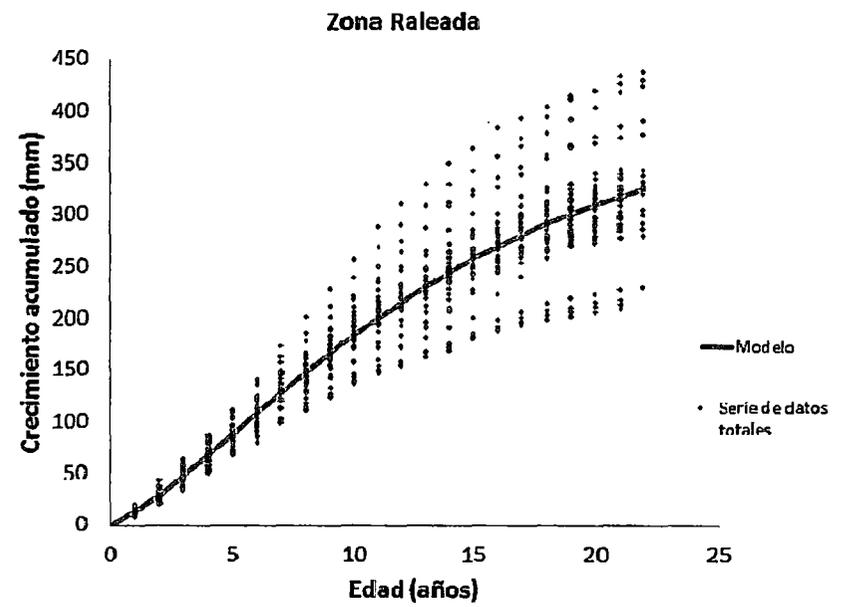
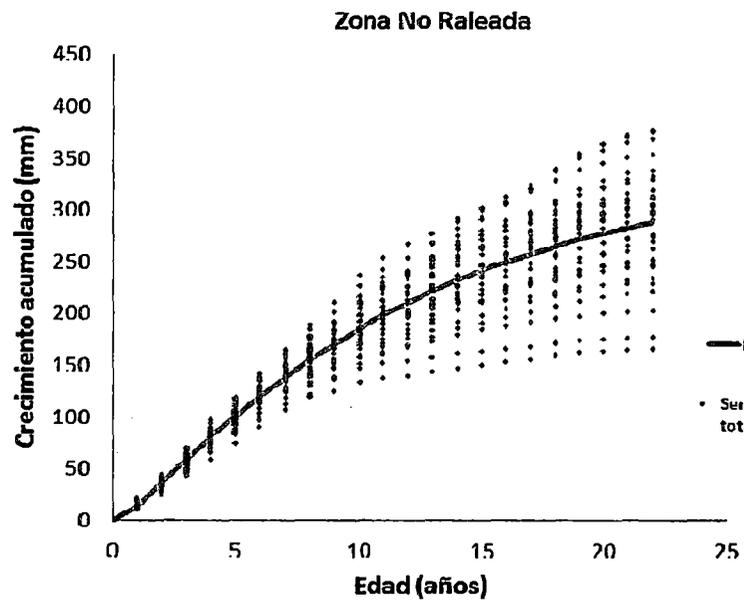


Figura 17 Curvas de crecimiento obtenidas en base al modelo Chapman-Richards para el total de datos.

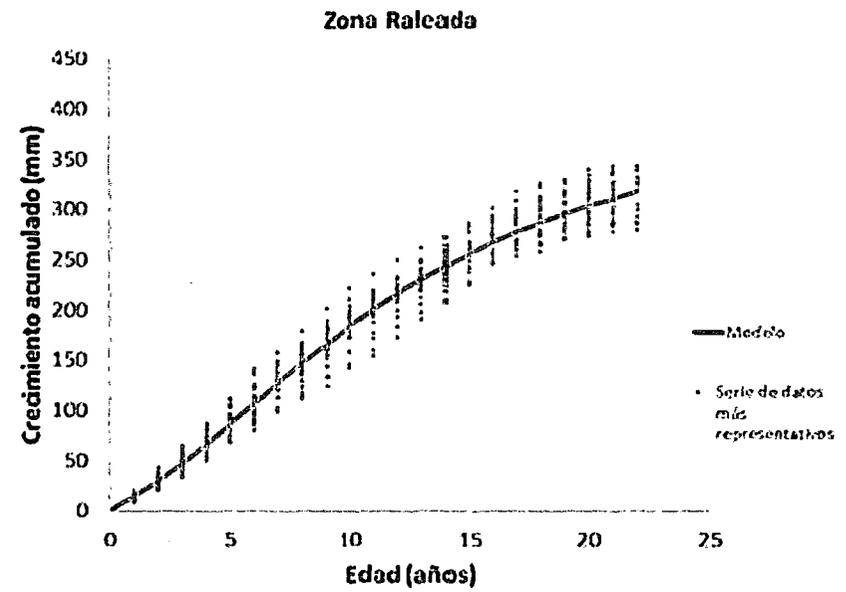
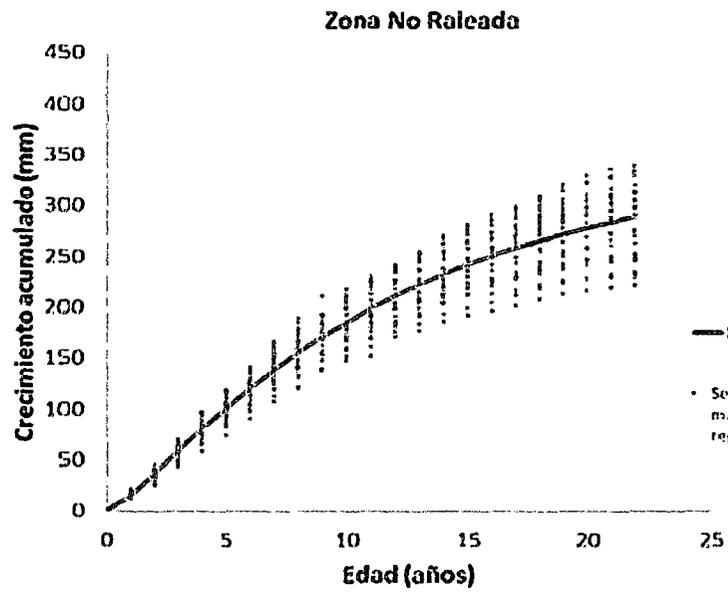


Figura 18 Curvas de crecimiento obtenidas en base al modelo Chapman-Richards para los datos más representativos.

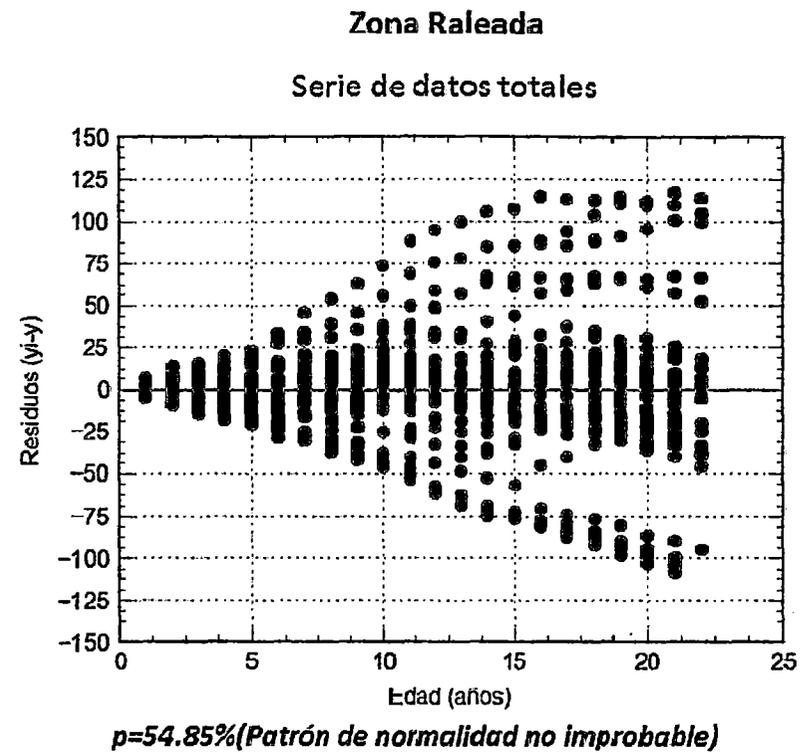
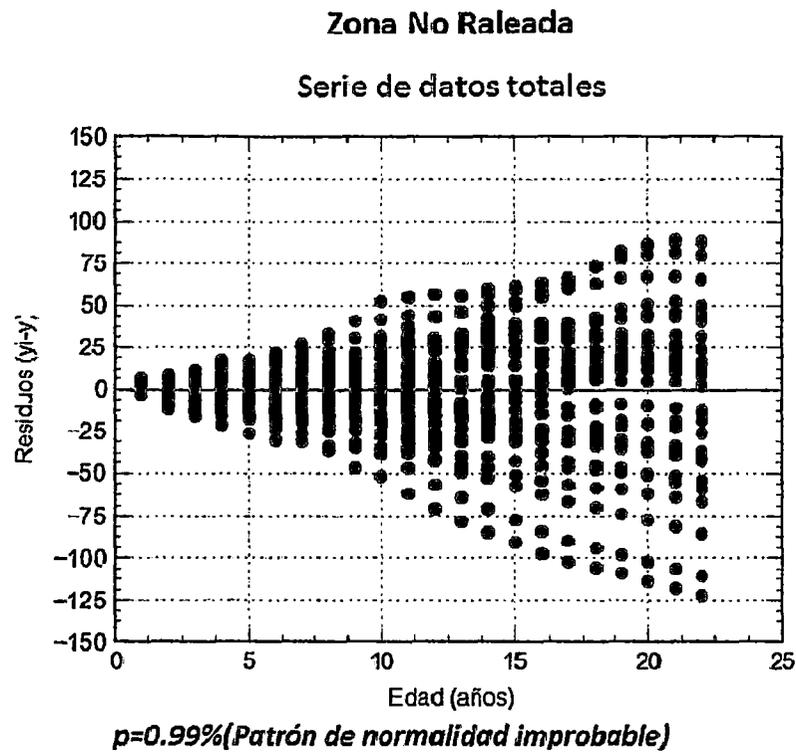


Figura 19 Distribución de residuales para el modelo ajustado Chapman-Richards para el total de datos.
Donde $p > 5\%$, patrón de normalidad no improbable.

