

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA
ESCUELA DE POSGRADO
ESPECIALIDAD EN BOSQUES Y GESTIÓN DE
RECURSOS FORESTALES**



**DENDROCRONOLOGÍA DE LA ESPECIE *Pinus radiata* DE
PLANTACIONES DE LA GRANJA PORCÓN CAJAMARCA**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
*MAGISTER SCIENTIAE***

JAIME VÍCTOR MELO POBLETE

LIMA - PERU

2010

Melo, J. 2010. Dendrocronología de la especie *Pinus radiata* (D. Don) de plantaciones de la granja Porcón, Cajamarca. Lima, Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina.

RESUMEN

En la presente investigación se aplicó las técnicas dendrocrológicas y densitométricas, con rayos X en *Pinus radiata* D. Don. para analizar y determinar la edad de los árboles y la variación de la densidad aparente interna con relación a los factores climáticos: precipitación y temperatura. Se seleccionó siete (7) árboles de dicha especie de las plantaciones de la Granja Porcón. Cajamarca, de donde se extrajeron cinco muestras (tipo rodajas) a diferentes alturas, incluyendo el DAP. A continuación se hizo el análisis de la series de ancho de anillos utilizando los software COFECHA, ARSTAN y RESPO lo que permitió determinar la relación entre las variables climáticas y las series anillos, con la edad de los árboles. También se tomó muestras radiales para determinar la densidad aparente máxima, mínima y media en el perfil densitométrico. Los resultados mostraron una correlación positiva de 0.432, lo que demuestra que existe relación entre los anillos y la precipitación media anual, variable climática que influyó en el crecimiento de *P. radiata* de la Granja Porcón, En otras palabras la edad de los árboles está correlacionada al número de anillos existentes formados anualmente en cada individuo. La técnica densitométrica demostró versatilidad y eficiente para la determinación final de los límites entre anillos de crecimiento, demostrando la necesidad de su uso para potenciar el desarrollo de la dendrocronología.

Palabras clave: dendrocronología, densitometría, anillos de crecimiento, *Pinus radiata*, Porcón Cajamarca

Melo, J. 2010. Dendrochronology of *Pinus radiata* (D. Don) plantations from Porcón Farm, Cajamarca. Lima, Peru. La Molina National Agrarian University.

ABSTRACT

In this research we applied the techniques dendrocrológicas and densitometric with X-ray in *Pinus radiata* D. Don. In order to analyze and determine the age of trees and changes in the internal bulk density in relation to climatic factors: precipitation and temperature. I was selected seven (7) trees of that species of the Porcón Farm plantation in Cajamarca. Where were extracted five samples (type slices) at different heights, including DAP. Then analysis was done of the wide series of the growth rings using the software: COFECHA, ARSTAN and RESPO which allowed to determine the relationship between climatic variables and and the rings series with tree age. also took samples to determine radial bulk density maximum, minimum and mean in a densitometric profile. The results showed a positive correlation of the 0.432, This shows that there is a relationship between the rings and mean annual precipitation, climatic variable influencing growth of *P. radiata* of the Porcón Farm. In other words, the age of trees is correlated with the number of rings existing formed annually in each individual tree. The technique proved versatile and efficient densitometric to the final determination of the boundaries between growth rings, demonstrating the need for its use to promote the development of dendrochronology.

Keywords: Dendrochronology, densitometry, *Pinus radiata*, Porcón Cajamarca

ÍNDICE

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 La Región Cajamarca y la Granja Porcón	3
2.2 La especie <i>Pinus radiata</i> D. Don	3
2.2.1 Importancia actual en el mundo	3
2.2.2 Características generales de la especie <i>Pinus radiata</i>	4
2.2.3 Origen, distribución natural y ecología	7
2.2.4 Características generales de la madera	7
2.3 La Dendrocronología	8
2.3.1 Principios de dendrocronología	11
2.3.1.1 De uniformidad	11
2.3.1.2 De los factores limitantes	11
2.3.1.3 De la agregación de los factores ambientales	12
2.3.1.4 De la amplitud ecológica	13
2.3.1.5 Del principio del lugar de selección	14
2.3.1.6 De la datación cruzada o sincronización	14
2.3.1.7 De replicación	15
2.4 Factores que influyen en la formación de anillos de crecimiento	16
2.4.1 Ambientales	16
2.4.2 Precipitación	16
2.4.3 Temperatura	17
2.4.4 Suelo	17
2.4.5 Luz	18
2.4.6 Viento	18
2.4.7 Composición genética	19
2.4.8 Características del leño	19
2.4.9 Anomalías	20
2.5 Dendroclimatología	20
2.6 Densitometría de Rayos X	22
2.6.1 Rayos X en los estudios dendrocronológicos	22
2.7 Aplicación estadística en el estudio dendrocronológico	25
III. MATERIAL Y MÉTODOS	27
3.1 Descripción de la zona de estudio	27
3.1.1 Ubicación	27
3.1.2 Clima	28
3.1.3 Ecología y vegetación	28
3.1.4 Suelos	29

3.2 Selección del área de estudio y muestreo de árboles	30
3.2.1 Obtención de muestras	31
3.2.2 Preparación de las muestras para el análisis dendrocronológico	33
3.3 Análisis dendrocronológico	36
3.3.1 Medición del ancho de los anillos	36
3.3.2 Datación y sincronización	37
3.3.3 Elaboración de series cronológicas de anillos de crecimiento	37
3.3.4 Recopilación y análisis del registro meteorológico	38
3.4 Análisis densitométrico	39
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
4.1 Registro climático de la Estación Meteorológica de Porcón-Cajamarca	44
4.2 Análisis dendrocronológico de la especie <i>Pinus radiata</i>	45
4.2.1 Control de calidad de las series de ancho de anillos	45
4.2.2 Elaboración de series cronológicas de anillos de crecimiento	46
4.2.3 Análisis dendroclimatológico de series cronológicas de anillos de crecimiento	47
4.3 Análisis densitométrico	49
4.3.1 Variación de la densidad aparente del leño en el sentido radial del tronco de <i>Pinus radiata</i> por la técnica de densitometría de rayos X	49
V. CONCLUSIONES	52
VI. RECOMENDACIONES	53
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
ANEXO	61

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. <i>Pinus radiata</i> : a. Plantación en Porcón, b. Conos, c. Acículas	5
Figura 2. <i>Pinus radiata</i> : a. Forma del árbol y copa, b. Tipo de corteza	6
Figura 3. Sección transversal de la madera de <i>Pinus radiata</i>	8
Figura 4. Características de las células y variación de la densidad de la madera cuando las condiciones son limitantes	12
Figura 5. Amplitud ecológica de diferentes especies en relación con la altitud	13
Figura 6. Árboles desarrollados en diferentes suelos	14
Figura 7. Sincronización de anillos de crecimiento	15
Figura 8. Reacción de los árboles a la precipitación y la respuesta en los anillos	16
Figura 9. Efecto del suelo en anillos de crecimiento	17
Figura 10. Efecto de la luz sobre anillos de crecimiento	18
Figura 11. Efectos de los Vientos en la formación de anillos excéntricos	19
Figura 12. Influencia del clima en el crecimiento de los anillos de un árbol	22
Figura 13. Perfil densitométrico de una muestra de <i>Pinus caribaea</i> var. <i>Hodurensis</i>	25
Figura 14. Ubicación de la Granja Porcón-Cajamarca	29
Figura 15. Vista panorámica de las plantaciones de <i>P. radiata</i> en Porcón - Cajamarca	28
Figura 16. Selección del área de estudio: a. Áreas de muestreo, b. Muestreo de árboles	31
Figura 17. Secuencia de selección y marcación: (a) área de muestreo, (b) y (d) marcado de árbol, (c) marcado y orientación al Norte magnético	32
Figura 18. Secuencia de tumbado de árbol de <i>P. radiata</i> : (a) ubicación de árbol seleccionado, (b) inicio del corte de muesca, (c) muesca concluida y (d) corte final del árbol	32
Figura 19. Secuencia de obtención de rodajas de <i>P. radiata</i> : (a) Cortes a 1.30m DAP, (b) verificación del espesor del corte de la rodaja, (c) marcado según orientación del Norte magnético y (d) codificación para embalaje	33

Figura 20. Secuencia de embalaje de muestras de <i>P. radiata</i> para traslado a laboratorio: (a), (b) y (c) rodajas cortadas a 1.30m (DAP) lote 1 y 2, (d) bolsa de polietileno codificada, en función a cada individuo seleccionado y cortado, con información adicional	34
Figura 21. Pulimiento de muestras en laboratorio: (a) equipos de pulimiento, (b) lijas de diferente grado y (c) pulimiento de rodaja	34
Figura 22. Rodajas pulidas para su análisis macroscópico	35
Figura 23. Marcado: (a) Radios de acuerdo a la orientación geográfica, (b) selección radios para el caso de las muestras de <i>P. radiata</i>	35
Figura 24. Marcado de los anillos de crecimiento	36
Figura 25. Marcado y medición de anillos de crecimiento con equipo de medición Velmex	37
Figura 26. Orientación del corte en la sección transversal y selección de dos muestras de radios para su exposición a rayos X	39
Figura 27. (a) y (b) Corte con sierra de disco doble y obtención de sub-muestras radiales para exposición a rayos X	40
Figura 28. Muestras de radios cortados a un espesor de 2 mm y listos para su acondicionamiento y posterior irradiación	41
Figura 29. Equipo de rayos X Hewlett Packard Faxitron 43805N: (a) vista frontal y (b) vista interna	41
Figura 30. (a) y (b) Acondicionamiento de las muestras de radio en Cámara de Rayos X	42
Figura 31. Placas radiográficas digitalizadas, sub-muestras irradiadas e imagen de archivo "DEN", reconocido por el programa CERD	42
Figura 32. Temperatura y Precipitación media anual para el periodo de 1974-2004 en la Granja Porcón	44
Figura 33. Series en el ancho de los anillos de crecimiento (línea azul), serie maestra obtenida por los índices en los anillos de crecimiento con el programa COFECHA y número de muestras utilizadas en el análisis del bosque de Porcón (línea rosada)	45
Figura 34. Correlación entre la cronología master con la temperatura media anual obtenida en la Granja Porcon	48
Figura 35. Correlación entre la cronología master con la precipitación media anual obtenida en la Granja Porcon	48

Figura 36. Correlaciones entre índices de anillos de crecimiento con las variables climáticas mensuales obtenidas en la Granja Porcon	49
Figura 37. Perfil radial de la densidad aparente en árboles de <i>P. radiata</i>	50
Figura 38. Demarcación del límite exacto de anillos de crecimiento en la especie <i>P. radiata</i> , identificación de algunos anillos en el perfil densitométrico	51

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Localización y superficie ocupada de <i>P. radiata</i> en su área natural	7
Cuadro 2. Ubicación de los árboles muestreados en el área de estudio de la Granja Porcón	30
Cuadro 3. Inter correlación de las series de ancho de anillos de la especie <i>P. radiata</i>	46
Cuadro 4. Edad y número de anillos de crecimientos de cada individuo muestreado en las plantaciones de <i>P. radiata</i>	47
Cuadro 5. Densidad aparente de la madera de árboles de <i>P. radiata</i>	51

ÍNDICE DE ANEXO

	Pág.
ANEXO 1. Series de ancho de anillos de las muestras de <i>Pinus radiata</i>	62
Anexo 1.1 Series de ancho de anillos de la muestra Pinus 1	62
Anexo 1.2 Series de ancho de anillos de la muestra Pinus 2	62
Anexo 1.3 Series de ancho de anillos de la muestra Pinus 3	63
Anexo 1.4 Series de ancho de anillos de la muestra Pinus 4	63
Anexo 1.5 Series de ancho de anillos de la muestra Pinus 5	64
Anexo 1.6 Series de ancho de anillos de la muestra Pinus 6	64
Anexo 1.7 Series de ancho de anillos de la muestra Pinus 7	65
ANEXO 2. Relación de radios seleccionados para densitometría	66
ANEXO 3. Perfil de densidad aparente de la madera de <i>Pinus radiata</i>	67
Anexo 3.1 Perfil de densidad aparente de la madera de <i>Pinus radiata</i> correspondiente a la muestra P1	67
Anexo 3.2 Perfil de densidad aparente de la madera de <i>Pinus radiata</i> correspondiente a la muestra P2	67
Anexo 3.3 Perfil de densidad aparente de la madera de <i>Pinus radiata</i> correspondiente a la muestra P1	68
Anexo 3.4 Perfil de densidad aparente de la madera de <i>Pinus radiata</i> correspondiente a la muestra P5	68
Anexo 3.5 Perfil de densidad aparente de la madera de <i>Pinus radiata</i> correspondiente a la muestra P7	69

I. INTRODUCCIÓN

Las plantaciones forestales de la Granja Porcón, ubicadas en la cabecera de la cuenca del Río Jequetepeque, fueron establecidas con fines ecológicos, económicos y sociales dentro del marco del "Proyecto Piloto de Reforestación en la Zona de Porcón", que la Comisión Europea con el gobierno belga y peruano ejecutaron entre 1981 y 1989 llegando en la actualidad a una extensión de 9000 ha (ADEFOR, 2005) teniendo como principal especie a *Pinus radiata*.

El estudio de anillos de crecimiento de los árboles ha incursionado en los últimos años en diversas áreas científicas, siendo una de ellas la climatología que reconstruye precipitaciones, temperaturas, retrocesos de glaciares y fenómenos oceánico-atmosféricos (Worbes, 1989; Vetter y Botosso, 1989; Vetter, 2000). Las series de ancho de anillos pueden ser modeladas para reconstruir con gran precisión las variaciones anuales o estacionales de la temperatura y la precipitación debido al registro ambiental que se guarda en ella, es decir, el crecimiento de los árboles es el resultado que integra un conjunto de estímulos ambientales bióticos (luz, competencia, vientos) y físicos (ej., temperatura, precipitación), e incorpora esa información en la estructura de sus anillos, convirtiéndolos en verdaderos "archivos ambientales" (Tomazello *et al.*, 2001).

En zonas donde los climas son marcadamente diferenciados, veranos muy calurosos e inviernos muy fríos, estos cambios climáticos quedan claramente registrados en los anillos de crecimiento (Fritts, 1976). La importancia de este tipo de estudio radica en la determinación de la edad de los árboles y otras características como información de actividades silviculturales y manejo forestal brindando bases para pronósticos de producción.