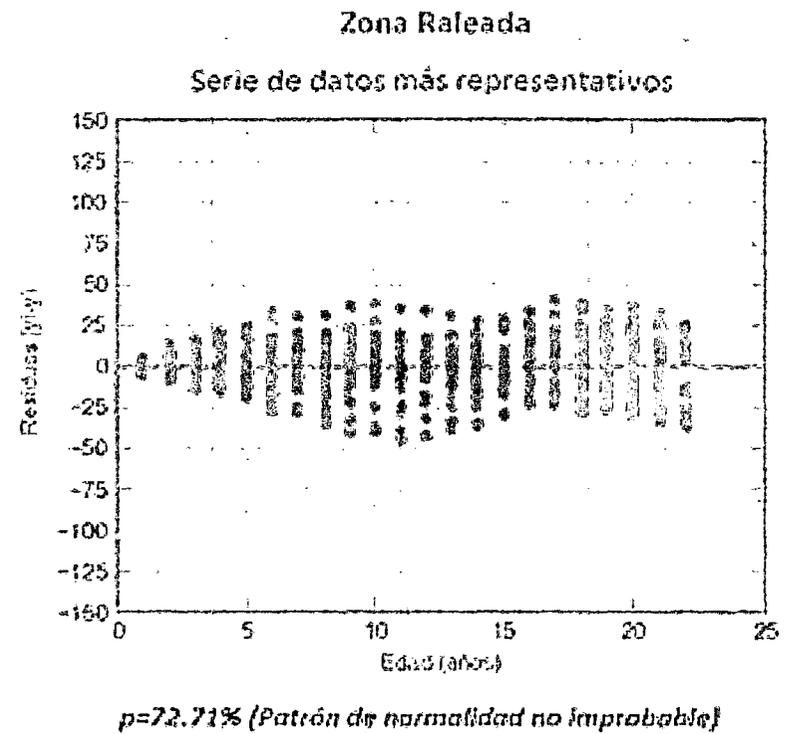
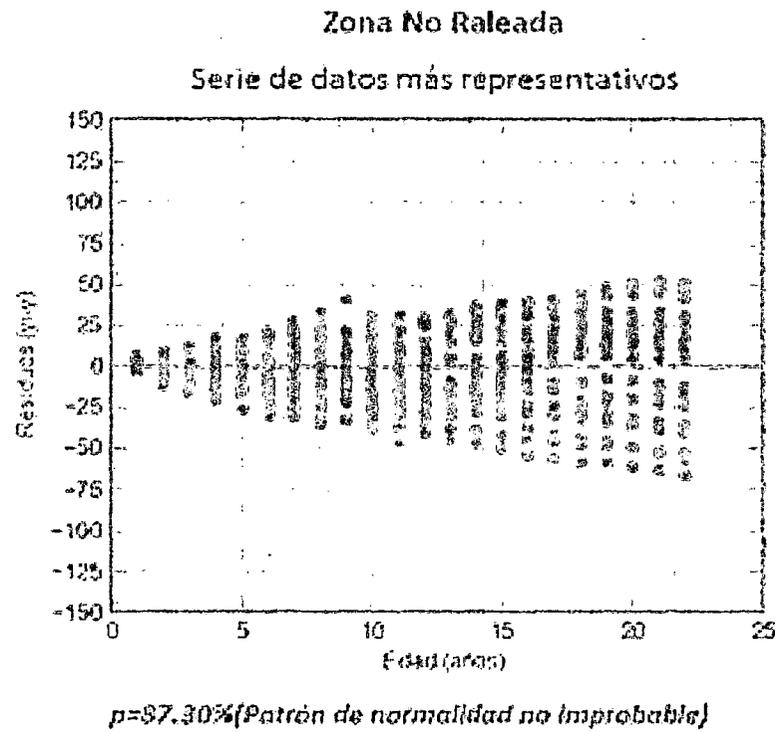


Figura 20 Distribución de residuales para el modelo ajustado Chapman-Richards para los datos más representativos. Donde $p>5\%$, patrón de normalidad no improbable.

4.3.3 VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE CRECIMIENTO

Kiviste *et al.* (2002), señalan que para garantizar la calidad de ajuste de los modelos que describen el crecimiento en cada una de las zonas estos deben presentar cierta precisión para diferentes conjuntos de datos de la misma población. De este modo el modelo Chapman-Richards calculado con el 10% del conjunto de datos de edad y diámetro acumulado presentó un error estándar (ES) de 17,37 cm para la zona no raleada y 15,39 cm para la zona raleada (Cuadro 5) considerados aceptables teniendo en cuenta el número de árboles y la variabilidad de crecimiento entre ellos, en especial en los últimos años de crecimiento.

Cuando se comparan los estimadores paramétricos de los modelos para los datos más representativos de la muestra (Cuadro 4) y las series con el 10% de los datos (Cuadro 5) se observa que en ambas zonas el modelo calculado con el 10% de los datos tiene mayor coeficiente de determinación r^2 y presentan valores menores en ES y SCR. Así mismo la distribución de residuales (Figura 21) muestra un patrón de normalidad no improbable, con valores de $p=64,37\%$ y $p=44,22\%$ para la zona no raleada y raleada respectivamente, los cuales a pesar de ser menores a los patrones de los residuales para los modelos ajustados con los datos más representativos, evidencian un menor rango de variación entre los residuales a lo largo de la edad; lo que significa que el modelo Chapman-Richards es estable aun cuando fue obtenido con solo 10% de los datos.

Cuadro 5 Modelo estadístico Chapman-Richards (Ch-Ri) validado con el 10 % de los datos totales, con sus respectivos estadísticos y coeficientes de la ecuación.

Nombre	Ecuación	Condición	ES	r^2	SCR	AIC	a	b	c	d
Ch-Ri	$D_a = a_x [(1 - b_x e^{(-c_x \text{Edad})})]^{1/(1-d)}$	Zona no Raleada	17,37	0,961	20218	603,25	305,85	0,833	0,146	0,539
		Zona Raleada	15,39	0,976	14524	557,13	377,37	0,905	0,107	0,487

ES: Error Estándar

r^2 : Coeficiente de Determinación

SCR: Suma de Cuadrados Residuales

AIC: Índice de Akaike

Parámetros de la Ecuación:

- D_a (Diámetro acumulado): Variable dependiente
- Edad: Variable independiente

e : constante de Euler, $\approx 2,71828$

a, b, c, d: Coeficientes de la ecuación

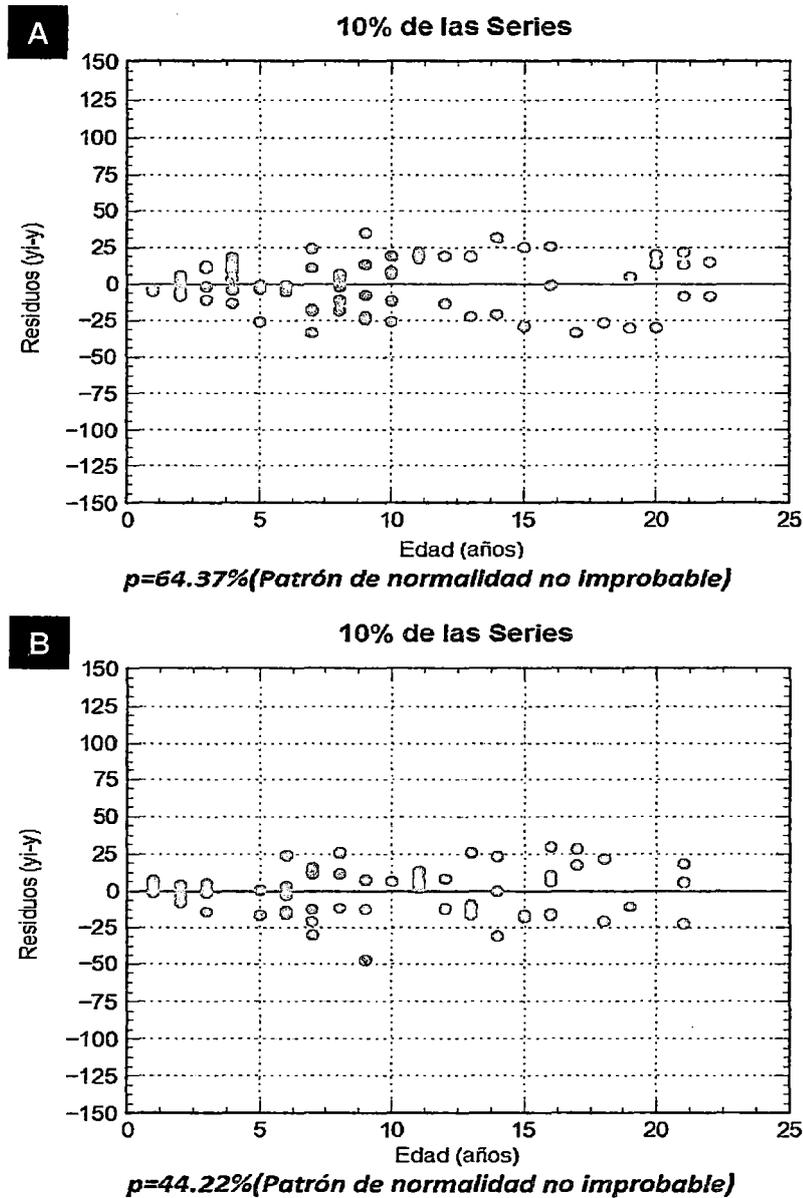


Figura 21 Distribución de residuales para el modelo ajustado Chapman-Richards con el 10% de los datos (A) zona no raleada; (B) zona raleada.

Según Scolforo (1998), el modelo validado permite describir el crecimiento de los árboles muestreados en cada una de las zonas, lo cual se corrobora al verificar estadísticamente que no existe diferencia entre los valores promedio del diámetro acumulado de los valores reales (esperados) para cada año y los estimados con el modelo (teóricos) (Figura 22), siendo los resultados de la prueba χ^2 2,95 y 8,3 para la zona no raleada y raleada respectivamente,

valores menores al χ^2 tabular de 11,59 (evaluados para 21 grados de libertad y un nivel de significancia de 0.05).

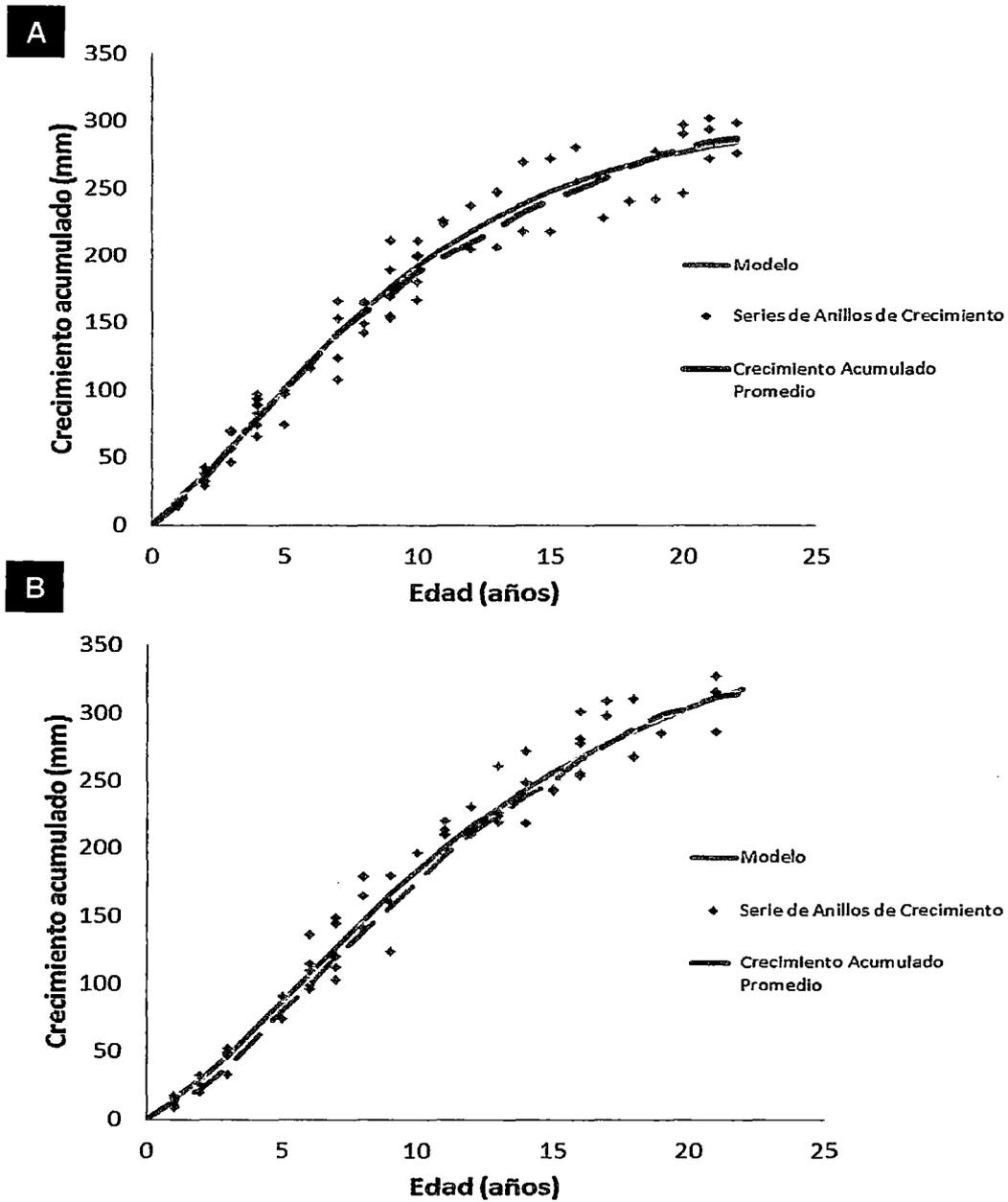


Figura 22 Curvas de crecimiento validadas en base al modelo Chapman-Richards (A) zona no raleada; (B) zona raleada.

4.3.4 COMPARACIÓN DE TASAS DE CRECIMIENTO DIAMÉTRICO

Quinto y Moreno (2010), señalan que las curvas de crecimiento se caracterizan por tener un crecimiento inicial lento, seguida por una fase de crecimiento acelerado, que tiende a ser lineal y en la parte final de la curva el crecimiento vuelve a ser lento cuando el árbol se encuentra en su etapa madura, característica que puede ser observada en la figura 23 tanto para la zona no raleada como la zona raleada. Wright (1999), menciona que la edad de transición entre madera juvenil y madura de *Pinus patula* se encuentra en un rango de 20 a 30 años; en tal sentido, se puede considerar que los árboles de la parcela raleada (22 años) se encuentra en la etapa madura de crecimiento. Goche *et al.* (2003), mencionan que el efecto fundamental del raleo no es incrementar el ancho de anillos, sino evitar una disminución drástica por el efecto de la edad y la formación de madera madura; tal como se observa en la curva de la zona raleada que describe una tendencia atípica después del tratamiento de raleo, el cual debería verse disminuido por efecto de la edad y la madurez de la especie.

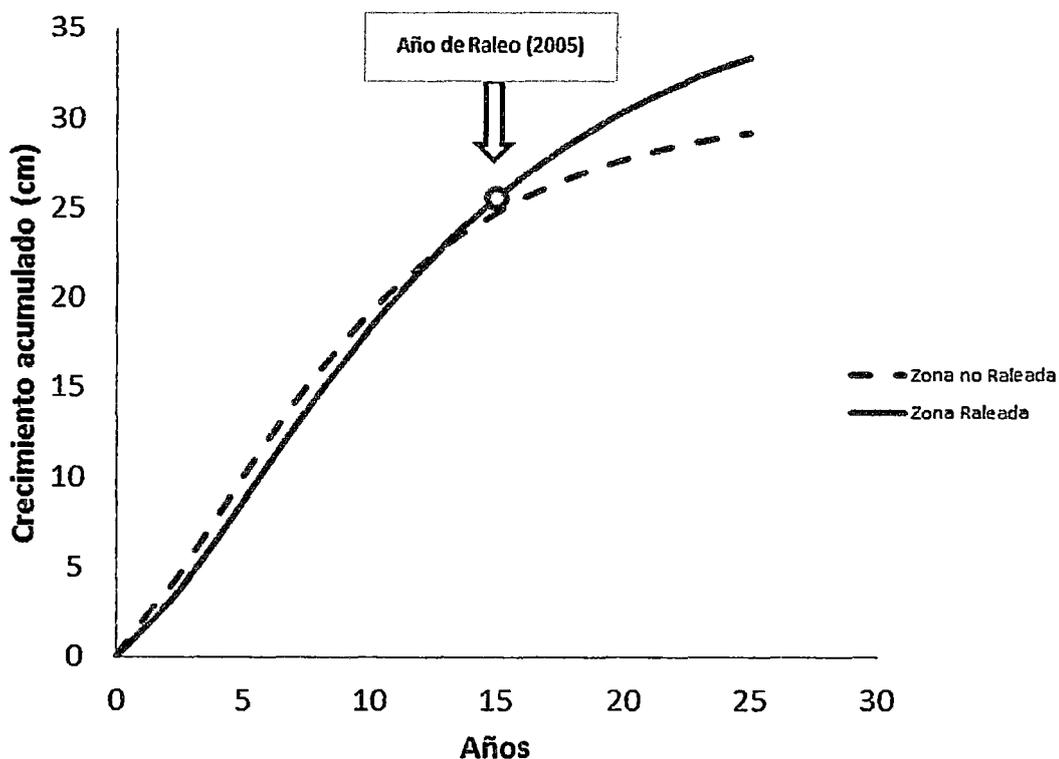


Figura 23 Crecimiento diamétrico acumulado proyectado a los 25 años.

Al comparar las tasas de crecimiento para las dos zonas de estudio (Cuadro 6); se encuentra que los árboles en la zona no raleada presentan una tasa de crecimiento medio de 1,17 cm anuales, mientras que los de la zona raleada crecen a un ritmo mayor de 1,33 cm anuales. La intervención silvicultural permitió este cambio en la tasa de crecimiento de los árboles manejados, resultado similar al citado por Zúñiga (2012), en bosques raleados de *Nothofagus pumilio* (0,21 a 0,28 cm/año). Así mismo al comparar el diámetro estimado con el modelo Chapman-Richards para la edad de 25 años resulta mayor en la zona raleada (33,3 cm) y menor en la zona no raleada (29,4 cm), demostrándose de esta manera poder obtener árboles con mayores diámetros en aquellas zonas raleadas; lo que coincide con Rodríguez (2010), quien encontró en plantaciones de *Pinus patula* en México que intensidades de raleo entre 40% y 69% a una edad de 15 años aumentaron el crecimiento diamétrico y de altura en 75% y 52% respectivamente, con relación al testigo.