Para el estudio de anillos de crecimiento es necesario conocer las diferentes técnicas que evalúan el crecimiento del árbol relacionado con los factores ambientales, por medio de la

aplicación de nuevas técnicas complementarias que ayudan a su mejor entendimiento.

La Densitometría es una técnica basada en la medición de la densidad interna de una pieza de madera. Comúnmente utilizada en la medicina, hoy se aplica en investigaciones forestales, consiste en la irradiación de pequeñas secciones de madera para obtener una lectura interna de su estructura y de la densidad de sus anillos con fines de analizar la calidad del leño y estudiar los anillos de crecimiento marcando los límites de máxima y mínima densidad o el límite de anillos de crecimiento.

Pinus radiata es un buen indicador para este tipo de estudios con los que se puede estudiar los anillos de crecimiento y determinar la edad de los árboles; la relación de la edad con los estudios densitométricos y finalmente la relación densitometría de los árboles en relación a los factores climáticos como son precipitación y temperatura. Con el presente trabajo se contribuye a la investigación forestal y la de implementar esta tecnología en los centros de enseñanza a fin de estudiar nuestros recursos forestales en las diferentes regiones del país; para lo cual se tiene como objetivos los siguientes:

1.1 Objetivo general

Realizar el estudio dendrocronológico de la especie *Pinus radiata* en las plantaciones forestales de la Granja Porcón en Cajamarca

1.2 Objetivos específicos

- Determinar la edad de los árboles de *P. radiata* a través del análisis de anillos crecimiento,
- Identificar el límite exacto de anillos de crecimiento los árboles mediante la técnica de densitometría por rayos X,
- Analizar la relación existente entre los factores climáticos como precipitación y temperatura registrados en la granja Porcón Cajamarca y la secuencia de anillos de crecimiento encontrados en el leño de los árboles interpretando la incidencia del clima en el crecimiento de los árboles.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 La Región Cajamarca y la Granja Porcón

La población de Región Cajamarca basa su economía en el gran potencial que tienen sobre sus tierras. Su superficie es de 1'703,921 ha, de las cuales 618,210 ha son agrícolas (80% secano y 20% bajo riego); 664,115 ha pasturas; 288,939 ha montes y bosques, y 132,657 ha otro tipo de tierras; todas en general son las que sustentan la vida del local mayoritariamente rural, la que alcanza 72% de la población total.

Si bien esta región cuenta con condiciones ecológicas favorables para las actividades agropecuarias, contradictoriamente las 13 provincias cajamarquinas pertenecen al tercio más pobre de las 150 provincias peruanas (BCR, 1981; MINAG, 2005).

La Cooperativa Agraria Atahualpa - Jerusalén, mejor conocida como "Granja Porcón" presenta una población conformada por aproximadamente 150 familias, cuya economía se ve sustentada principalmente en la actividad forestal, ganadera, agrícola y turística, que constituye una Comunidad única y modelo en Perú. Los recursos forestales que fueron plantados son valorizados en 14 millones de dólares, representando un capital importante para desarrollar actividades complementarias (MINAG, 2005).

2.2 La especie *Pinus radiata* D. Don

2.2.1 Importancia actual en el mundo

Según Gandullo *et al.* (1974) *P. radiata*, conocida también como pino insigne, pino de Monterrey o pino radiata, tiene buen crecimiento, con una precocidad que alcanza volúmenes de producción altos con madera de calidad aceptada para diversos usos en corto

tiempo. Esta situación, ha propiciado su utilización en regiones de la zona templada de todo el mundo. Varios países del hemisferio Sur adoptaron al pino en sus programas de forestación y reforestación. Nueva Zelanda fue el pionero, comenzando entre 1920-1930. A partir de los años 1960 renace nuevamente el interés por esta especie y se relanza repoblaciones que se prolonga hasta hoy, convirtiendo a Nueva Zelanda en principal productor de madera de esta especie (Genova, 1994; Ruíz *et al.*, 1993).

En Australia y Sudáfrica el pino ha tenido una buena acogida, entre los países hispanos del hemisferio Sur figura Chile con el primer lugar debido al desarrollo alcanzado en la actividad forestal con plantaciones de esta especie. Las repoblaciones se iniciaron en los años cincuenta, convirtiendo a ese país con la mayor extensión del mundo (1.400.000 has), aprovechando unos 17.500.000 m³/año. En la actualidad Chile y Nueva Zelanda presentan gigantescas producciones enfocadas principalmente a la exportación de esta especie (Cameron, 1978; CORMA, 2008).

En Europa el pino fue introducido en 1940-1972: Italia, Francia, España y Portugal y otros países; sin embargo, España, fue el único país donde dicha especie prosperó, que partiendo de 162.000 hectáreas la producción de madera ya pasaron de 15 millones de m³ en 1970 a 30 millones m³ en el año 2000 (Rodríguez, 2003).

En Perú los bosques de pinos en forma de macizos lo podemos encontrar en la Granja Porcón, Cajamarca, resultado del esfuerzo de la Comunidad Campesina Atahualpa de Jerusalén, que por más de treinta años logró establecer 9,000 hectáreas de pino, de tal forma que en la actualidad la sierra peruana se considera como un enorme potencial para establecer plantaciones con dicha especie. El éxito de esta plantación fue posible por el apoyo de las instituciones locales, nacionales y la cooperación técnica y financiamiento internacional (MINAG, 2005).

2.2.2 Características generales de la especie *Pinus radiata*

La especie *Pinus radiata*, del género *Pinus* pertenece a la familia de las Pinaceas, ampliamente conocido y de fácil identificación. De tallo cónico con hojas tipo aguja, conocidas como acículas formando el llamado “Arbolito de navidad” y con infrutescencias características en forma de conos o piña (Figura 1).



Figura 1. *Pinus radiata*: a. Plantación en Porcón, b. Conos, c. Acículas

Los brotes de primavera son multinodales, agrupándose en uno o más ramas de verticilos. Las acículas se agrupan, en fascículos de tres, entre 7-18cm; siempre se mantienen verdes por 2-4 años. La copa cónica de aspecto muy denso, de tonalidad más oscura que otros géneros) (Wikisilva, s/f; Del Valle *et al.*, 1999).

En su hábitat original florece a finales de invierno o a principios de primavera, madurando los conos (piñas) en el segundo otoño. Los frutos tienen carácter serótino, o sea, durante muchos años permanecen sujetas al árbol, conservando viable la semilla. Sólo se abren temporalmente, cuando hace calor fuerte, soltando parte de los piñones y volviendo a cerrarse después siendo favorecida su diseminación por eventuales incendios forestales. El peso medio de cada fruto es de 100g; cada planta presenta de 70-120 piñones. Un kilogramo de semillas tiene un número 35.000 unidades aproximadamente (Del Valle *et al.*, 1999).

La altura del árbol alcanza hasta 40 m; sin embargo en sitios más expuestos y con suelo superficial, no pasa de 10m, siendo su altura media por lo general de 20m. Porte regular, piramidal en la juventud y finalmente ensanchado, globoso o truncado a su madurez. Tronco recto, bastante cónico, ramas verticales en forma de candelabro horizontales o erecto, patentes en el arranque, vertical y ascendente en sus extremos, cortas en relación a los entrenudos, dando al árbol un aspecto característico. Las ramas son bastante persistentes aún con falta de luz por lo que para su eliminación no basta con buscar una máxima espesura, sino que es necesario realizar las podas artificialmente. Si bien con la espesura no se eliminan las ramas, esta si tiene influencia en desarrollo y por tanto en el tamaño de los nudos de la madera. Los diámetros pueden ser superiores a 1m; sin embargo, son menores por su corta vida, que no dura más de 100 años en bosques naturales. En árboles adultos presentan una corteza rugosa y gruesa que puede alcanzar los 8cm de espesor (Figura 2) (Rodríguez, 2003; Gerding, 1991).

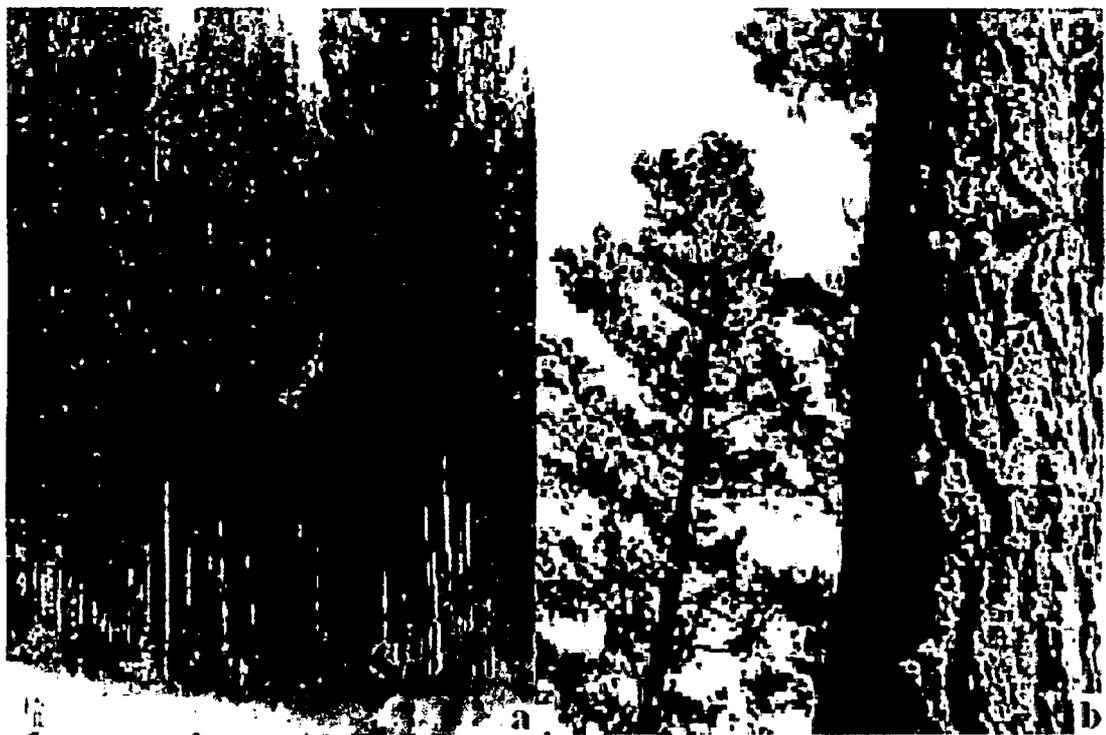


Figura 2. *Pinus radiata*: a. Forma del árbol y copa, b. Tipo de corteza

2.2.3 Origen, distribución natural y ecología

Existen restos fósiles que revelan la presencia de *P. radiata* desde el Pleistoceno en una banda continua a lo largo del litoral californiano (Cuadro 1). En la actualidad, debido a la introducción en muchos países del mundo su distribución y abundancia es más amplia que la que tenía en su centro de origen.

Cuadro 1. Localización y superficie ocupada de *P. radiata* en su área natural

Localidad	País	Altitud (msnm)	Latitud °S	Superficie (ha)
Swanton	California, USA	0- 224	37	400
Monterrey	California, USA	0- 300	36	4000
Cambria	California, USA	0-91	35	1200
Isla Guadalupe	Mexico	400- 1160	29	100
Isla Cedros	Mexico	300- 640	28	100
Total				5800

Fuente: Gandullo (1974)

2.2.4 Características generales de la madera

La albura es de color blanco-amarillento, que se oxida con la luz; el duramen poco-mediano, pardo amarillento a pardo marrón o castaño. Nudos normalmente sanos, firmes de color castaño oscuro. Anillos de crecimiento notorios; fibra recta, excepto en anillos próximos a la médula; textura homogénea y fina; olor levemente resinoso; grano medio a fino; esponjosa, ligeramente mediana; y muy poco resinosa.

Esta especie tiene un gran potencial para la realización de estudios dendrocronológicos, por la formación de anillos de crecimiento, distinguibles cada año, teniendo una cronología exacta de su historial de vida a partir de una plantación, donde se verifica los factores naturales o antrópicos que influyeron en su desarrollo. En árboles con tortuosidad, bifurcaciones y otros síntomas de ataque de insectos se presentan problemas en su investigación, que pueden superarse usando técnicas de subsanación (Dieterich & Swetnam, 1984) (Figura 3).

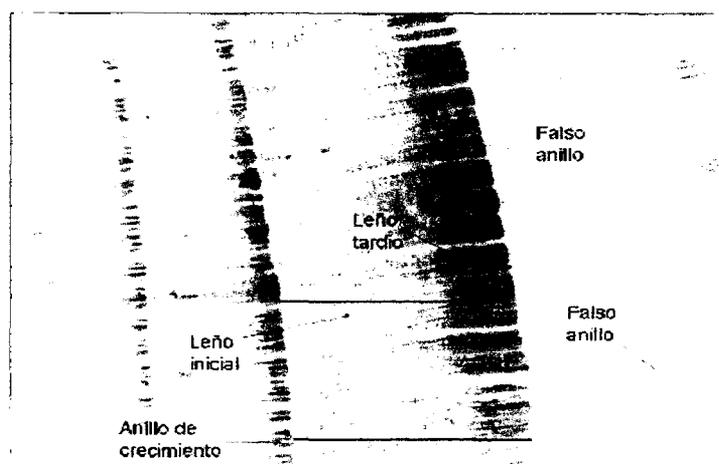


Figura 3. Sección transversal de la madera de *Pinus radiata*

Los anillos de crecimiento son bien diferenciados delimitados por una franja estrecha de leño tardío más oscuro. Los anchos de anillos son bastantes irregulares, amplios sobre todo en los primeros años de edad, haciendo más regulares y estrechos en los últimos años.

Los valores absolutos de resistencia a la rotura son bajos, sus cotas indican la buena disposición de esta manera a los esfuerzos mecánicos, resistente, elástica, muy flexible, medianamente tenaz y adherente (Del Valle *et al.*, 1999).

La madera más cotizada se sitúa en los seis primeros metros a partir de la base del árbol y en la zona comprendida entre el duramen y la corteza (Heghes, 1967; Zahner, 1967; Kellogg, 1982), porque integra una variedad de elementos anatómicos dentro de una simple característica física determinados por los valores medios (Polge, 1978).