Cuadro 6 Tasas de crecimiento diamétrico de “*Pinus patula*” por zona.

Parcela No Raleada		Parcela Raleada	
Máximo	2,158	Máximo	2,043
Mínimo	0,219	Mínimo	0,484
Media	1,167	Media	1,333
S	0,700	S	0,526
Diámetro (cm)	29,387	Diámetro (cm)	33,318
Edad (años)	25	Edad (años)	25

4.3.5 CRECIMIENTO CORRIENTE ANUAL Y CRECIMIENTO MEDIO ANUAL

Graficadas las curvas ICA (Incremento Corriente Anual) e IMA (Incremento Medio Anual) para ambas zonas, se puede observar en la zona no raleada y raleada que la intersección de las curvas se dio en el año 15 y 20 respectivamente, lo que significa que el turno de corta ya fue alcanzado siendo la edad de la plantación 22 años (Figura 24). Ospina *et al.* (2011), evaluaron el crecimiento del diámetro en plantaciones manejadas de *Pinus patula* en Colombia mediante el análisis de anillos de crecimiento y considera que la especie se encuentra dentro del rango de especies de rápido crecimiento debido a que requiere entre 15 y 25 años para alcanzar la intersección de las curvas ICA e IMA; así mismo, sugiere turnos de producción de 18 años o de 21 años, dependiendo del desarrollo de la especie y como destino final madera de aserrío.

Ospina *et al.* (2011), mencionon que para plantaciones la edad en el que ICA alcanza su valor máximo, la plantación ha llegado a su capacidad máxima de carga y es necesario el primer raleo con el objetivo de mejorar el espaciamiento y se debe realizar a una intensidad del 33% siendo no recomendable raleos al 50%, debido a que se subocuparía el sitio, habría poca competencia entre copas y la forma de los árboles sería muy cónica (menos volumen de madera aprovechable); así mismo, Giraldo y Del Valle (2011), sostiene que cuando el IMA alcanza su máximo valor, es la edad del máximo incremento medio anual, de considerable importancia para el manejo ya que define el momento de intervenir en la población a través de un segundo raleo para mejorar el volumen de cosecha final.

Ospina *et al.* (2011), aplicó el modelo Chapman-Richards para la descripción del crecimiento de *Pinus patula* y encontró que el máximo incremento corriente anual se presenta a los 11,65 años, sugiriendo que el primer raleo se debe realizar al año 7 a una intensidad del 25% a 33% para mejorar el espaciamiento y que el segundo raleo, de tipo comercial, debe hacerse al año 12, cuando ocurre el máximo del crecimiento medio anual a una intensidad del 50% y con ella se busca no solo optimizar el espaciamiento sino mejorar el volumen para el aprovechamiento final. Chagas y Garcia (2002), mencionan además que un segundo raleo reduce el tiempo para producir árboles de gran diámetro y de tronco uniforme. Conforme a lo señalado anteriormente se puede decir que el primer y único raleo aplicado a la plantación de *Pinus patula* de la zona raleada (Figura 22b), realizado el año 2005 (a los 15 años) a una intensidad del 63% mejoró el diámetro y por ende el volumen de cosecha final debido a que los árboles ya habían pasado la edad en que se dio el máximo incremento corriente anual siendo este a la edad de 11 años y se encontraban más cerca de la edad en la que se dio el máximo incremento medio anual a los 18 años.

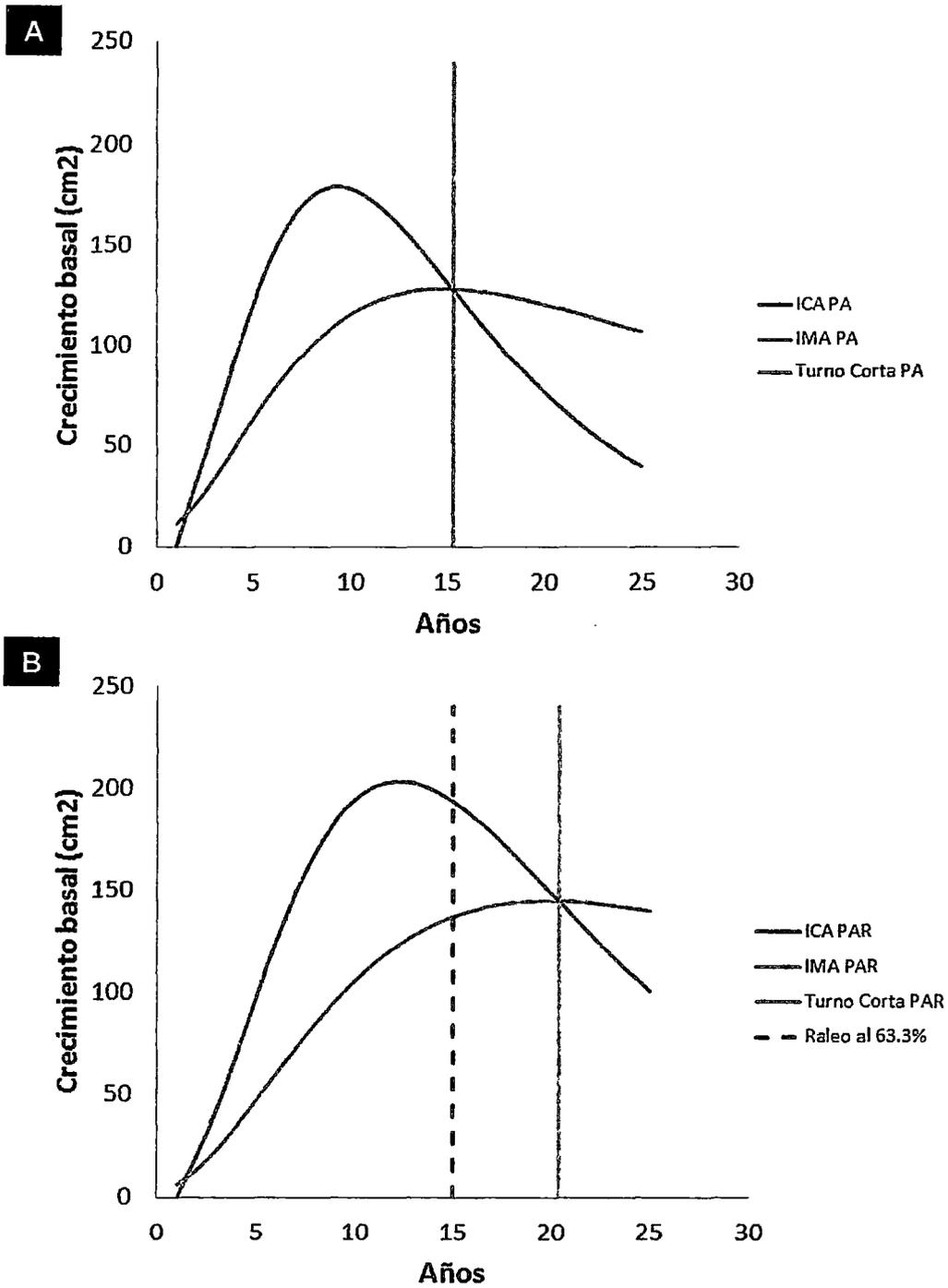


Figura 24 Comparación entre el ICA (Incremento Corriente Anual) e IMA (Incremento Medio Anual) (A) zona no raleada; (B) zona raleada.

4.4 ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE MADERA COMERCIAL

Gillespie (1992), cita que para plantaciones de *Pinus patula* con densidades de rodal altas (árboles plantados a menor distanciamiento) y calidades de sitio buenas (pocos meses de temporadas secas) los rodales bien manejados pueden presentar producciones de hasta 810 m³/ha en rotaciones de 30 años y con individuos de diámetro menor a 40 cm, mientras que para calidades de sitio malas (más de 3 meses de temporadas secas) y rodales mal manejados la producción puede ser de 540 m³/ha a menos; así mismo, señala que los mayores incrementos medios anuales se alcanzan entre los 14 y 18 años siendo la producción a esta edad de 490 a 630 m³/ha, sugiriendo que las opciones de raleo, teniendo en cuenta el uso final de la madera, sean tomadas antes de estas edades y que las intensidades del mismo no sean excesivas para evitar afectar la distribución temporal y diamétrica de los rendimientos y la producción.

Si bien el único raleo aplicado a la edad de 15 años (2005) incrementó el diámetro medio y originó un cambio significativo en la variación diamétrica de la plantación, en la figura 25 se observa que el tratamiento a árboles en etapa madura, pudo originar que a los 22 años no se alcanzara una mayor producción de madera comercial en la zona raleada (451,45 m³/ha) comparada con la producción en la zona no raleada (635,78 m³/ha), existiendo una diferencia entre una zona y otra de alrededor de 184 m³/ha. Rodríguez (2010), señala que las plantaciones no intervenidas pueden mostrar mayores valores de volumen y biomasa por hectárea (producción) comparados con las plantaciones donde se realizó raleos de árboles en etapa madura.

Finalmente se puede decir que la intensidad de raleo al 63% fue excesivo lo cual originó un efecto negativo en la producción de madera comercial en la zona raleada (volumen remanente más volumen cortado), cuyo valor es menor al producido en la zona no raleada. Chagas y García (2002), mencionan que en la mayoría de estudios los raleos no afectan significativamente la producción, excepto cuando la densidad es reducida severamente (más del 50% de intensidad a edad madura), ocasionando que el lugar sea subutilizado; además del no aumento en la producción de volumen cuando esta se compara con plantaciones no intervenidas; agregan los autores, que en la práctica de manejo la decisión debe ser basada en consideraciones económicas, tomándose en cuenta la producción de árboles de mayor valor individual (calidad), aspecto que no se evaluó en el presente estudio.

PRODUCCIÓN COMERCIAL (m³/ha)

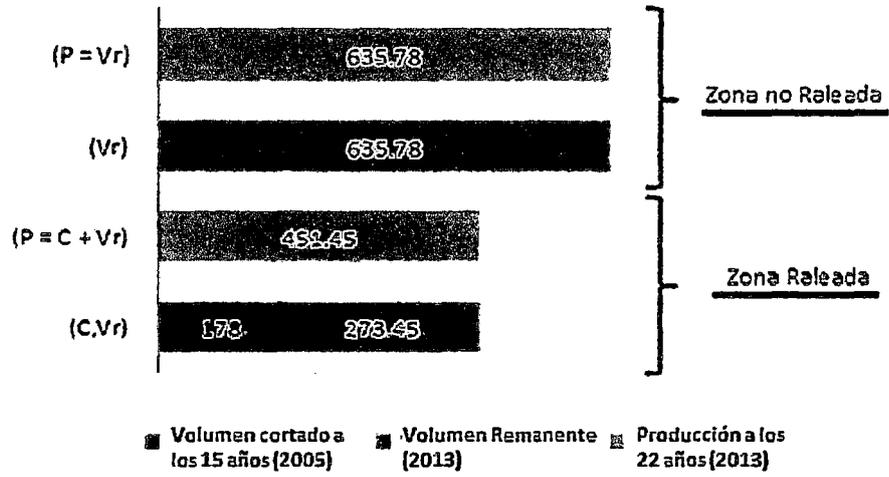


Figura 25 Producción de madera comercial a los 22 años.

5. CONCLUSIONES

- La especie *Pinus patula* de la Granja Porcón – Cajamarca presenta anillos de crecimiento bien marcados y de crecimiento anual.
- Existe una relación directa y significativa entre el crecimiento diamétrico de la especie *Pinus patula* para la zona no raleada y raleada con la precipitación, pero no con la temperatura.
- El perfil de crecimiento diamétrico de la plantación raleada se modificó por efecto de la edad e intensidad del raleo.
- El raleo aplicado a la plantación en su etapa madura, evitó la tendencia a la disminución drástica en el crecimiento diamétrico de la especie.
- La mayor tasa de crecimiento diamétrico proyectada a los 25 años para el *Pinus patula* de la Granja Porcón – Cajamarca se encontró en la zona raleada y la menor en la zona no raleada.
- El raleo realizado en etapa madura y a una intensidad del 63% originó que la plantación no alcance mayores valores de producción de madera comercial en comparación a la plantación testigo.

6. RECOMENDACIONES

- Las plantaciones de *Pinus patula* de la Granja Porcón – Cajamarca deben ser estudiadas teniendo en cuenta el efecto de distintas edades de raleo.
- Desarrollar estudios de calidad de sitio que permitan complementar el conocimiento del crecimiento de *Pinus patula* de la Granja Porcón – Cajamarca tratándose de una especie de importancia económica para la zona.
- El conocimiento de la influencia del raleo debe estar orientado no solo a la cantidad de madera producida, sino a la calidad de la misma.
- Realizar estudios de modelamiento del crecimiento en altura, volumen y producción de biomasa de la especie a través de ecuaciones matemáticas usando la medición de anchos de anillo de manera que permitan establecer herramientas para el control y manejo del crecimiento de las plantaciones de la Granja Porcón – Cajamarca.

BIBLIOGRAFÍA

- ACOSTA, M.** 1991. Modelo de crecimiento para *Pinus montezumae* Lamb., en el CEF San Juan Tetla, Puebla. Tesis de Maestría. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo, México. 71 p.
- ADEFOR.** 2005. Plan general de manejo forestal (PGMF) de las plantaciones de la cooperativa agraria Atahualpa Jerusalén de trabajadores LTDA – Granja Porcón, establecido en convenio con el proyecto piloto forestal (PPF) y administrado por ADEFOR. Cajamarca, Perú. 36-38 p.
- AYERDE, L. D.** 1996. Análisis de curvas de crecimiento de árboles y masas forestales. Tesis de Maestría en Ciencias. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo, México. 255 p.
- BOGINO, M. y VILLALBA, R.** 2008. Radial growth and biological rotation age of *Prosopis caldenia* Burkart in Central Argentina. En ELSEVIER, revista de ambientes áridos. Volumen 72. 16-23 p.
- BRIENEN, R. y ZUIDEMA, P.** 2006. Lifetime growth patterns and ages of Bolivian rain forest trees obtained by tree ring analysis. *Journal of Ecology*. 94. 481–493 p.
- CARRILLO, E.** 2008. Casos prácticos para muestreos e inventarios forestales. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo. México. 172 p.
- CHAGAS C., J. & GARCIA L., H.** 2002. Mensuracao florestal. Preguntas y respuestas. Universidad Federal de Viscosa. Brasil. 407 p.
- CLUTTER, L.; FORSTON, C.; PIENAAR, V.; BRISTER, H. y BAILEY, R.** 1983. Timber management: A quantitative approach. Wiley, Nueva York, EEUU. 14 p.
- COOK, E. y HOLMES, R.** 1985. Program ARSTAN user manual. Laboratory of Tree- Ring Research, University of Arizona, Tucson, Arizona.
- COOK, E. y KAIRIUKSTIS, L.** 1989. Methods of dendrochronology: application on the environmental sciences. Dordrecht: Kluwer Academic. 394 p.

- DÍAZ, S. C.; TOUCHAN, R. Y SWETNAM, T. W.** 2001. Una reconstrucción del anillo de crecimiento de la última precipitación en México del noroeste. *Diario internacional de la climatología* (8). 1007-1019 p.
- DOMINGUEZ, F.A.; RODRIGUEZ, M. y MALLÉN, C.** 1997. Evaluación de cuatro intensidades de poda en una plantación de *Pinus patula* Schl. et. Cham. en la Región de Huayacocotla, Veracruz. *Revista Ciencia Forestal en México*. V. 22. 30-31 p.
- DUNISH, O.; RIBEIRO, V. y BAUCH, J.** 2003. Dendroecological investigations on *Swietenia macrophylla* King and *Cedrela odorata* L. (Meliaceae) in the central Amazon. *Trees* (17). 244–250 p.
- DVORAK, W.S., HODGE, G.R., KIETZKA, J.E., MALAN, F., OSORIO, L.F., y STANGER, T.K.** 2000. *Pinus patula*. In : Conservation and Testing of Tropical and Subtropical Forest Tree Species. CAMCORE Cooperative, College of Natural Resources, NCSU Raleigh, NC. USA. 148-173 p.
- FICHTLER, E.; TROUET, V.; BEECKMAN, H.; COPPIN, P. y WORBES, M.** 2004. Climatic signals in tree rings of *Burkea africana* and *Pterocarpus angolensis* from semiarid forests in Namibia. *Trees* (18). 442-451 p.
- FRITTS, H. C.** 1976. *Tree Ring and Climate*. Laboratory of Tree Ring, research University of Arizona-Tucson. U.S.A. 567 p.
- FORTUNA, F.** 2007. Dendroclimatología de quatro espécies florestais nativas com potencial silvicultural e económico. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Santa Maria, Centro de Ciências Rurais. Santa Maria, RS, Brasil. 16-20 p.
- GILLESPIE, A.** 1992. *Pinus patula* Schiede and Deppe. Patula pine. SO-ITF-SM-54. New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. 406-407 p.
- GIRALDO, J. A. y DEL VALLE, J.** 2011. Estudio del crecimiento de *Prioria copaifera* (Caesalpinaceae) mediante técnicas dendrocronológicas. Grupo de Bosques y Cambio Climático. Universidad nacional de Colombia Sede Medellín, Departamento de Ciencias Forestales. Colombia. 30-40p.

- GOCHE, J.** 2007. Influencia de los aclareos sobre la densidad básica y ancho de anillos de la madera de *Pinus patula* Schl. et Cham. Tesis Doctor en Ciencias Forestales. Colegio de postgraduados. Montecillo, México. 5-16 p.
- GOCHE, J.; VELÁZQUEZ, M.; BORJA DE LA R.; TERRAZAS, T.; CERVANTES, M.; TRINIDAD, S.** 2003. Densidad básica y ancho de anillos de la madera de *Pinus patula* antes y después de un aclareo. INCI. Caracas. 28(12). 705-709 p.
- GONÇALVES, G. V.** 2007. Dendrocronología: principios teóricos, problemas prácticos e aplicabilidade. CIDEHUS. Universidade de Évora. Portugal. 16 p.
- GRISSINO, H.D.** 2001. Evaluating crossdating accuracy: manual and tutorial for the computer program COFECHA. Tree Ring Research, Tucson, V (57). 205-221 p.
- HOLMES, R.L.; ADAMS, R.K. y FRITTS, H.C.** 1986. Quality control of crossdating and measuring: a user's manual for program COFECHA. In: Treering chronologies of Western North America: California, eastern Oregon and northern Great Basin. Tucson: ArizonaUniversity. 15-35 p.
- HUERTA, J.** 1978. Anatomía de la madera de 12 especies de coníferas mexicanas. Boletín Técnico N°. 51. INIF, SFF, SARH. México. 36p.
- HYAMS, D.** 2011. Curve Expert Professional Documentation. Release 1.5. 1 p.
- JAAKKOLA, T.; MAKINEN, H. y SARANPA, A.** 2005. Wood density in Norway spruce: changes with thinning intensity and tree age. Canadian Journal of Forest Research. Canada (35). 1767-1779 p.
- KHAM, N.** 1997. Common species for Tree Rings Dating. Consultado el 25 de Junio del 2013. Disponible en: <http://www.emporia.edu/S/www/earthsci/student/nang/treering.htm>.
- KIVISTE, A.; ÁLVAREZ, J.; ROJO, A. y RUÍZ, A.** 2002. Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Madrid, España. 190 p.