2.3 La Dendrocronología

La palabra dendrocronología proviene del griego *dendros* que significa árbol, *cronos* que significa tiempo y *logos* que significa estudio. Corresponde al estudio de la edad de los árboles teniendo en consideración que cada árbol registra fenómenos ambientales que modifican de alguna manera el crecimiento de los árboles. Las primeras observaciones que relacionaron el ancho de los anillos de los árboles con el clima datan del siglo XV, y fue el propio Leonardo da Vinci quien reconoció la correlación entre las precipitaciones y los anillos anuales de árboles (Ceballos, s.f.; Bolsojardín, 2007).

La dendrocronología es considerada también como una disciplina que estudia el fechado y la reconstrucción de eventos naturales, tales como: clima, incendios forestales, actividad volcánica y otros, partiendo de los anillos de crecimiento de los árboles (Correa, 2004). Por ello las aplicaciones de la ciencia son múltiples, siendo entre las más importantes: dendroclimatología, que reconstruye el clima pasado; dendroecología, que examina los factores que influyen en el ecosistema como por ejemplo el cambio de crecimiento derivado del aumento del CO₂ del último siglo, infestaciones con insectos, aparición de determinadas plagas, etc.; dendrogeomorfología, que fecha procesos de superficie terrestre como movimientos del suelo, hundimientos, deslizamientos de tierra, etc.; dendrosismología, que estudia efectos de sismos y terremotos que registran los árboles evidenciándose por los daños físicos que producen tales eventos; dendroglaciología, que investiga y fecha la dinámica de los glaciares de antes y de ahora, cambios en el frente de los glaciares; dendrohidrología, que investiga y fecha la dinámica del entorno acuoso, cambios en la hidrología del sitio, etc.; dendroarqueología, que determina cuándo se derribaron los árboles y cuándo se emplearon en la construcción y por último la dendropirocronología, que investiga y fecha la dinámica de los incendios naturales de antes y de ahora (Kipfmüller & Swetnam, 2001; Schiweingruber *et al.*, 1990)

Douglass (1914) a través de los anillos del género *Pinus* encontró un método para la estimación de la precipitación del pasado en un periodo mayor al que abarcan los registros instrumentales. Es a partir de estos primeros trabajos, en anillos de crecimiento, que muchas especies leñosas han resultado ser una herramienta de gran utilidad para reconstruir la variabilidad climática a escala de siglos o milenios (Amaral y Tomazello, 1998; Fritts *et al.*, 1991; Renfrew y Bahn, 1993).

Existen otros trabajos cronológicos que retroceden en el tiempo más de 10.000 años para robles de la ribera de ríos del sur de Alemania, el Rin y el Meno. *P. aristata* Engelm (pino bristlecone) en el suroeste de los EEUU en White Mountains-California ha proporcionado una cronología que se extiende más de 8.500 años (Renfrew y Bahn, 1993; Sinteriza y Swetnam, 1989).

En Sudamérica, las primeras cronologías fueron desarrolladas por Schulman (1956) en *Austrocedrus chilensis* (D. Don) Pic-Serm. & Bizzarri y *Araucaria araucana* (Mol.) Koch.

en Chile y Argentina. El género *Austrocedrus* resultó versátil, aunque las relaciones entre crecimiento y clima al inicio resultaron ambiguas. Sin embargo, a comienzo de 1970 esta especie sirvió en la reconstrucción preliminar de las precipitaciones de la ciudad de Santiago de Chile, abarcando la evaluación hasta el año 1010 A.C., desde ahí en Chile se han desarrollado más de 100 estudios cronológicos usando diferentes especies leñosas.

Kipfmüller & Swetnam (2001) manifiestan que mediante análisis en laboratorio se mide el espesor de los anillos de muestras tomadas en la base del árbol; tomando muestras de diferentes lugares y diferentes estratos en una región concreta, los investigadores pueden construir una secuencia histórica que se convierte en parte del registro científico. Por ejemplo, madera antigua encontrada en edificios puede ser fechada para proporcionar una indicación sobre cuanto vivió y creció el árbol del que procede, fijando un límite superior para la edad de esa madera. El aporte y el valor científico de la dendrocronología son proporcionados a través de ejemplares exactamente fechados en un año determinado, permitiendo comprobar y calibrar la exactitud de dataciones mediante radiocarbono. Así como el pino bristlecone, con su excepcional longevidad y lento crecimiento, ha podido ser utilizado con este propósito al proporcionar patrones de anillos que se remontan miles de años en el tiempo, en algunas regiones de los EE.UU. hay disponibles secuencias de más de 10.000 años.

Fritts (1976) señaló que informaciones climáticas a través de la dendrocronología pueden realizarse con maderas fósiles dándonos información además de la vegetación existente de la época, así como los climas y temperaturas que existieron cuando los árboles estaban vivos.

La formación de anillos de crecimiento anuales está íntimamente relacionada con las condiciones climáticas y ambientales. Así en climas donde hay diferencias estacionales, se producen células grandes y de paredes delgadas en primavera y células más pequeñas y de paredes gruesas en invierno. En los climas cálidos de temperatura uniforme y en los trópicos el crecimiento es continuo y constantemente se agregan células a la madera sin que se hagan evidentes los anillos. Como los árboles reaccionan de preferencia a los cambios de temperatura, cualquier cambio climático queda registrado en los anillos de crecimiento de los árboles. Esto lo podemos fácilmente observar en las maderas petrificadas e inferir las

condiciones ambientales y climáticas en que se desarrollaba la planta y por tanto inferir datos sobre los climas del pasado (Torres, 2008).

2.3.1 Principios de dendrocronología

2.3.1.1 De uniformidad

Este principio establece que los procesos físicos y biológicos que rigen los actuales procesos ambientales se relacionan con los patrones de crecimiento de los árboles y que han ocurrido desde el pasado, es decir, "el presente es la clave del pasado" (Hutton, 1785). Sin embargo, a este principio, se le ha adicionado: "el pasado es la clave del futuro", en otras palabras, modelando las condiciones ambientales que operaron en el pasado, podemos predecir y administrar aquellas que se presentarán en el futuro.

2.3.1.2 De los factores limitantes

Sostiene que la tasa de crecimiento de una planta se encuentra condicionada 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 plantas y, por tanto, para la formación de anillos. En estas regiones, el crecimiento del árbol no puede proceder más rápidamente 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 (Días *et al.*, 2001; Sinteriza y Swetnam, 1989).

En la Figura 4 se presentan las características de las células y las variaciones de la densidad de la madera dependiendo de los factores limitantes. Henri & Grissino-Mayer (2008), señalan que otros lugares, como de altas latitudes, la temperatura es el factor limitante que afecta la tasa de crecimiento de los árboles.

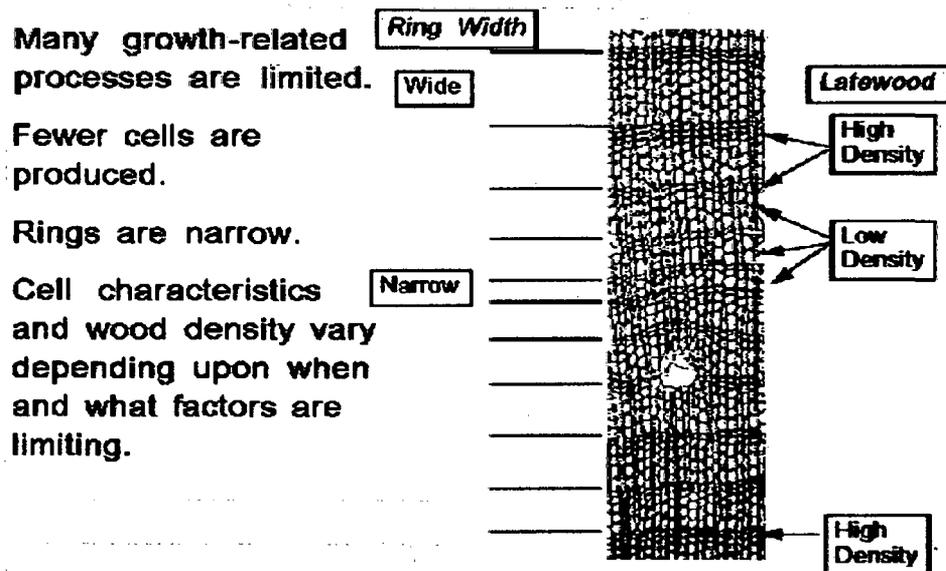


Figura 4. Características de las células y variación de la densidad de la madera cuando las condiciones son limitantes

2.3.1.3 De la agregación de los factores ambientales

Cook (1989) estableció que cualquier serie individual que modela el crecimiento de los árboles en el tiempo puede ser "descompuesta" en un conjunto de factores ambientales. De este modo, podemos expresar en términos matemáticos que el crecimiento del anillado del árbol (R) en un año " t " cualquiera, está compuesto por varios factores, entre los que podemos mencionar:

$$R_t = A_t + C_t + \delta D1_t + \delta D2_t + E_t.$$

Donde:

A: tendencia de la edad relativa de crecimiento debido al proceso de envejecimiento fisiológico normal

C: clima que se presenta durante ese año

D1: ocurrencia de factores endógenos, es decir, relativos únicamente al propio árbol como individuo

D2: ocurrencia de factores exógenos, es decir, aquel disturbio externos que afecta a todos o un grupo importante de individuos

E: Valor aleatorio, error por los procesos no considerados debido a la influencia de otros factores.

δ : Delante de D1 y D2 asume el valor de "0" ó "1" según indique ausencia o presencia de la señal de disturbio, respectivamente. Por consiguiente, para maximizar la señal ambiental deseada, los otros factores deben ser minimizados. Por ejemplo, si queremos maximizar la señal climática, la tendencia de la edad relativa debe ser anulada, así como los procesos ecológicos internos y externos que podrían haber afectado el crecimiento de los árboles.

2.3.1.4 De la amplitud ecológica

Establece que una especie es más sensible a los factores ambientales en los límites latitudinales y de elevación de su rango de hábitat. Por ejemplo, *P. ponderosa* Laws. tiene una amplitud ecológica extensa, debido a que es la especie de pino más ampliamente distribuida en Norteamérica. Recíprocamente, la secoya *Sequoiadendron giganteum* (Lamb.) Hook. f. crece en áreas restringidas de la ladera oeste de Sierra Nevada en California, teniendo por consiguiente, una amplitud ecológica más estrecha. Este principio es importante porque frecuentemente las especies de árboles utilizados en dendrocronología se encuentran en los límites de su rango natural. La Figura 5 muestra diferentes tipos de bosque de acuerdo al incremento de la altura a lo largo de la ladera de una montaña. Para maximizar la información climática disponible en los anillos del *P. ponderosa*, por ejemplo, se tomarían muestras de árboles en su límite latitudinal más bajo alrededor de 2130 msnm.

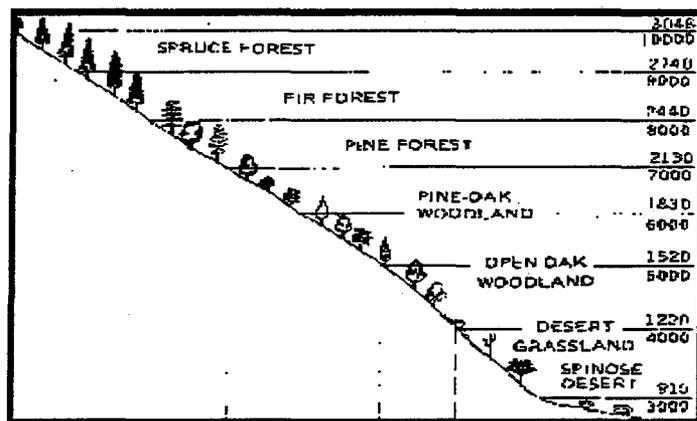


Figura 5. Amplitud ecológica de diferentes especies en relación con la altitud

2.3.1.5 Del principio del lugar de selección

Wimmer (1999), estableció que para estudios dendrocronológicos debe identificarse y seleccionar aquellos lugares que produzcan series de anillo sensibles a los cambios ambientales que están siendo examinados, a fin de maximizar dichas señales ambientales. Por ejemplo, aquellos árboles que son especialmente sensibles a condiciones de sequía pueden usualmente ser encontrados donde la lluvia es limitada, por ejemplo en afloramientos rocosos, o en la cima de las montañas. Por tanto, un investigador interesado en condiciones de sequía pasadas tomaría muestras intencionalmente en localidades donde el suministro de agua sea limitado. Los árboles que se desarrollan en diferentes suelos bien drenados, con buena acumulación de agua forman anillos homogéneos, en cambio suelo con poca profundidad y poca retención es más sensible a factores, como precipitación, desarrolla anillos estrechos (Figura 6).

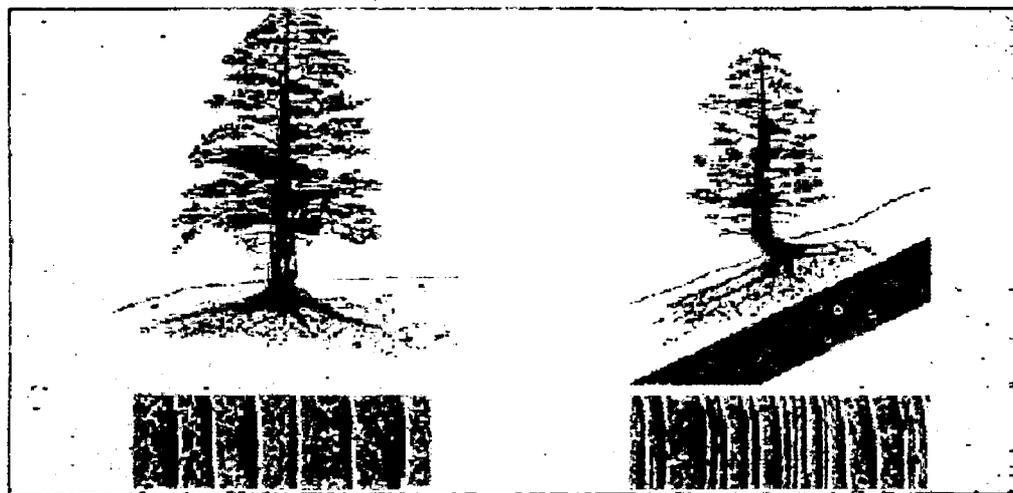


Figura 6. Árboles desarrollados en diferentes suelos

2.3.1.6 De la datación cruzada o sincronización

Esta sincronización se basa en el planteamiento de Schulman (1956) y los cambios anuales del macroclima; puesto que todos los árboles padecen estos cambios macro climáticos, algunos años se notan en todas las secuencias. De tal manera que, si se hace coincidir la secuencia de los anillos entre muchas series de crecimiento de árboles se puede

identificar el año exacto en el cual cada anillo fue formado. Por ejemplo, uno puede fechar la construcción de una casa antigua, comparando los patrones de crecimiento de los árboles a partir de madera tomada de la casa con patrones de crecimiento de árboles vivos; tal como se presenta en la Figura 7, donde la sincronización de los anillos de crecimiento sirve para conocer la edad de nuestros bosques.