- KITZBERGER, T.; VEBLÉN, T. y VILLALBA, R.** 2000. Métodos dendroecológicos y sus aplicaciones en estudios de dinámica de bosques templados en Sudamérica. En: Dendrocronología en América Latina. Roig F. (comp); EDIENC. Mendoza, Argentina. 37 p.
- KLEPAC, D.** 1983. Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales. Segunda edición. Universidad Autónoma de Chapingo. México. 3-4 p.
- LARA, A.; VILLALBA, R.; ARAVENA, J.; WOŁODARSKY, F. y NEIRA, E.** 2000. Desarrollo de una red de cronologías de *Fitzroya cupressoides* (Alerce) para Chile y Argentina. En: Dendrocronología en América Latina. Roig F. (comp); EDIENC. Mendoza, Argentina. 215-218 p.
- LÓPEZ, J.; TERRAZAS, T.; VALDEZ, J.; VALDEZ, R.** 2006. Anillos de crecimiento y su periodicidad en tres especies tropicales del estado de Colima, México. Agrociencia. Texcoco, México. V40 (4). 533-544 p.
- LÓPEZ H.** 2010. Índice de sitio para *Pinus patula* Schl. Et Cham., en Santiago Comaltepec, Ixtlán; Oaxaca. Tesis para obtener el título de Ingeniero Forestal. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 48 p.
- LOUMAN, B.; QUIROS, D. y NILSSON, M.** 1999. Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis en América Central. CATIE, Costa Rica. 264 p.
- MARTÍNEZ, L.** 1996. A Guide to Dendrochronology for Educators. Consultado el 25 de Junio del 2013. Disponible en <http://www.ltrr.arizona.edu/people/henry/lorim/lori.htm>.
- McCARTHY, B.** 1998. Dendrochronology Seminar. PBIO-69 Dendrochronology Seminar 500 Server. Ohio University. Ohio, U.S.A. Disponible en: http://www.collegetermpapers.com/TermPapers/Miscella/HOW_USEFUL_IS_DENDROCHRONOLOGY_TO_ARCHAEOLOGY.html
- MEZA, F. y MORA, V.** 2003. Comparación del crecimiento en altura de la Teca (*Tectona grandis*) en Costa Rica con otros trabajos previos y con otras regiones del mundo. Instituto de Investigación y Servicios Forestales. Universidad Nacional Heredia. Heredia, Costa Rica. Disponible en: <http://www.una.ac.cr/inis>.

- MOSCOVICH, F.A.** 2004. Modelos de crecimiento y producción forestal. Montecarlo (Mnes.): INTA EEA Montecarlo – Informe Técnico N° 55. 39 p.
- MOYA, R.; TOMAZELLO, M. y DO SANTOS, C.** 2007. Variações na estrutura da anatomía do lenho de árvores de *Gmelina arbórea* Roxb. (Verbenaceae) de clima tropical seco e úmida na Costa Rica. En revista Sci. For. n. 75. Piracicaba, Brasil. 65-75 p.
- MURILLO, G.; BADILLA, V. y MORALES, S.** 2012. Método de inventario para plantaciones pequeñas. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 4-5 p.
- NALVARTE, W.; KROLL, B. y LOMBARDI, I.** 1993. Plan Maestro: Unidad Modelo de Manejo y Producción Forestal Dantas. Universidad Nacional Agraria La Molina. Facultad de Ciencias Forestales. Lima – Perú. 149 p.
- OSPINA C., HERNÁNDEZ R., RINCÓN E., SÁNCHEZ F., URREGO J., RODAS C., RAMÍREZ C. y RIAÑO N.** 2011. Guías silviculturales para el manejo de especies forestales con miras a la producción de madera en la zona andina colombiana: El *Pinus patula* Schl et Cham. FNC-Cenicafé. Colombia.
- QUINTO, H. y MORENO, F.** 2010. Crecimiento de árboles en un bosque pluvial tropical del Chocó y sus posibles efectos sobre las líneas de energía. En Bio terra, revista de biología e ciencias da terra. V 10 (2). Brasil. 12-28 p.
- RODRIGUEZ, G.** 2010. Efecto de aclareos en el crecimiento de una plantación de *Pinus patula* Schl et Cham. en Ixtlán, Oaxaca. Tesis Doctor en Ciencias en recursos genéticos y productividad fisiológica vegetal. Colegio de postgraduados, Montecillo, México. 3-7 p.
- RODRIGUEZ, G., ALDRETE, A., GONZÁLEZ, A., DE LOS SANTOS, H., GÓMEZ, A., FIERROS, A.** 2011. ¿Afectan los aclareos la acumulación de biomasa aérea en una plantación de *Pinus patula*? Agrociencia. Texcoco, México. V 45(6).719-732 p.

- ROSETO, J.** 2009. Dendrocronología de árboles de mogno, *Swietenia macrophylla* King., Meliaceae, ocurrentes na floresta tropical Amazônica do Departamento de Madre de Dios, Perú. Tesis (Mag. Sc). Piracicaba: ESALQ/USP, BR, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. 131 p.
- ROSETO, J.** 2011. Análisis Dendrocronológico de tres especies forestales del Bosque seco Ecuatorial Estacional. Tesis para optar el título de Ingeniero Forestal - Facultad de Ciencias Forestales. UNALM. Lima. Perú. 124 p.
- RUIZ, M.; FIERROS, M. y RAMIREZ, M.** 1996. Efecto inicial del aclareo en plantaciones de *Pinus caribaea* var. *Hondurensis* Barr. y Golf. en La Sabana, Oaxaca. Ciencia Forestal en México, V. 21. 25-38 p.
- SANQUETTA, C.** 1996. Fundamentos boimétricos dos modelos de simulação florestal. Serie didática N° 08. FU-PEF, Curitiba, Brasil. 49 p.
- SCHULMAN, E.** 1956. Dendroclimatic changes in semiarid America. University of Arizona Press, Tucson. Arizona, U.S.A. 142 p.
- SCOLFORO, R.** 1998. Modelagem do crescimento e da produção de florestas plantadas e Nativas. Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais. Brasil. 453 p.
- TOMAZELLO F., M.; BOTOSSO, P.C. y LISI, C.** 2001. Análise e aplicação dos anéis de crescimento das árvores. In: MAIA, N.; MARTOS, H.; BARRELLA, W. (Org.). Indicadores ambientais conceitos e aplicações. São Paulo: Educ. 117-143 p.
- TORRES, F. y LÓPEZ, G.** 2009. Caracterización del ecosistema Páramo en el norte del Perú: ¿Páramo o Jalca? Serie: Conversatorios sobre Ecosistema Páramo, memorias del Segundo Conversatorio, Piura- Perú. Lima: AGRORED Norte, The Mountain Institute.
- VALERIO, J. y SALAS, C.** 1998. Selección de Prácticas Silviculturales para Bosques Tropicales. Manual Técnico, segunda edición. Santa Cruz, Bolivia. 59p.
- VANCLAY, J.** 1994. Modelling Forest Growth and Yield: applications to mixed tropical forests. CAB International. UK. 312 p.
- VANCLAY, J.** 2000. Growth modeling and yield prediction for sustainable forest management. The Malaysian Forester (66). 58-69 p.

- VEBLEN, T.; HADLEY, S.; REIZ, S. y REBERTUS, J.** 1991. Stand response to spruce beetle outbreak in Colorado subalpine forests. En: Dendrocronología en América Latina. Roig F. (comp); EDIENC. Mendoza, Argentina. 54 p.
- WRIGHT, J.** 1999. Utilización y calidad de los productos mejorados de *Pinus patula* en plantaciones manejadas sosteniblemente. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 99 p.
- ZUÑIGA, C.** 2012. Aplicación de la dendrocronología para evaluar la influencia de la precipitación y la temperatura en el crecimiento de *Tectona grandis* L.f. procedente del Fundo Génova-Junín. Tesis Ing. Forestal. Universidad Nacional Agraria La Molina – UNALM. Lima, Perú. 97 p.

ANEXO 1

INTER-CORRELACIÓN DE LAS SERIES CRONOLÓGICAS A PARTIR DE LOS ANCHOS DE ANILLOS DE CRECIMIENTO PARA LA ESPECIE “*PINUS PATULA*” EN LA ZONA NO RALEADA

Serie	Muestra	Intervalo	Inter-correlación		
			1990-2009	1995-2014	
1	Pa01r1	1991	2012	0.57	0.25A
2	Pa01r3	1991	2012	0.55	0.43A
3	Pa02r1	1991	2012	0.74	0.48A
4	Pa02r3	1991	2012	0.8	0.78
5	Pa03r1	1991	2012	0.76	0.82
6	Pa03r2	1991	2012	0.7	0.81
7	Pa03r3	1991	2012	0.59	0.51A
8	Pa04r1	1991	2012	0.71	0.45A
9	Pa04r2	1991	2012	0.64	0.56
10	Pa06r2	1991	2012	0.68	0.74
11	Pa07r1	1991	2012	0.82	0.57
12	Pa07r2	1991	2012	0.58	0.43A
13	Pa07r3	1991	2012	0.64	0.54
14	Pa08r1	1991	2012	0.69	0.71
15	Pa08r2	1991	2012	0.52	0.59
16	Pa08r3	1991	2012	0.73	0.84
17	Pa09r1	1991	2012	0.75	0.38A
18	Pa10r1	1991	2012	0.74	0.42A
19	Pa10r2	1991	2012	0.72	0.50A
20	Pa10r3	1991	2012	0.64	0.41A
21	Pa11r3	1991	2012	0.56	0.57
22	Pa11r4	1991	2012	0.72	0.57
23	Pa12r1	1991	2012	0.6	0.48A
24	Pa12r2	1991	2012	0.75	0.74
25	Pa12r3	1991	2012	0.63	0.50A
26	Pa13r1	1991	2012	0.71	0.61
27	Pa13r2	1991	2012	0.71	0.57
28	Pa13r3	1991	2012	0.91	0.66
29	Pa13r4	1991	2012	0.9	0.74
30	Pa14r1	1991	2012	0.87	0.87
31	Pa14r3	1991	2012	0.89	0.78
32	Pa15r1	1991	2012	0.82	0.67