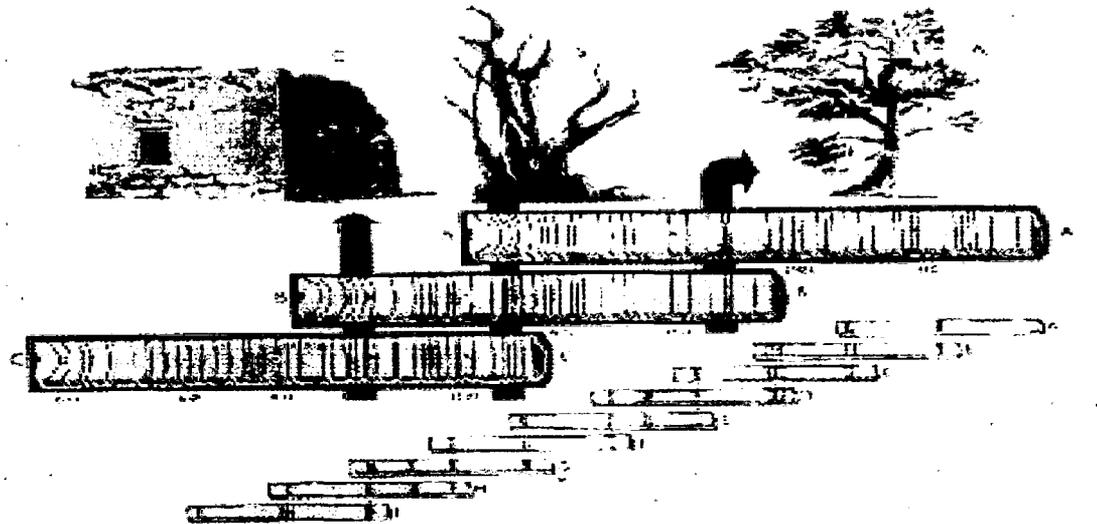


Figura 7. Sincronización de anillos de crecimiento

2.3.1.7 De replicación

Según este principio se puede maximizar la señal medioambiental que está siendo investigada reduciendo al mínimo la cantidad de "disturbio". Para lograrlo, se toman muestras de más de un radio del tallo por árbol, y más de un árbol por sitio, es decir diferentes réplicas de un centro de incremento por árbol, de tal manera que reducimos altamente la cantidad de "variabilidad intra-árbol", señal medioambiental no deseable. Más aún, si obtenemos numerosas muestras de árboles de un lugar, y quizás desde muchos lugares en una región, podemos asegurar que la cantidad de "disturbio" (factores ambientales que no están siendo investigados, como la contaminación del aire) sea mínima (Grissino, 1996).

2.4 Factores que influyen en la formación de anillos de crecimiento

2.4.1 Ambientales

Los factores ambientales ejercen influencia sobre la estructura anatómica, en la actividad cambial, en el proceso de diferenciación celular, expansión celular y crecimiento de las paredes celulares, así como en la formación de elementos secundarios. El resultado son anillos de crecimiento que poseen un número variable de células, de diferentes estructuras con paredes celulares de diversos espesores, y células conteniendo materiales secundarios variados (Stokes y Smiley, 1996).

2.4.2 Precipitación

Según Schweingruber (1990), en regiones con altas precipitaciones el ancho de anillos varía ligeramente, pero con una cantidad de leño tardío alto que varían considerablemente; mientras que en regiones con precipitaciones mínimas, la secuencia de anillos es extremadamente variable y un año puede ser indicador de la presencia de algún fenómeno meteorológico, es fácil apreciar la reacción de los árboles a las variaciones de precipitación alta y fluctuante (Figura 8).

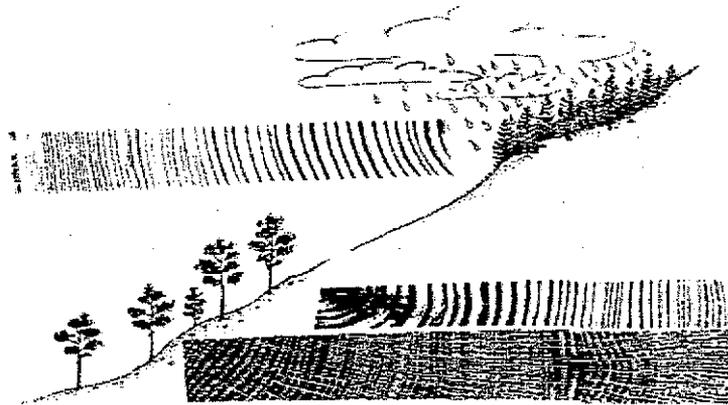


Figura 8. Reacción de los árboles a la precipitación y la respuesta en los anillos

2.4.3 Temperatura

En regiones con climas marcadamente diferenciadas, los veranos son muy calurosos y los inviernos muy fríos. Estos cambios climáticos quedan claramente registrados en los anillos de crecimiento. En aquellos climas cálidos donde las temperaturas son uniformes puede no marcar anillos bien diferenciados por lo que en este aspecto es necesario tomar otro tipo de factor limitante y usar otras técnicas de evaluación (Stokes y Smiley, 1996).

2.4.4 Suelo

El drenaje, profundidad y la cantidad de nutrientes del suelo determina la proporción de crecimiento considerablemente. Si consideramos, por ejemplo, el tipo de suelo: arenoso, no habrá buena retención de agua, produciendo el efecto de una precipitación menor. De forma análoga, dado que el viento aumenta la evaporación, también puede tener el efecto de condiciones relativamente más secas. En la figura 9 se muestra la influencia de este factor sobre los anillos de crecimiento. En suelos profundos, bien drenados, con buena humedad, se desarrollan árboles altos vigorosos, copa compacta y anillos bien anchos; en suelos rocosos, sin capacidad de retener agua, se desarrollan árboles pequeños con poco vigor, con copa rala y anillos delgados; y finalmente en suelos inúndales, donde el nivel de agua subterránea es alto, se desarrollan árboles pequeños, con mucho menos vigor, copa finísima y frecuentemente con anillos estrechos (Hughes, 1982).

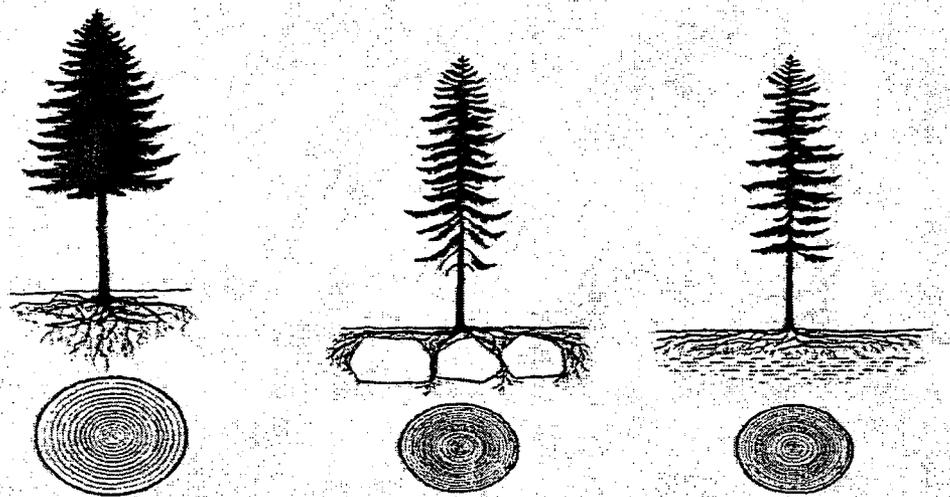


Figura 9. Efecto del suelo en anillos de crecimiento

2.4.5 Luz

El crecimiento claramente responde por la disponibilidad de luz solar. Los aclareos por incendios, tormentas o manejo forestal producirán en el siguiente año notablemente anillos muy anchos. El árbol que crece bajo una densa cobertura recibe poca iluminación resultando en una drástica reducción en el ancho del anillo. En la figura 10 izquierda se observa, árboles de abeto dominantes formando anillos anchos a comparación del abeto suprimido, que forma anillos estrechos y el repentino suplemento de luz que fue dado por la corta del abeto dominante frente al abeto suprimido ocasionó un incremento en el ancho de los anillos del mismo (Figura 10 derecha) (Agrobyte, 2008; Díaz, *et al.*, 2007).

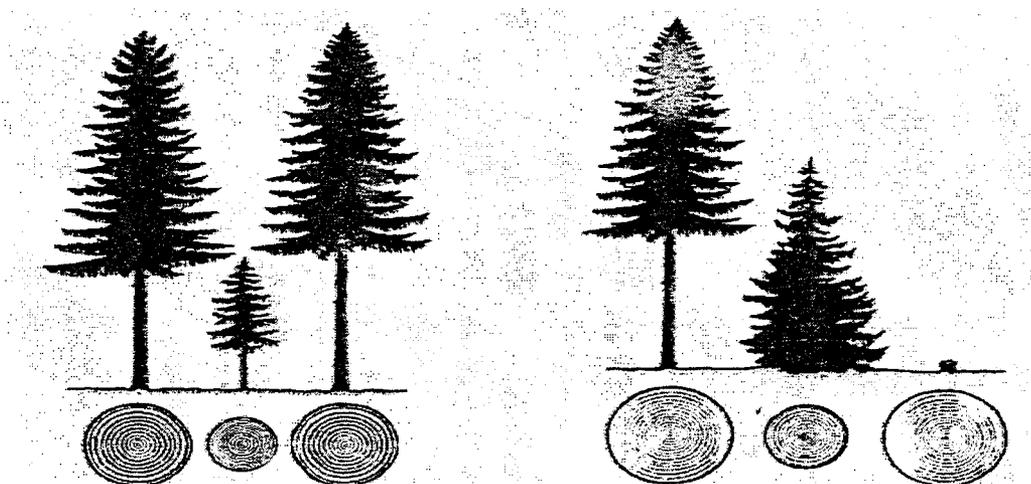


Figura 10. Efecto de la luz sobre anillos de crecimiento

2.4.6 Viento

La dirección y la fuerza del viento resultan en la deformación de la copa del árbol y la formación de una médula excéntrica en la sección transversal. En la Figura 11, se puede observar de derecha a izquierda, los efectos de los vientos suaves hasta fuertes que afectan un lado del tronco formando al inicio, ligeramente, una médula excéntrica, exhibiendo pocas pistas sobre la formación de madera de compresión. Los vientos moderados, matan la parte expuesta de la copa, forman médula excéntrica y madera de compresión; vientos de intensidad variada afectando sólo por momentos dando paso a una regeneración de copa y vientos fuertes que impiden el desarrollo del individuo, con médula extremadamente excéntrica y madera altamente comprimida (Hughes, 1982).

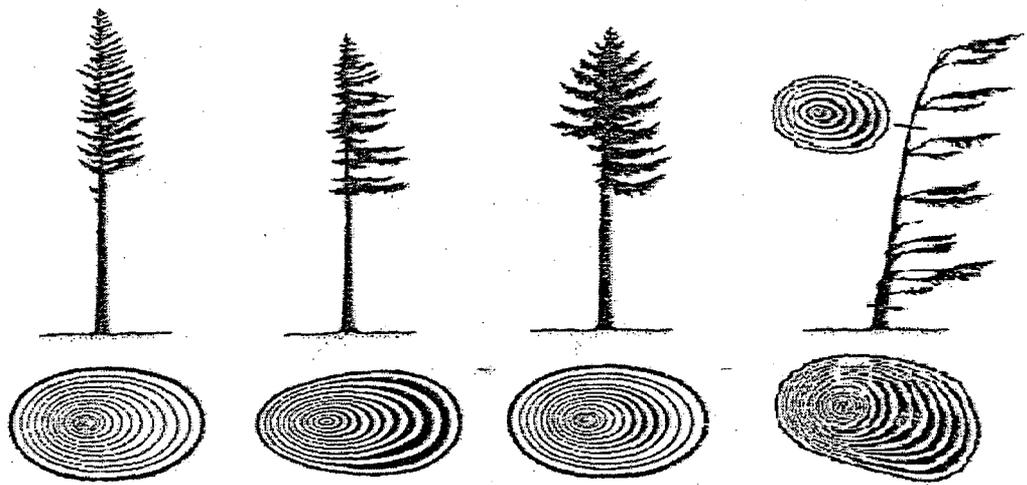


Figura 11. Efectos de los Vientos en la formación de anillos excéntricos

2.4.7 Composición genética

El crecimiento y la forma de un árbol están determinados por su composición genética. La estructura de la madera y la forma del anillado pueden variar debido a otros factores de tipo genético ya que un árbol siempre mantiene las características distintivas propias de su especie (Perkins & Swetnam, 1996).

2.4.8 Características del leño

La relativa proporción entre el leño inicial y tardío y las dimensiones transversales de madera tardía corresponden a las características principales que presentan significativamente variaciones. Estas variaciones son regidas por factores que intervienen en su formación tales como el efecto debido simplemente a la edad, donde la proporción de leño tardío a lo largo de la sección transversal decrece con la altura. Es improbable que el efecto de la altura pueda ser exactamente determinado, porque este parámetro es extremadamente variable y difícil de medir, segundo, por que las muestras tomadas de un número de anillo constante, a diferentes alturas, representan cronologías diferentes. Asimismo, se ha determinado que la latitud ejerce un efecto en estas variaciones (Harris, 1965c). Por otro lado Shepherd (1964) encontró diámetros grandes de traqueidas, leño inicial, producido en periodos de óptimo crecimiento después de un fuerte periodo lluvioso y pequeños diámetros de traqueidas, leño tardío, en periodos secos.