33	Pa15r3	1991	2012	0.85	0.75
34	Pa16r1	1991	2012	0.79	0.69
35	Pa16r2	1991	2012	0.88	0.85
36	Pa16r3	1991	2012	0.68	0.56
37	Pa17r1	1991	2012	0.78	0.79
38	Pa17r2	1991	2012	0.95	0.79
39	Pa17r3	1991	2012	0.93	0.9
40	Pa17r4	1991	2012	0.9	0.74
41	Pa18r1	1991	2012	0.74	0.55
42	Pa18r2	1991	2012	0.69	0.63
43	Pa18r3	1991	2012	0.83	0.62
44	Pa18r4	1991	2012	0.79	0.56
45	Pa19r1	1991	2012	0.58	0.53
46	Pa19r2	1991	2012	0.74	0.55
47	Pa19r3	1991	2012	0.86	0.72
48	Pa20r1	1991	2012	0.66	0.53
49	Pa20r2	1991	2012	0.63	0.29A
50	Pa20r3	1991	2012	0.67	0.52
51	Pa21r1	1991	2012	0.73	0.61
52	Pa21r2	1991	2012	0.76	0.52
53	Pa21r3	1991	2012	0.69	0.57
54	Pa22r1	1991	2012	0.89	0.6
55	Pa22r2	1991	2012	0.73	0.63
56	Pa22r3	1991	2012	0.76	0.63
57	Pa22r4	1991	2012	0.59	0.48A
58	Pa23r1	1991	2012	0.86	0.79
59	Pa23r2	1991	2012	0.89	0.82
60	Pa24r1	1991	2012	0.82	0.68
61	Pa24r2	1991	2012	0.75	0.50A
62	Pa24r3	1991	2012	0.9	0.86
63	Pa25r1	1991	2012	0.75	0.6
64	Pa25r2	1991	2012	0.71	0.59
65	Pa26r2	1991	2012	0.73	0.63
66	Pa27r1	1991	2012	0.87	0.77
67	Pa27r2	1991	2012	0.73	0.6
68	Pa27r3	1991	2012	0.82	0.73
69	Pa28r1	1991	2012	0.55	0.32A
70	Pa28r2	1991	2012	0.67	0.73
71	Pa28r3	1991	2012	0.74	0.50A
72	Pa29r1	1991	2012	0.52	0.38A
73	Pa29r2	1991	2012	0.57	0.54
74	Pa29r3	1991	2012	0.66	0.67

75	Pa30r2	1991	2012	0.59	0.55
76	Pa30r3	1991	2012	0.66	0.7
77	Pa31r2	1991	2012	0.61	0.69
78	Pa31r3	1991	2012	0.50A	0.50A
79	Pa31r4	1991	2012	0.69	0.71
80	Pa32r1	1991	2012	0.8	0.77
81	Pa32r2	1991	2012	0.85	0.63
82	Pa32r3	1991	2012	0.86	0.71
83	Pa33r1	1991	2012	0.86	0.73
84	Pa33r2	1991	2012	0.77	0.69
85	Pa34r1	1991	2012	0.73	0.56
86	Pa34r2	1991	2012	0.8	0.73
87	Pa35r1	1991	2012	0.66	0.59
88	Pa36r2	1991	2012	0.54	0.57
89	Pa37r3	1991	2012	0.58	0.57
Correlación Promedio				0.73	0.62

Correlación Pearson 99%, nivel crítico de correlación 0,51; A: Correlación máxima obtenida;
 B: Presencia de correlaciones más elevadas que en otras posiciones

ANEXO 2

INTER-CORRELACIÓN DE LAS SERIES CRONOLÓGICAS A PARTIR DE LOS ANCHOS DE ANILLOS DE CRECIMIENTO PARA LA ESPECIE “*PINUS PATULA*” EN LA ZONA RALEADA

Serie	Muestra	Intervalo	Inter-correlación		
			1990-2009	1995-2014	
1	Par01r1	1992	2012	0.8	0.54
2	Par01r2	1992	2012	0.73	0.53
3	Par01r3	1992	2012	0.76	0.53
4	Par02r1	1991	2012	0.96	0.93
5	Par02r2	1991	2012	0.84	0.79
6	Par02r3	1991	2012	0.75	0.75
7	Par03r1	1991	2012	0.53	0.55
8	Par03r2	1991	2012	0.8	0.8
9	Par03r3	1991	2012	0.77	0.8
10	Par03r4	1991	2012	0.6	0.68
11	Par04r1	1992	2012	0.9	0.89
12	Par04r2	1992	2012	0.87	0.79
13	Par05r1	1992	2012	0.73	0.72
14	Par05r2	1992	2012	0.87	0.86
15	Par05r3	1992	2012	0.68	0.63
16	Par05r4	1992	2012	0.87	0.87
17	Par06r1	1991	2012	0.75	0.49A
18	Par06r2	1991	2012	0.79	0.63
19	Par06r3	1991	2012	0.71	0.64
20	Par06r4	1991	2012	0.71	0.68
21	Par07r1	1992	2012	0.75	0.78
22	Par07r2	1992	2012	0.67	0.58
23	Par07r3	1992	2012	0.67	0.61
24	Par09r1	1992	2012	0.72	0.65
25	Par09r2	1992	2012	0.7	0.63
26	Par10r1	1991	2012	0.71	0.61
27	Par10r3	1991	2012	0.61	0.68
28	Par11r1	1992	2012	0.85	0.82
29	Par11r2	1992	2012	0.89	0.88
30	Par11r3	1992	2012	0.89	0.87
31	Par12r1	1991	2012	0.52	0.56
32	Par12r3	1991	2012	0.61	0.66

33	Par13r1	1991	2012	0.81	0.79
34	Par13r2	1991	2012	0.84	0.8
35	Par13r3	1991	2012	0.8	0.81
36	Par13r4	1991	2012	0.8	0.81
37	Par14r	1991	2012	0.72	0.67
38	Par14r1	1991	2012	0.78	0.76
39	Par14r3	1991	2012	0.76	0.7
40	Par15r1	1992	2012	0.74	0.73
41	Par15r2	1992	2012	0.74	0.68
42	Par15r3	1992	2012	0.85	0.76
43	Par16r1	1991	2012	0.77	0.66
44	Par16r2	1991	2012	0.9	0.91
45	Par17r1	1992	2012	0.71	0.67
46	Par17r2	1992	2012	0.78	0.53
47	Par17r3	1992	2012	0.7	0.65
48	Par17r4	1992	2012	0.59	0.58
49	Par18r1	1992	2012	0.66	0.68
50	Par18r2	1992	2012	0.81	0.78
51	Par18r3	1992	2012	0.82	0.75
52	Par18r4	1992	2012	0.71	0.46A
53	Par19r1	1991	2012	0.81	0.77
54	Par19r2	1991	2012	0.62	0.71
55	Par19r3	1991	2012	0.77	0.87
56	Par21r1	1992	2012	0.77	0.73
57	Par21r2	1992	2012	0.65	0.67
58	Par21r3	1992	2012	0.8	0.81
59	Par22r1	1991	2012	0.72	0.53
60	Par22r2	1991	2012	0.73	0.76
61	Par23r1	1991	2012	0.48A	0.50A
62	Par23r2	1991	2012	0.69	0.68
63	Par23r3	1991	2012	0.66	0.55
64	Par24r1	1991	2012	0.87	0.83
65	Par24r2	1991	2012	0.6	0.38A
66	Par24r3	1991	2012	0.87	0.78
67	Par25r1	1992	2012	0.69	0.73
68	Par25r2	1992	2012	0.78	0.76
69	Par25r3	1992	2012	0.82	0.78
70	Par26r1	1992	2012	0.45A	0.57
71	Par26r2	1992	2012	0.72	0.71
72	Par26r3	1992	2012	0.63	0.62
73	Par27r1	1992	2012	0.6	0.48A
74	Par27r2	1992	2012	0.66	0.58

75	Par27r3	1992	2012	0.58	0.42A
76	Par28r1	1991	2012	0.71	0.58
77	Par28r2	1991	2012	0.84	0.45A
78	Par28r3	1991	2012	0.9	0.84
79	Par29r1	1991	2012	0.7	0.49A
80	Par29r2	1991	2012	0.8	0.58
81	Par29r3	1991	2012	0.77	0.8
82	Par30r1	1992	2012	0.75	0.7
83	Par30r3	1992	2012	0.81	0.76
84	Par31r1	1992	2012	0.85	0.78
85	Par31r2	1992	2012	0.88	0.86
86	Par31r3	1992	2012	0.78	0.73
87	Par31r4	1992	2012	0.92	0.9
88	Par32r1	1992	2012	0.7	0.64
89	Par32r2	1992	2012	0.9	0.94
90	Par32r3	1992	2012	0.71	0.64
91	Par32r4	1992	2012	0.71	0.59
92	Par33r1	1991	2012	0.77	0.83
93	Par33r2	1991	2012	0.73	0.49A
94	Par34r	1991	2012	0.75	0.64
95	Par34r1	1991	2012	0.66	0.63
96	Par34r2	1991	2012	0.7	0.68
97	Par35r1	1991	2012	0.20A	0.31B
98	Par35r2	1991	2012	0.69	0.55
99	Par35r3	1991	2011	0.66	0.35A
Correlación Promedio				0.74	0.68