2.4.9 Anomalías

Una complicación que a veces se presenta en el análisis de muestras es la ausencia de un anillo anual en la altura del árbol dónde fue tomada la muestra. Ello se debe a que el espesor de cada anillo no es uniforme ni en la circunferencia ni a lo largo de cualquier línea del tallo; y por consiguiente, el ancho relativo de los anillos en cualquier lugar en que se tome la muestra variará ligeramente (Schweingruber, 1993; Maberley, 1990). Donde los anillos están ausentes, el ancho del anillo no es uniforme, el anillo no se forma a lo largo de toda la circunferencia debido un comportamiento cambial diferente en el tronco, latencia, por la ausencia de auxinas, precipitaciones ocasionales, etc.

Algunas de las causas de anillos falsos son aparentemente genéticas debido a que la tendencia de que se produzcan es más pronunciada en algunas especies que en otras. Ocurrencias climáticas anormales, como una súbita sequedad en la estación, han sido sugeridas también como posibles causas; pero ello ha sido muy difícil de verificar. La sincronización de varios árboles en un lugar ha fracasado en su intento de demostrar que los anillos falsos tienden a formarse durante años con ciertas condiciones climáticas. Por otro lado, las influencias climáticas no pueden dejarse de considerar. En la actualidad, aún se continúan realizando estudios e investigaciones sobre la producción de anillos falsos y los causantes de su formación (Maberley, 1990; Génova *et al.*, 1994).

2.5 Dendroclimatología

Los anillos de los árboles, según indican Stokes & Smiley (1996), proveen series continuas, con un nivel de resolución anual, que normalmente se extienden por decenas de años o varios siglos en algunos casos. Las series de ancho de anillos pueden ser modeladas para reconstruir con gran precisión las variaciones anuales o estacionales de la temperatura y la precipitación.

La ciencia paleoclimática encargada de realizar reconstrucciones climáticas mediante el uso de técnicas dendrocronológicas es conocida como dendroclimatología. La información de los anillos de crecimiento es comparada con eventos climáticos históricos o tratados

estadísticamente con los datos meteorológicos reales existentes para realizar una regresión climática. Por otro lado el crecimiento de los árboles es un resultado que integra un conjunto de estímulos ambientales bióticos y físicos, e incorpora esa información en la estructura de sus anillos, convirtiéndolos en verdaderos "archivos ambientales".

La contaminación, también es un parámetro que puede ser medido (Perkins & Wetnam, 1996) ya que los árboles son los mejores indicadores de la composición de la atmósfera, del agua y del suelo. Esto puede ser utilizado para analizar casos de contaminación industrial, de cambios en la composición química del agua a partir de una fecha determinada o de contaminación del suelo (Medeiros *et al.*, 1998; Medeiros, 2005).

El clima es uno de los factores que más fuertemente afecta el crecimiento de los árboles. En los años en que la cantidad de precipitaciones y temperatura es adecuada el árbol crece relativamente más y el anillo correspondiente será relativamente más ancho. A la inversa, en los años en que el clima es particularmente severo, el árbol crece menos, produciendo anillos estrechos. Si se mide el ancho de los anillos se tendrá una serie que representará de alguna manera el comportamiento del clima en la zona. De este modo podemos apreciar en la figura 12 que el clima no sólo limita el crecimiento del anillo en un año (t), sino también influye en el crecimiento del anillo en los años subsecuentes ($t+1$ y $t+k$) donde k puede variar para diferentes especies en sitios diferentes (Hughes *et al.*, 1982).

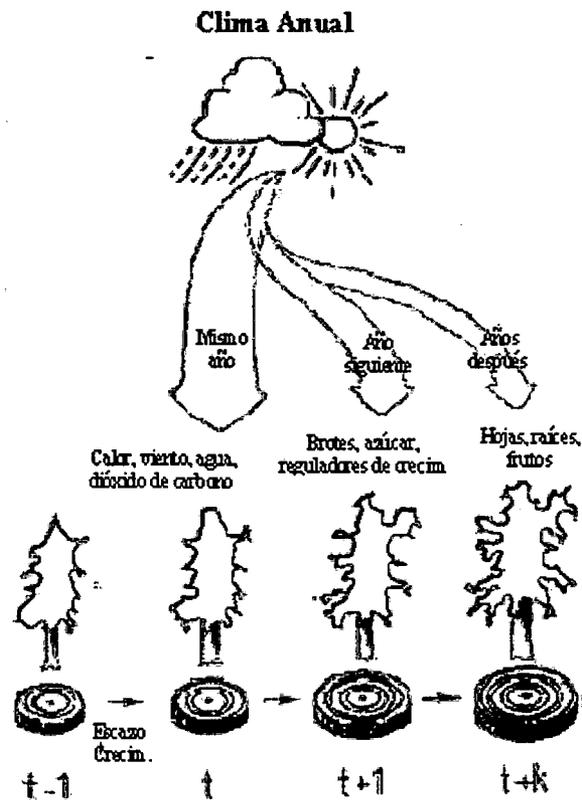


Figura 12. Influencia del clima en el crecimiento de los anillos de un árbol.

En la producción forestal, Tomazello & Botosso (2001) señalan que en las plantaciones con fines comerciales, la Dendrocronología era una herramienta interesante, no destructiva y de fácil manejo para evaluar el efecto de algunas prácticas silvícolas tales como poda, raleo, fertilización, riego y otras actividades correlacionados con el clima; es posible el empleo de técnicas dendrocronológicas para mejorar la información sobre velocidad de crecimiento, rendimiento y hasta posibles turnos de corta en especies del bosque nativo y evaluar calidad de sitio forestal.

2.6 Densitometría de Rayos X

La evolución tecnológica de las técnicas de irradiación en la medición de densidad vegetal no ha sido un camino fácil, las primeras técnicas en ser utilizadas fueron las micrográficas que resultaron ser en extremo engorrosas. Tras la segunda guerra mundial, se ensayaron técnicas de rayos β (beta), que consistían en hacer pasar un haz de luz a través de secciones delgadas de piezas de madera, para ser detectado al otro lado por un fotomultiplicador, cuya señal era transformada en una escala de densidad por diversos

instrumentos (Evertsen, 1982; Cameron *et al.*, 1978; Phillips *et al.*, 1962). Polge (1966), por su parte desarrolló una técnica que consistió en el uso de los rayos X y densitometría para obtener mediciones del interior de la madera. Esta técnica fue mejorada por el mismo autor en 1978 y le dio nuevas aplicaciones para investigaciones en anatomía humana y vegetal, sobre todo anillos de crecimiento, en dendrocronología y dendroclimatología, para la determinación de la densidad intra e inter-anillar como sus variaciones. Los estudios con rayos X, son una valiosa herramienta ya que reúne gran cantidad de información de alto valor para el seguimiento y toma de decisiones en el manejo forestal (Worbes, 1995; Schmoldt *et al.*, 1999; Correa, 2004).

La generación de imágenes densitométricas del interior de piezas de madera permite una clasificación automatizada por propiedades físicas y por rangos de uso, tomando en cuenta resistencia, densidad, patógenos y evaluación de la calidad (Correa, 2003). Los avances en la informática del siglo XXI permitieron el desarrollo de una serie de software especializados: Capturador de imágenes radiográficas-RAD y Cuantificador de los elementos radiales -CERD para el análisis de imágenes escaneadas de las placas radiográficas arrojando resultados precisos. Estos avances permiten una reducción en el tiempo de investigación frente a los equipos antiguos como el microdensitometro. Asimismo, surgieron numerosos estudios en los que se ha utilizado esta técnica a la investigación forestal especialmente a la anatomía de la madera, al combinar los rayos X con el análisis digital de imágenes en investigaciones como detección de defectos internos del leño, análisis de la viabilidad de semillas forestales, dinámica de la humedad de la madera y el estudio de la densidad (Amaral, 1998; Banzatto, 1994).

2.6.1 Rayos X en los estudios dendrocronológicos

El uso de la densitometría por rayos X proporciona a los científicos mucha más información acerca de las variaciones en el crecimiento que una simple medición de ancho de anillos que ha sido usado a principios de la evolución de esta ciencia (Fritts, 1976). Provee además al investigador con mediciones cuantitativas de ancho de leño inicial, densidad de leño inicial, mínima densidad, ancho de leño tardío, densidad del leño tardío, máxima densidad.

A partir de los trabajos de Polge (1970) innumerables trabajos fueron realizados en el área de la densitometría de rayos X relacionando las variables intra-anillares de densidad con factores ambientales en los campos principalmente de climatología, hidrología y ecología (Amaral, 1998). Vetter & Botosso (1989), determinaron una correlación positiva entre la gráfica de variación de densidad intra-anillar por rayos X en *Cedrelinga catenaeformis* Ducke y la precipitación en la amazonía Brasileña, en las cuales las curvas de densidad arrojadas por rayos X se correlacionaron mejor que las curvas de densidad por rayos gamma con la precipitación.

Tomazello *et al.* (2000) demostró que los anillos en árboles de *Cedrela odorata* L. y *Toona ciliata* M. Roem, mostraban una formación anual verificados por el ancho y el número de anillos aplicando densitometría por rayos X. Akachuku (1981, 1984 y 1985b) utilizó el perfil de densidad de la madera por densitometría de rayos X para determinar el ancho de los anillos de crecimiento y estimar el crecimiento del tronco de los árboles, empleando el valor de la densidad media de la madera para establecer su relación con el índice de precipitación anual.

El poder visualizar las variaciones de la densidad a través de un corte de rayos X y relacionarlas con la presencia de anillos o zonas de crecimiento en la madera (Parker & Jozsa, 1973; Banzatto, 1994; Correa, 2004) permite la aplicación directa de un sin número de campos y una alternativa o prerrequisitos para los análisis dendrocronológicos y de demarcación de zonas de crecimiento en muchas de las maderas de las especies de zonas templadas y tropicales.

La aplicación de los rayos "X" es una valiosa herramienta que permite reunir en un proceso gran cantidad de información de alto valor para el seguimiento y toma de decisiones en el manejo forestal (Worbes, 1995; Schmoldt *et al.*, 1999; Correa, 2004). En la Figura 13 se presenta el perfil densitométrico de una muestra de *P. caribaea* var. *hodurensis* (Sénécl.) W.H de Queensland, Australia, en ella se identifica leño inicial y tardío, límite del anillo, variación de la densidad intra-anillar que va de la médula a la corteza.

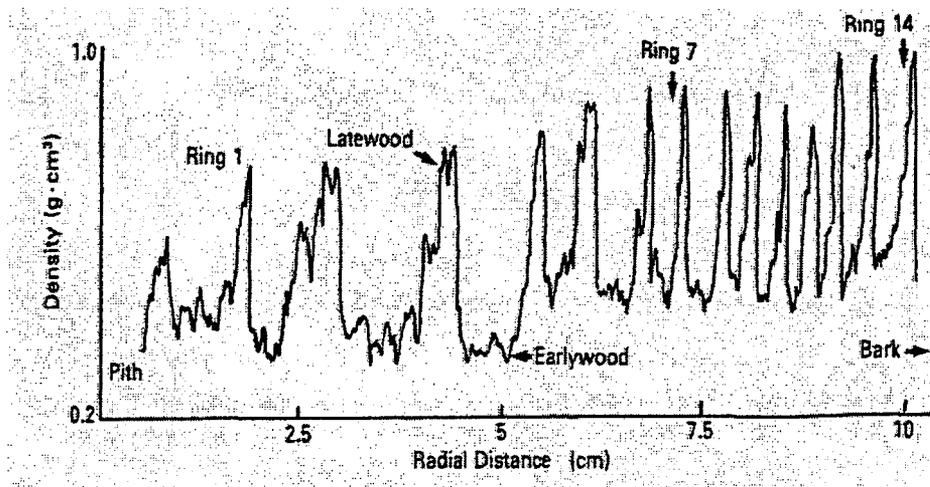


Figura 13. Perfil densitométrico de una muestra de *Pinus caribaea* var. *Hodurensis*

2.7 Aplicación estadística en el estudio dendrocronológico

En términos estadísticos Yamaguchi (1986) señala que una serie de anillos de crecimiento de árboles es una serie de tiempo discreta de observaciones tomadas en intervalos de tiempo iguales. Como el crecimiento anual de los árboles es un fenómeno muy complejo, no puede ser descrito en términos de un modelo matemático exacto, por lo que hay que considerarlo como un proceso estocástico, al que hay que aplicarle las leyes de la probabilidad. Las series de anillos no son homogéneas en el tiempo, es decir, que los valores no son independientes en la escala temporal. El ancho del anillo en el año “ t ” depende del ancho del anillo en el año “ t ”-1, debido a que el valor del ancho del anillo en un año particular no sólo responde a las variables ambientales de ese año, sino también a las reservas que acumuló el árbol en los años previos y a la edad del mismo.

Para poder determinar una serie maestra debemos tener bien claro el concepto de señal y ruido; como sabemos de los anillos de crecimiento podemos obtener mucha información relacionada al clima, dinámica de bosques, ocurrencia de eventos importantes como incendios forestales, etc. Señal es la información que se obtiene de los anillos que es relevante para el estudio en particular de un problema, mientras que ruido es la información

que resulta irrelevante para el problema en discusión. Ante esto, una serie de anillos es una agregación de varias señales o ruidos según el contexto de aplicación. Para el caso de estudiar la variable climática se considera como señal la variación en el crecimiento debida al clima, mientras que ruido es todo aquel disturbio diferente al clima que haya afectado al bosque como cicatrices de fuego, plagas, etc. El modelo lineal para descomponer las señales en una serie de anillos se sigue el modelo lineal $R_t = A_t + C_t + \delta D_{1t} + \delta D_{2t} + E_t$ donde cada componente es un factor de variación (Cook & Kairiukstis, 1990).

III. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1 Descripción de la zona de estudio

3.1.1 Ubicación

El estudio se realizó en las plantaciones forestales de *Pinus radiata* de la granja Porcón, ubicada en la cuenca del Jequetepeque, 30 km al norte de la ciudad de Cajamarca. Corresponde a la sierra peruana, entre los paralelos 04°30'-07°45' Latitud Sur y los meridianos 77°30'-79°27' Longitud Oeste (MINAG, 2005) (Figura 14).

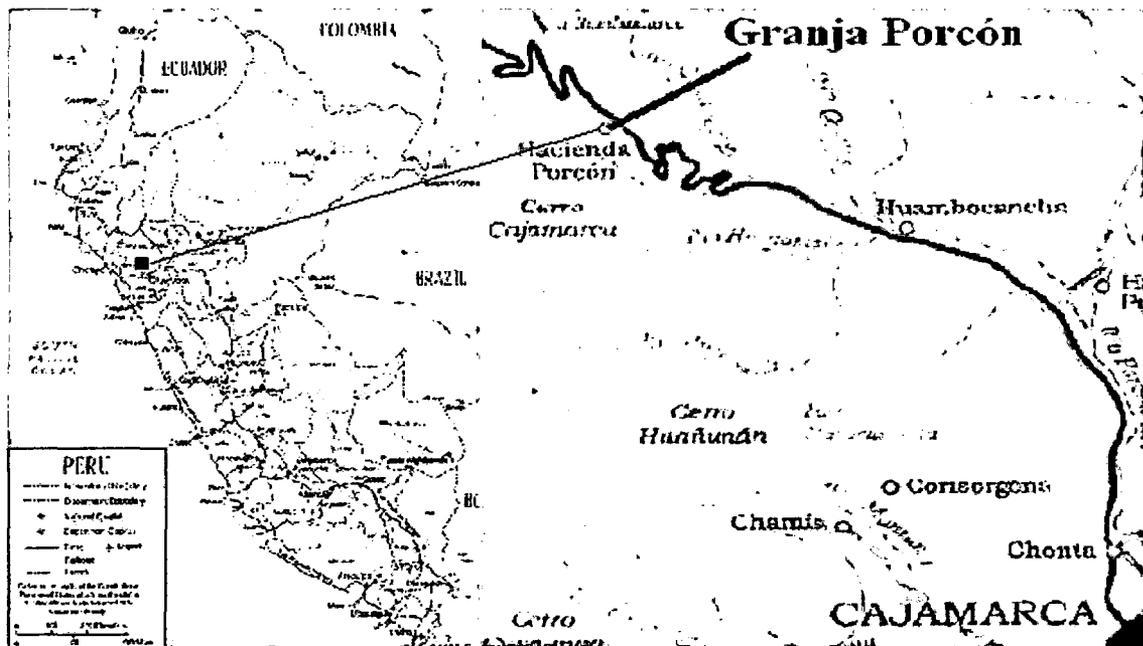


Figura 14. Ubicación de la Granja Porcón-Cajamarca

La forestación existente de la Granja Porcón tiene una extensión aproximada de 9,000 ha, cuyas plantaciones corresponden a las plantaciones con fines de producción, bajo

manejo de la misma Comunidad y de la Asociación Civil para la Investigación y Desarrollo Forestal de Cajamarca ADEFOR-Cajamarca (Figura 15).



Figura 15. Vista panorámica de las plantaciones de *P. radiata* en Porcón - Cajamarca.

3.1.2 Clima

De acuerdo a datos de la estación meteorológica de Porcón II, localizada a 3510 msnm para un promedio de 11 años, 1983-1993, la temperatura media anual es de 8.6°C, en un rango de 4,3 a 13°C de mínima y máxima, bajo una humedad relativa de 66% y una precipitación de 1076mm, que generalmente ocurre en los meses de verano, desde enero y se prolonga hasta abril, casi 187 días al año.

3.1.3 Ecología y vegetación

Porcón se encuentra en la zona de vida de bosque muy húmedo Montano Tropical, bmh-MT, climáticamente caracterizado por tener una temperatura media anual de 6-12 °C y una precipitación total anual de 1000-1600mm, con una relación del evapotranspiración potencial que varía entre 0.50-0.25, evapotranspirándose sólo la mitad de la cuarta parte de lo que llueve. La vegetación natural corresponde a pajonal alto andino con predominio de gramíneas (INRENA, 1995).

En las zonas donde se realizó plantaciones de *P. radiata* se presenta una producción de hojarasca que es muy útil evitando erosión. En general está cubierta forestal ayuda a mantener caudales moderados y sostenidos en los cursos de agua, disminuyendo problemas de sedimentación (Llerena 2006).

La Cobertura vegetal está constituida por pastos naturales y por un estrato arbóreo de pinos; en cuyo piso destacan las especies *Bomus lanatus*; *Poa annua*; *Vulpia* sp. ; *Agrostis* sp; *Paspalum tuberosum*, entre otros.

3.1.4 Suelos

El paisaje es montañoso, con relieves que van desde los ondulados a empinados, con pequeñas mesetas en la cima de los cerros (Gillis y Flores 1985), donde encontramos suelos que provienen de tufos volcánicos recubierta por un espeso horizonte orgánico correspondiente al denominado “Volcánico San Pablo” que presentan bancos de brechas y aglomerados de descomposición dasítica y andesítica; aunque en algunos lugares se sobreponen a tufos de composición riolítica que datan del periodo Terciario. Predominan los suelos del grupo Andosol y en menor proporción los suelos del grupo Phaeozem, que se encuentran generalmente asociados a suelos del grupo litosol. Son moderadamente profundos a profundos ubicados sobre una topografía accidentada. El pH es de 4.5 a 5.5 y la saturación de las bases es inferior a 50% con un mejor drenaje en la parte media y alta no así en la parte baja que es imperfecta (Landa *et al.*, 1978; Pajares *et al.*, 1984; ONERN, 1988).

En Cajamarca, en general desde los años 80 se ha perdido por lo menos 50% de la capa arable del suelo, 90% de la cobertura vegetal y la capacidad productiva del mismo ha disminuido en 70% (Florindez, 1993). El problema ha sido que en las laderas empinadas, donde se desarrolla la agricultura son susceptibles a la erosión hídrica cuyas pérdidas se estiman en un promedio anual de 1476 ton.km⁻².año⁻¹ (DGAS, 1988). Por ello para contrarrestar este gran problema se estableció, como alternativa, la reforestación o reposición forestal en la cabecera de las cuencas, estableciéndose en esta Región hasta el 2003 una

superficie de 81,434 has de plantaciones forestales, aproximadamente el 11% del total nacional (MINAG, 2005).

3.2 Selección del área de estudio y muestreo de árboles

La selección del área de estudio se realizó basándose en la información de los registros de plantaciones existentes en la Granja Porcón, teniendo en cuenta la especie, edad, los diámetros promedio y además que los individuos del rodal estén libre de infecciones por plagas, marcas en el tronco de ramas, por daños mecánicos, deformaciones por presión, resquebrajamientos profundos, etc.

Se obtuvieron muestras de las zonas poco densas a fin de minimizar el efecto de competencia en las series cronológicas lográndose a la vez el efecto de réplica deseada, tomándose al azar 7 árboles de las áreas seleccionadas, donde se levantó la siguiente información: sector, diámetro a la altura del pecho (DAP), circunferencia a la altura del pecho (CAP), año de la plantación (Cuadro 2 y Figura 16).

Cuadro 2. Ubicación de los árboles muestreados en el área de estudio de la Granja Porcón

Sector de muestreo	DAP (cm)	CAP (cm)	Año de Plantación
Cristal	19.65	62	1989-1990
Cuartel 7	25.5	83	1982
Huamani	24.5	81	1990-1991
Arboretum	33	105	1979
Lazareto	34.5	109	1982-1983
Tambillo	34.5	111	1975
Plantación demostrativa	39	124	1978-1979



Figura 16. Selección del área de estudio: a. Áreas de muestreo, b. Muestreo de árboles

3.2.1 Obtención de muestras

Después de seleccionada el área de estudio se procedió a marcar los árboles, tomando previamente el DAP (1.30m), después 2 metros a partir del DAP y otra a 5 metros, donde después de tumbado el árbol se obtuvieron muestras de rodajas de tres pulgadas de espesor cada una. Todo el procedimiento de toma de muestra (rodajas) usadas para el análisis dendrocronológico están representados en cuatro figuras compuestas, donde se detalla las actividades desde el inicio hasta el embalado final del material para su transporte al laboratorio (figuras 17, 18, 19 y 20).

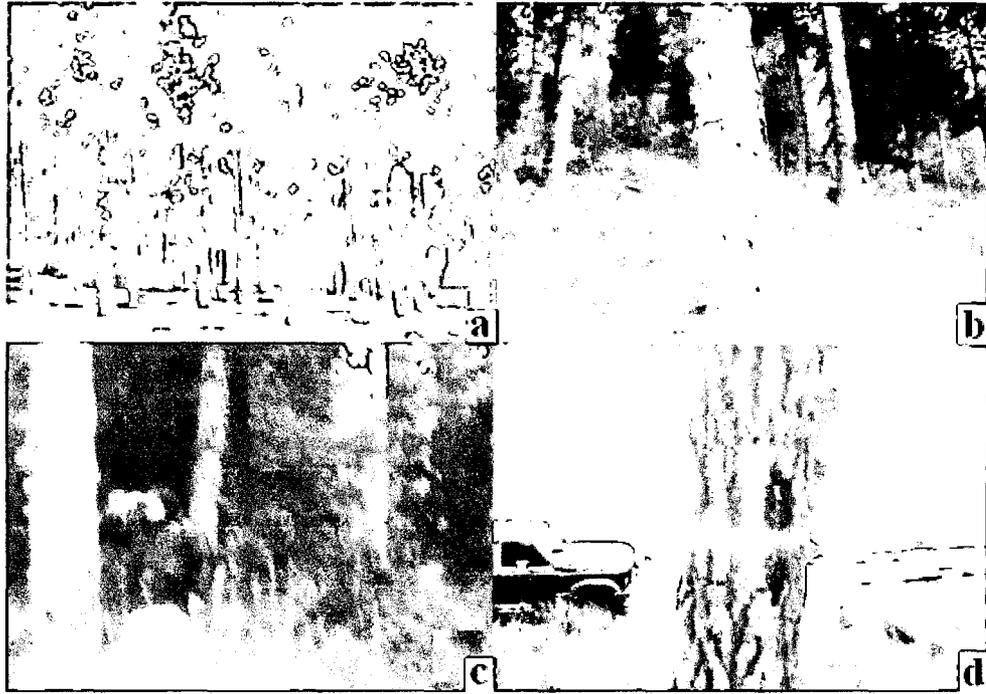


Figura 17. Secuencia de selección y marcación: (a) área de muestreo, (b) y (d) marcado de árbol, (c) marcado y orientación al Norte magnético



Figura 18. Secuencia de tumbado de árbol de *P. radiata*: (a) ubicación de árbol seleccionado, (b) inicio del corte de muesca, (c) muesca concluida y (d) corte final del árbol



Figura 19. Secuencia de obtención de rodajas de *P. radiata*: (a) Cortes a 1.30m DAP, (b) verificación del espesor del corte de la rodaja, (c) marcado según orientación del Norte magnético y (d) codificación para embalaje

3.2.2 Preparación de las muestras para el análisis dendrocronológico

Todas las muestras cortadas se prepararon por duplicado, tanto para los estudios anatómicos y dendrocronológicos para ser enviadas al laboratorio de Anatomía de la madera de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) y el Laboratorio de Anatomía de la Madera de la Escuela Superior de Agricultura Luis de Quiroz de la Universidad de Sao Paulo (Brasil), según la secuencia de la Figura 20.



Figura 20. Secuencia de embalaje de muestras de *P. radiata* para traslado a laboratorio: (a), (b) y (c) rodajas cortadas a 1.30m (DAP) lote 1 y 2, (d) bolsa de polietileno codificada, en función a cada individuo seleccionado y cortado, con información adicional.

Después se procedió a realizar el estudio macroscópico de los anillos de crecimiento en las secciones de las muestras, marcando los radios y resaltando los anillos, para que estos puedan ser demarcados y cuantificados. Para cumplir con este propósito, primero se hizo el fijado de la muestra en una base y luego se procedió al lijado-pulido con lijas que van de 220 a 400 grados de aspereza (Figuras 21 y 22).

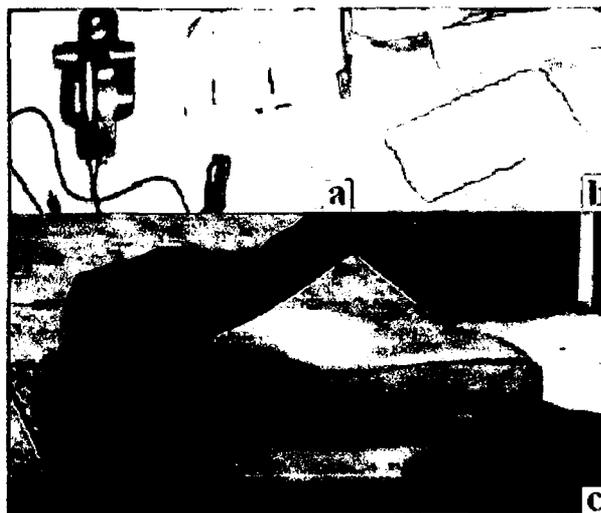


Figura 21. Pulimiento de muestras en laboratorio: (a) equipos de pulimiento, (b) lijas de diferente grado y (c) pulimiento de rodaja.

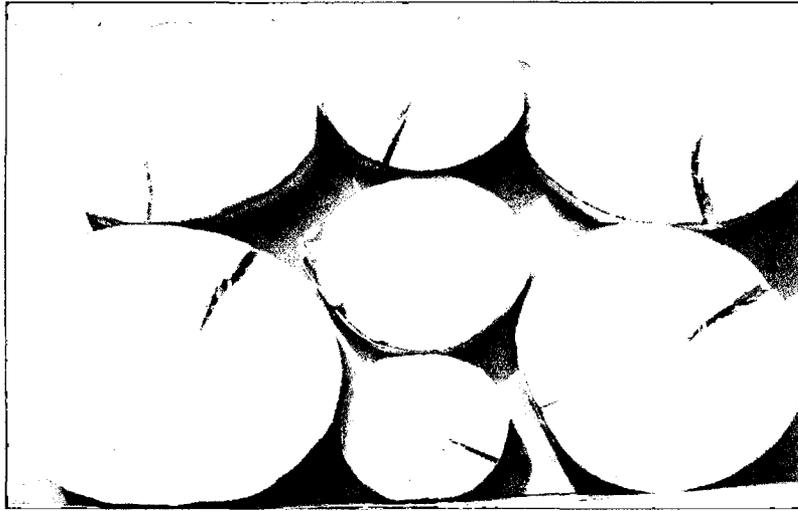


Figura 22. Rodajas pulidas para su análisis macroscópico

El análisis de los anillos consistió en identificar cuáles eran anillos verdaderos, falsos y discontinuos, usándose una mesa de medición y un estereoscopio para mejorar la visión que por lo general presenta un error de 0,001mm. En el caso de las muestras de pino de Porcón, se obtuvieron por técnica destructiva, lo que permitió observar con facilidad los anillos de crecimiento, desde la médula hasta la corteza (rodaja completa de la sección transversal). En la figura 23(a) podemos observar la forma de marcado de radios de acuerdo a la orientación geográfica, mientras en la 23(b) podemos observar el marcado de 3 radios separados lo mayor posible en un ángulo 120°S sobre la superficie del corte transversal para *Pinus radiata* (Figuras 23 y 24).