Correlación Pearson 99%, nivel crítico de correlación 0,51; A: Correlación máxima obtenida;

B: Presencia de correlaciones más elevadas que en otras posiciones

ANEXO 3

VARIABLES METEOROLÓGICAS ESTACIÓN “GRANJA PORCÓN-CAJAMARCA”

Nombre Estación	Granja Porcón	Latitud	07°02'2"
Departamento	CAJAMARCA	Longitud	78°37'36"
Provincia	CAJAMARCA	Altitud	3261 msn
Distrito	CAJAMARCA		

Código	Estación	Variable	Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
359	Granja Porcón	Precipitación (mm)	1990	29.7	85.4	88.6	127.2	33.1	35.6	0.9	0.6	139.7	262.0	250.2	103.6
359	Granja Porcón	Precipitación (mm)	1991	94.7	355.5	509.6	248.6	287.0	6.3	0.0	0.0	78.7	157.6	221.5	250.1
359	Granja Porcón	Precipitación (mm)	1992	170.1	74.1	137.1	119.1	107.7	62.4	0.0	24.0	135.5	119.2	75.7	174.1
359	Granja Porcón	Precipitación (mm)	1993	147.6	190.6	374.3	437.8	102.7	19.8	0.0	18.4	82.6	137.5	206.2	452.6
359	Granja Porcón	Precipitación (mm)	1994	475.4	373.5	531.9	268.5	329.1	18.6	0.0	22.2	104.8	252.8	210.7	142.5
359	Granja Porcón	Precipitación (mm)	1995	139.7	228.8	217.7	127.8	112.7	12.6	51.8	48.9	54.9	96.5	125.9	243.9
359	Granja Porcón	Precipitación (mm)	1996	198.8	407.5	312.7	141.3	59.7	49.7	0.0	20.3	48.5	232.9	80.6	58.6
359	Granja Porcón	Precipitación (mm)	1997	186.9	190.3	123.2	260.0	81.0	18.5	39.0	9.9	80.5	169.2	301.6	305.1
359	Granja Porcón	Precipitación (mm)	1998	168.5	380.5	298.7	243.2	85.4	0.0	0.0	14.8	67.6	234.7	158.8	99.0
359	Granja Porcón	Precipitación (mm)	1999	210.3	494.2	253.5	126.0	166.7	53.9	20.3	6.4	228.3	65.3	138.6	166.4
359	Granja Porcón	Precipitación (mm)	2000	74.8	237.0	221.1	168.6	160.7	40.7	1.6	16.3	123.2	19.3	62.8	236.5
359	Granja Porcón	Precipitación (mm)	2001	341.1	227.7	419.2	92.6	88.7	17.6	15.2	0.4	145.2	169.5	156.1	171.8
359	Granja Porcón	Precipitación (mm)	2002	76.2	188.8	390.1	159.0	38.1	27.8	15.2	2.6	53.3	202.1	226.5	243.0
359	Granja Porcón	Precipitación (mm)	2003	103.8	134.9	124.3	81.2	76.0	54.4	28.9	15.6	47.2	101.8	112.6	100.0
359	Granja Porcón	Precipitación (mm)	2004	70.3	230.4	168.2	82.4	75.4	11.7	41.0	19.1	84.8	147.0	168.0	240.9

43674

359	Granja Porcón	Precipitación (mm)	2005	157.8	231.2	343.3	93.1	91.6	53.7	0.0	7.1	54.4	152.8	28.6	164.8
359	Granja Porcón	Precipitación (mm)	2006	145.5	188.1	345.7	184.7	62.8	62.0	5.1	15.7	116.6	39.8	158.5	183.6
359	Granja Porcón	Precipitación (mm)	2007	246.6	64.5	352.3	226.3	57.7	1.1	42.6	20.1	32.8	171.8	211.1	146.4
359	Granja Porcón	Precipitación (mm)	2008	190.6	291.2	252.4	150.3	76.0	73.3	16.0	11.0	110.9	182.6	127.3	66.4
359	Granja Porcón	Precipitación (mm)	2009	344.8	197.5	307.3	149.6	127.4	31.3	18.1	8.0	27.0	184.0	187.9	234.8
359	Granja Porcón	Precipitación (mm)	2010	108.0	169.7	275.7	163.5	83.1	39.4	44.3	33.6	29.6	82.7	96.5	182.6
359	Granja Porcón	Precipitación (mm)	2011	257.0	148.9	284.6	269.4	21.2	8.5	13.7	4.8	55.4	84.5	93.0	265.4
359	Granja Porcón	Precipitación (mm)	2012	325.9	320.0	155.7	210.7	109.6	32.4	0.0	45.8	33.7	137.7	202.5	67.6
359	Granja Porcón	Precipitación (mm)	2013	141.0											

Código	Estación	Variable	Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
359	Granja Porcón	Temperatura (°C)	1990	7.5	7.6	8.0	8.5	8.0	9.4	8.7	10.3	10.2	9.8	8.9	9.2
359	Granja Porcón	Temperatura (°C)	1991	9.1	10.4	9.5	8.0	10.2	9.3	7.4	8.3	9.7	8.7	7.8	9.7
359	Granja Porcón	Temperatura (°C)	1992	10.2	6.8	9.0	10.5	11.1	10.5	10.7	9.9	12.0	12.8	10.3	8.9
359	Granja Porcón	Temperatura (°C)	1993	11.4	12.5	11.1	11.2	12.2	10.2	9.8	9.5	9.3	9.2	10.4	12.1
359	Granja Porcón	Temperatura (°C)	1994	9.3	9.1	8.7	8.8	8.9	8.6	8.1	8.4	8.7	8.5	8.1	8.7
359	Granja Porcón	Temperatura (°C)	1995	9.2	10.6	8.6	8.9	7.7	10.2	9.7	8.5	7.8	5.0	5.3	7.0
359	Granja Porcón	Temperatura (°C)	1996	10.5	8.4	8.3	8.9	9.1	8.0	8.7	8.7	11.5	12.6	12.1	13.7
359	Granja Porcón	Temperatura (°C)	1997	9.4	9.9	10.1	9.9	10.4	8.9	10.5	10.7	10.5	10.6	10.7	11.0
359	Granja Porcón	Temperatura (°C)	1998	10.8	10.9	10.4	10.9	11.0	10.5	9.5	9.4	10.1	10.7	10.2	9.4
359	Granja Porcón	Temperatura (°C)	1999	9.7	9.7	9.7	10.8	9.8	9.2	9.2	9.0	9.2	10.0	9.9	9.5
359	Granja Porcón	Temperatura (°C)	2000	9.2	9.2	9.8	10.1	9.7	9.5	9.3	9.8	9.6	10.0	9.0	10.0
359	Granja Porcón	Temperatura (°C)	2001	9.7	10.3	10.1	10.4	10.0	9.6	9.4	10.4	9.7	10.6	10.2	10.6
359	Granja Porcón	Temperatura (°C)	2002	10.4	10.7	10.8	10.3	10.7	9.9	9.9	10.7	10.2	10.5	10.4	11.2
359	Granja Porcón	Temperatura (°C)	2003	11.1	10.9	10.3	10.9	10.3	9.6	9.9	10.4	10.2	10.4	10.5	10.2
359	Granja Porcón	Temperatura (°C)	2004	9.8	10.2	11.2	10.6	10.2	10.1	9.5	10.5	9.7	10.2	10.2	10.6

359	Granja Porcón	Temperatura (°C)	2005	10.1	11.1	10.7	11.1	9.8	9.8	9.7	10.2	10.4	9.7	9.5	9.6
359	Granja Porcón	Temperatura (°C)	2006	10.3	10.8	10.3	10.3	9.7	9.8	10.1	10.2	10.1	9.9	10.4	10.8
359	Granja Porcón	Temperatura (°C)	2007	11.2	10.4	10.7	10.3	10.1	9.8	9.8	9.3	10.1	9.9	10.5	9.5
359	Granja Porcón	Temperatura (°C)	2008	10.3	9.8	9.7	9.9	9.9	9.2	8.8	9.7	10.4	10.4	10.6	9.9
359	Granja Porcón	Temperatura (°C)	2009	10.3	10.1	10.5	10.9	10.3	9.5	10.0	10.5	10.5	10.9	10.4	11.0
359	Granja Porcón	Temperatura (°C)	2010	11.4	12.1	11.8	11.5	10.9	9.8	9.4	9.5	9.7	9.7	9.1	9.4
359	Granja Porcón	Temperatura (°C)	2011	9.9	9.6	9.5	10.3	10.2	10.2	9.8	9.9	10.3	7.9	10.6	10.4
359	Granja Porcón	Temperatura (°C)	2012	10.3	9.7	11.1	10.5	10.7	10.3	10.1	10.2	11.1	10.6	10.7	10.5
359	Granja Porcón	Temperatura (°C)	2013	11.7											

Fuente: Base de datos meteorológicos proporcionado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI.

ANEXO 4

VOLUMENES COMERCIALES POR PARCELA Y VOLUMEN REMANENTE PARA CADA ZONA

Zona no Raleada		Zona Raleada	
Nº de Parcela	Vol. comercial (m3)	Nº de Parcela	Vol. comercial (m3)
1	31.68	1	15.05
2	31.62	2	11.39
3	24.55	3	11.97
4	34.06	4	14.10
5	32.70	5	12.65
6	36.34	6	14.70
7	29.16	7	13.01
8	32.07	8	16.93
9	35.19	9	13.24
10	30.51		
Promedio	31.79	Promedio	13.67
Max	36.34	Max	16.93
Min	24.55	Min	11.39
s	3.32	S	1.72
Vol. remanente (m ³ /ha)	635.78	Vol. remanente (m ³ /ha)	273.45

Fuente: Elaboración propia.