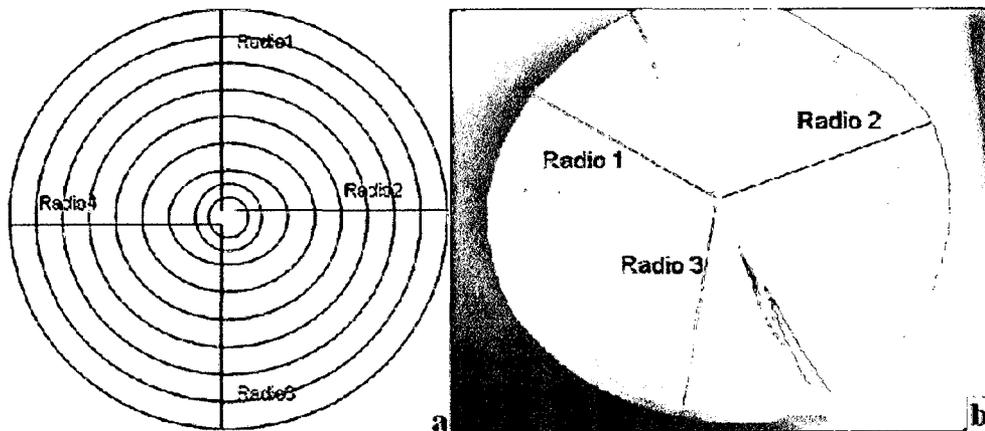


Figura 23. Marcado: (a) Radios de acuerdo a la orientación geográfica, (b) selección radios para el caso de las muestras de *P. radiata*



Figura 24. Marcado de los anillos de crecimiento

3.3 Análisis dendrocronológico

Para esta actividad se aplicaron dos técnicas de evaluación para tener resultados más eficientes y ambas son complementarias en el análisis final, por lo que no son utilizadas por separado en el análisis y diferenciación de anillos verdaderos y falsos. Por un lado se hizo mediciones del ancho de anillos de crecimiento, la que se realizó sin dificultad, basándose en determinar anillos y anomalías de manera ocular (Visual). Por otro lado se utilizó la técnica de densitometría, técnica que permitió cuantificar la variación de la densidad de la madera de la pieza evaluada identificando los límites de los anillos con mayor precisión, y diferenciando los anillos verdaderos de los falsos según la variación intra-anillar arrojada.

3.3.1 Medición del ancho de los anillos

Se procedió a marcar con lápiz los anillos de crecimiento y posteriormente se procedió a contar y medir el ancho de los anillos en cada muestra mediante la utilización de un estereoscopio acoplado a la mesa de medición Velmex con error de 0,001mm. Sólo en el caso en que la muestra no permitía tomar la medida de los radios en forma perpendicular estas se realizaron teniendo una distancia lo más lejana posible. El estereoscopio usado fue de alta resolución (Figura 25).

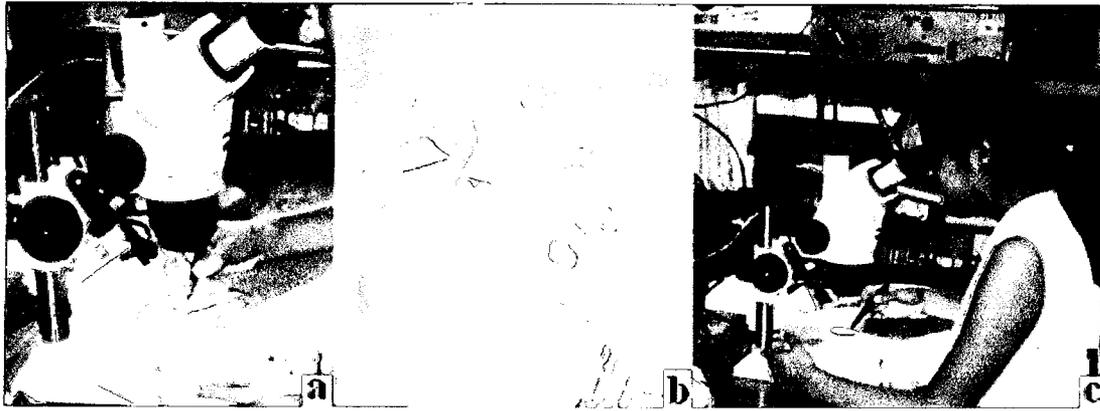


Figura 25. Marcado y medición de anillos de crecimiento con equipo de medición Velmex

3.3.2 Datación y sincronización

Esta actividad consistió en tomar información de cada serie de ancho de anillos y someterla a datación cruzada, por comparación visual y mediante el programa COFECHA (Holmes, 1983), para detectar posibles errores cometidos durante la observación y medición. Las series corregidas se fueron agregando hasta lograr la serie maestra.

3.3.3 Elaboración de series cronológicas de anillos de crecimiento

Cada serie cronológica fue estandarizada mediante la remoción de las tendencias de crecimiento de los anchos de anillos, asumiéndose que estas son funciones de las dimensiones, de la edad de los árboles y de las perturbaciones endógenas y exógenas, conforme al modelo que se indica:

$$Q_t = f(A_t, \delta D1_t, \delta D2_t)$$

Donde:

Q_t : Tendencia de crecimiento estimada como una función de la edad

f : Función matemática

A_t : Tendencia del ancho de los anillos de crecimiento relacionado con el tamaño y la edad de los árboles

δ : Indicador binario relacionado con la presencia ($\delta=1$) o ausencia ($\delta=0$)

$D1_t$: disturbios causados por perturbaciones endógenas y de acción localizada

$D2_t$: disturbios causados por perturbaciones exógenas que actúa a nivel poblacional

t : año relacionado con cada factor

La tendencia de crecimiento fue removida utilizando el programa ARSTAN (Holmes; 1986), el cual ajusta una función de regresión a los anchos de anillos. La remoción de las tendencias fue realizada conforme a la metodología indicada por Fritts (1976), cuyos datos fueron transformados en índices de ancho de anillos (I_t) o también denominada simplemente como “índice”.

$$I_t = \frac{R_t}{Q_t}$$

Donde:

I_t : índice del ancho de los anillos de crecimiento

R_t : serie de ancho de anillos observada

Q_t : tendencia de crecimiento estimada como una función de la edad

La estandarización hecha por el programa ARSTAN tiene dos objetivos: (i) remover las tendencias no climáticas relacionadas con la edad de los árboles y (ii) permitir que los valores estandarizados de los árboles individuales, con diferentes tasas anuales de crecimiento del tronco, sean calculados juntos en una función media. El proceso de estandarización posee, aún, la ventaja de corregir la heterogeneidad de la variancia de los anchos de anillos, una vez que la desviación standard de los índices deja de ser función de la media, como ocurría antes de la estandarización.

Las cronologías medias obtenidas con el programa ARSTAN fueron comparadas con las series climáticas determinando que variable influye (precipitación o temperatura) en el ancho de los anillos de crecimiento y consecuentemente en el crecimiento de los árboles. Por consiguiente, se realizó un análisis con mayor detalle utilizando el programa RESPO (HOLMES, 1994) que analiza la respuesta de los árboles a la variable climática mensual por medio de correlaciones Pearson.

3.3.4 Recopilación y análisis del registro meteorológico

Se recopiló el registro de precipitación pluviométrica y temperatura, mensual y anual del área de la Granja Porcón, para elaborar los climatogramas y analizar mejor las condiciones hídricas del área de estudio facilitando la interpretación de la correlación de los anillos de crecimiento con las variables climáticas. Todos los datos climáticos fueron

obtenidos del Servicio Nacional de Meteorológico e Hidrología SENAMHI para las estaciones meteorológicas correspondiente al periodo 1990-2005. Los datos corresponden a 3 Estaciones Meteorológicas: Vivero Río Rejo, El Tinte y Río Cajamarquino, localizados en el Distrito, Provincia y Región Cajamarca a una altitud de 3120msnm, aproximadamente.

3.4 Análisis densitométrico

Para este tipo de evaluación primero se hicieron cortes de radios siguiendo la orientación del norte magnético, pre marcado en el momento del corte del árbol, de las rodajas en la dirección Norte-Sur (muestras), de allí se obtuvieron sub-muestras de un espesor de 10mm, que luego se colocaron y pegaron a un soporte de madera, de allí pasaron por una sierra doble obteniendo sub-muestras de 2 mm, siendo después irradiadas con rayos X (Figuras 26 y 27).

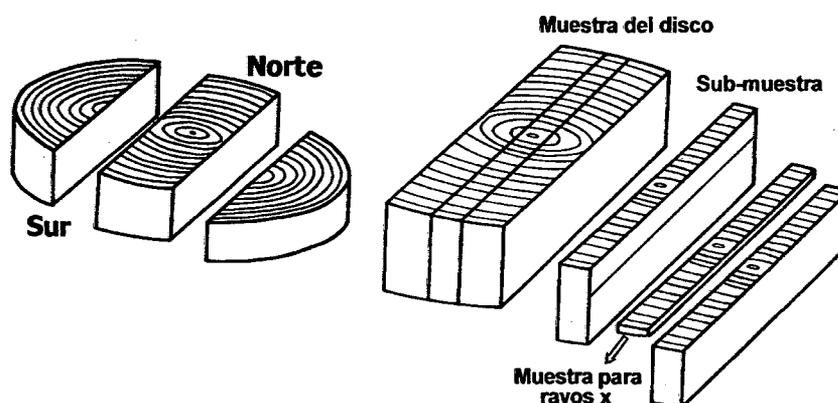


Figura 26. Orientación del corte en la sección transversal y selección de dos muestras de radios para su exposición a rayos X



Figura 27. (a) y (b) Corte con sierra de disco doble y obtención de sub-muestras radiales para exposición a rayos X.

Una vez cortadas las muestras, estas fueron codificadas y transferidas a una cámara de secado para llevarlas a un contenido de humedad de 12%. Las condiciones necesarias para lograr esta condición fueron una temperatura de 18°C y 50% de humedad relativa por un periodo de 12 horas.

Una vez secada las sub-muestras el material fue acondicionado para la irradiación correspondiente (Figura 28). La irradiación fue realizado, con un equipo de rayos X, marca Hewlett Packard, modelo Faxitron 43805N (Figura 29), que aplica una emisión de rayos por un periodo de 5 minutos, con 16 kV en tensión de aceleración, 3 mA de corriente de calentamiento y una distancia entre la fuente de rayos X y las muestras de madera de 121,92cm. Las placas de rayos X utilizadas fueron marca Kodak de dimensiones 24x18cm, tipo T-mat G/RA. La cuña de calibración estuvo compuesta por acetato de celulosa con una densidad de 1,48 g/cm³ (Amaral & Tomazello, 1998).

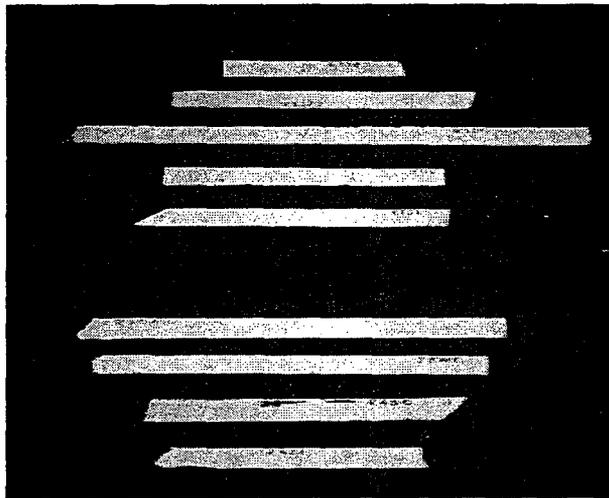


Figura 28. Muestras de radios cortados a un espesor de 2 mm y listos para su acondicionamiento y posterior irradiación

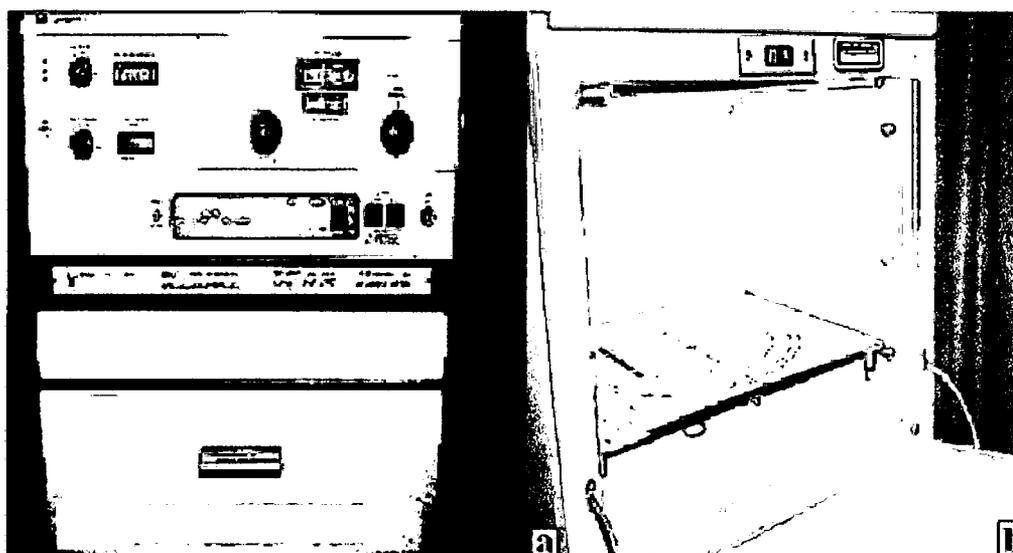


Figura 29. Equipo de rayos X Hewlett Packard Faxitron 43805N: (a) vista frontal y (b) vista interna

Seguidamente las muestras irradiadas, tuvieron de referencia en el centro del tablero de acondicionamiento la escala gris (N), a ambos lados las muestras (2mm espesor), siempre en paralelo a la escala gris y perpendicular a la fuente de irradiación, como se muestra en la Figura 30. Los filmes fueron revelados y después digitalizados en un scanner de marca Hewlett Packard, modelo ScanJet 6100C/T a una resolución de 1000 dpi (puntos por pulgadas) a escala de grises de 256 grados (Figura 31). El proceso de análisis de los filmes de rayos x, de las sub-muestras de madera fueron comparado con la escala padrón conocida, la que contó con 12 rangos de grises y una densidad de conocida de 120, 240, 360, 480, 600, 720, 840, 960, 1080, 1200, 1320, 1440 g/cm^3 . Para este proceso específico se utilizó programas desarrollados en Francia, por el INRA.

Las placas radiográficas reveladas son digitalizadas y transformadas en un archivo tipo DEN por medio del programa CRAD e inmediatamente posibilitó que fuera leído por el programa CERD (Mothe *et al.*, 1998), permitiendo de esa forma definir los límites de los anillos de crecimiento y la variación de la densidad dentro de cada capa de crecimiento. Posteriormente los datos son exportados a Excel para la elaboración de la grafica densitométrica.



Figura 30. (a) y (b) Acondicionamiento de las muestras de radio en la Cámara de Rayos X

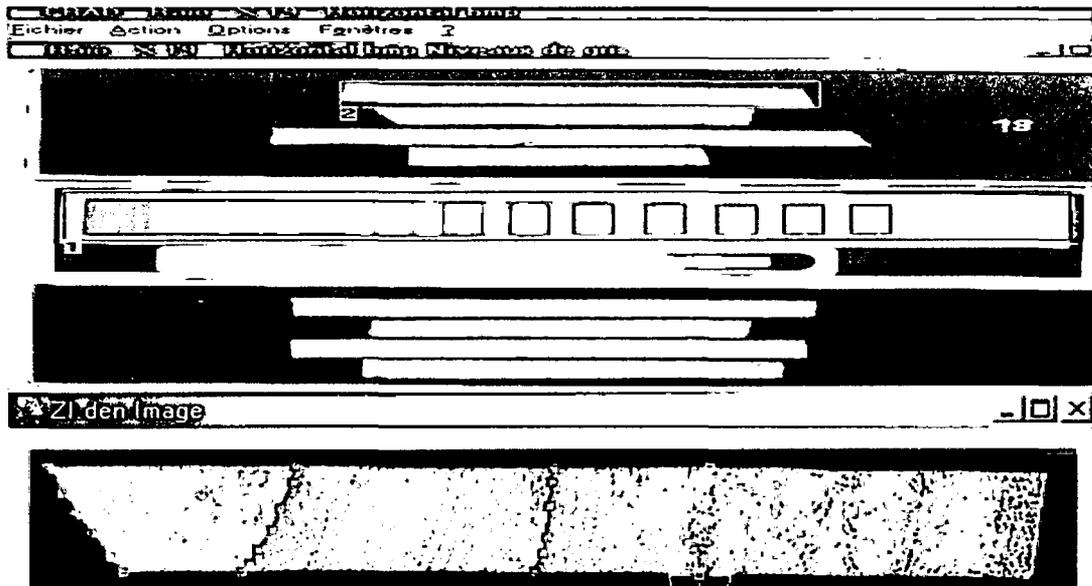


Figura 31. Placas radiográficas digitalizadas, sub-muestras irradiadas e imagen de archivo "DEN", reconocido por el programa CERD.

Para el análisis de la información obtenida de las imágenes de los filmes de Rayos X que resultaron del archivo tipo .TXT, se transportó los datos para el programa Microsoft office Excel, donde se hizo su procesamiento para: determinar los anillos de crecimiento, densidad media de cada árbol muestreado, diferencias en densidad entre la posición norte y sur de cada árbol, variación de la densidad de la madera de las muestras en sentido médula-corteza tanto para la dirección norte como la parte del disco de madera y establecer el modelo matemático de la variación de la densidad de la madera para cada lado del árbol estudiado, y finalmente obtener figuras que nos permita hacer interpretación correcta de los anillos de crecimiento.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Registro climático de la Estación Meteorológica de Porcón-Cajamarca

Mediante el análisis de los registros meteorológicos de temperatura y precipitación media en la Estación de Porcón Cajamarca se construyó una serie meteorológica de 30 años abarcando el periodo de 1974 a 2004 para la precipitación; mientras para la temperatura sólo se tuvo información desde 1985 tal como se muestra en la figura 32, la fue relacionada con Los resultados dendrocronológicos obtenidas mediante el análisis de los anillos de crecimiento.

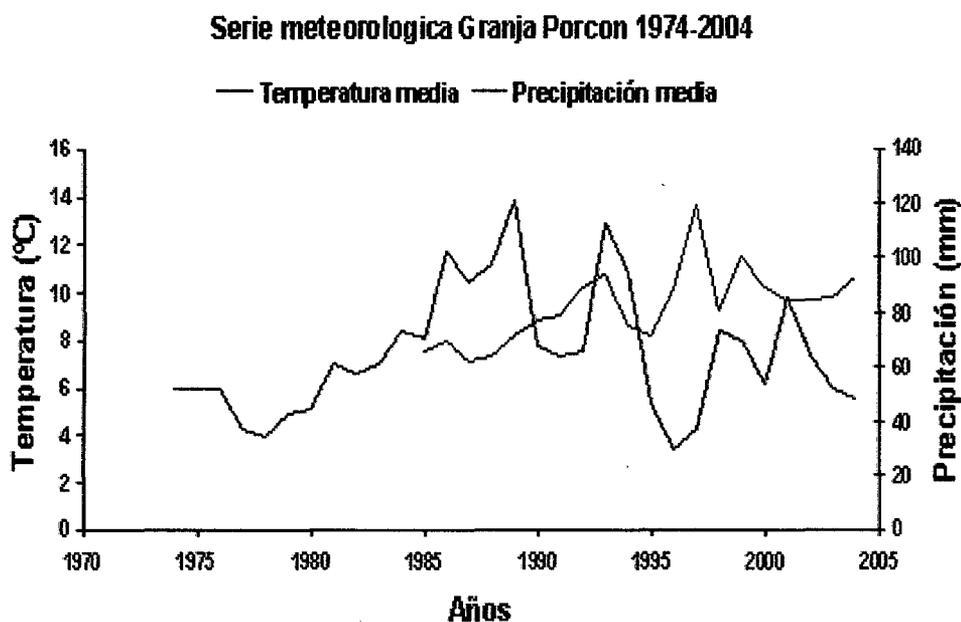


Figura 32. Temperatura y Precipitación media anual para el periodo de 1974-2004 en la Granja Porcón

4.2 Análisis dendrocronológico de la especie *Pinus radiata*

4.2.1 Control de calidad de las series de ancho de anillos

Marcados los anillos en la sección transversal de cada muestra fueron construidas series de ancho de anillos, para lo cual se ejecutó el programa COFECHA (Holmes, 1983; Grissino-mayer, 2001) sincronizando las series y obteniendo una serie master (promedio) y detectando errores de medición o falsos anillos. Las tendencias de crecimiento fueron removidas en cada serie mediante la aplicación de una función cúbica donde cada valor de la serie es dividido por el correspondiente valor de la curva spline como muestra la figura 33.

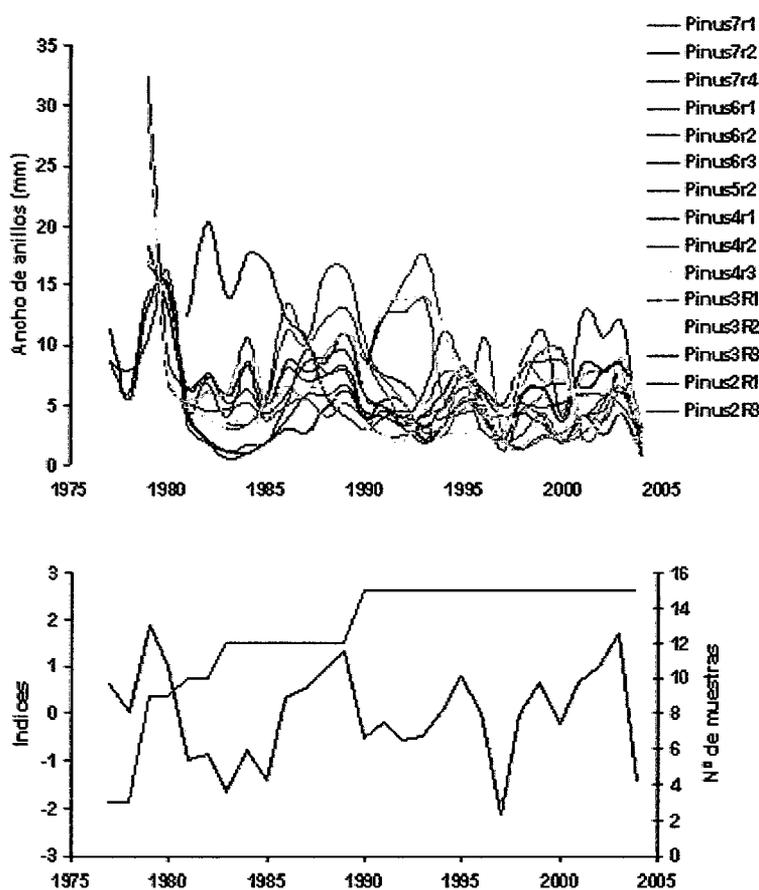


Figura 33 Series en el ancho de los anillos de crecimiento (línea azul), serie maestra obtenida por los índices en los anillos de crecimiento con el programa COFECHA y número de muestras utilizadas en el análisis del bosque de Porcón (líneas rosada)

Después del ajuste, el programa calculó y comparó las series residuales correlacionando en segmentos de 20 años, con intervalos de 10 años, detectando errores de medición evidenciándose bajas correlaciones. Siendo excluidas del análisis las series que muestran bajas correlaciones y al mismo tiempo no sobrepasan el nivel crítico de significativo.

Se determinó una correlación media de 0.682 (Pearson 99% de confiabilidad) significativa evidenciando una señal común entre los árboles analizados. En el cuadro 3 pueden observarse las inter-correlaciones positivas y significativas para cada intervalo analizado.

Cuadro 3. Intercorrelación de las series de ancho de anillos de la especie *P. radiata*

Secuencia	Series	Intervalo		Inter correlación		
				1970-1989	1980-1999	1990-2004
1	Pinus7r1	1980	2005	0.63	0.66	
2	Pinus7r2	1980	2005	0.68	0.68	
3	Pinus7r4	1980	2005	0.61	0.75	
4	Pinus6r1	1978	2005	0.84	0.83	0.83
5	Pinus6r2	1978	2005	0.73	0.81	0.88
6	Pinus6r3	1978	2005	0.56	0.64	0.72
7	Pinus5r2	1982	2005	0.35A	0.51A	
8	Pinus4r1	1980	2005	0.61	0.72	
9	Pinus4r2	1980	2005	0.66	0.56	
10	Pinus4r3	1980	2005	0.53	0.69	
11	Pinus3r1	1991	2005	0.57		
12	Pinus3r2	1991	2005	0.53		
13	Pinus3r3	1991	2005	0.40B		
14	Pinus2r1	1984	2005	0.56	0.7	
15	Pinus2r3	1984	2005	0.55	0.73	
Correlación media				0.71	0.62	0.66

Nota: Coef. de correlacion Pearson 99%, nivel crítico de correlacion 0.515; A: correlacion máxima obtenida; B: presencia de correlaciones más elevadas en otras posiciones.

4.2.2 Elaboración de series cronológicas de anillos de crecimiento

Una vez terminado el control de calidad de las series de anillos de crecimiento en árboles de *Pinus* se creó una cronología mediante la ejecución del programa ARSTAN (Cook y Colmes, 1985). Las series de ancho de anillos fueron estandarizadas aplicando una doble estandarización (doble detrending) para remover tendencias de efecto de crecimiento y

otros factores mediante la aplicación de una curva exponencial negativa y un spline cúbico (Colmes, 1994).

La cronología de anillos de crecimiento de la especie *P. radiata* presentó una extensión de 27 años (1977-2004). El número de muestras (radios) analizados para la construcción de esta cronología disminuye conforme aumenta la extensión de la cronología en años.

Las edades de los árboles de *P. radiata* y el periodo de las cronologías son presentadas en el cuadro 4.

Cuadro 4. Edad y número de anillos de crecimientos de cada individuo muestreado en las plantaciones de *P. radiata*

Plantación / Sección	Árbol	DAP (cm)	Año de Plantación	Número de anillos	Edad
Cristal	Pino 1	19.65	1989-1990	17	17
Cuartel No. 7	Pino 2	25.5	1982	22	22
Huamani	Pino 3	24.5	1990-1991	15	15
Arboretum	Pino 4	33	1979	26	26
Lazareto	Pino 5	34.5	1982-1983	24	24
Tambillo	Pino 6	34.5	1975	28	28
Plantación demostrativa	Pino 7	39	1978-1979	26	26

4.2.3 Análisis dendroclimatológico de series cronológicas de anillos de crecimiento

La influencia de las variables climáticas en el crecimiento en diámetro del tronco de los árboles de *P. radiata* fue analizada mediante la correlación entre la cronología y la serie climática de la Granja Porcón, lo cual es observado en (Figuras 34 y 35).

Esta correlación fue analizada con el índice de Pearson, que fue negativo ($r=-0.498$; $p>0.05$) entre la cronología estándar y la temperatura media anual, y positivo significativamente ($r=0.432$; $p<0.05$) entre la cronología estándar y la precipitación media anual, lo que indica que la precipitación influye significativamente en el ancho de los anillos de crecimiento, siendo esta la principal variable climática que actúa en el crecimiento en el diámetro de los árboles de *P. radiata*, mientras que la temperatura no muestra una fuerte

influencia en los anillos de crecimiento. Por lo que, bajas precipitaciones inducirían a una reducción de actividad cambial de esta especie.

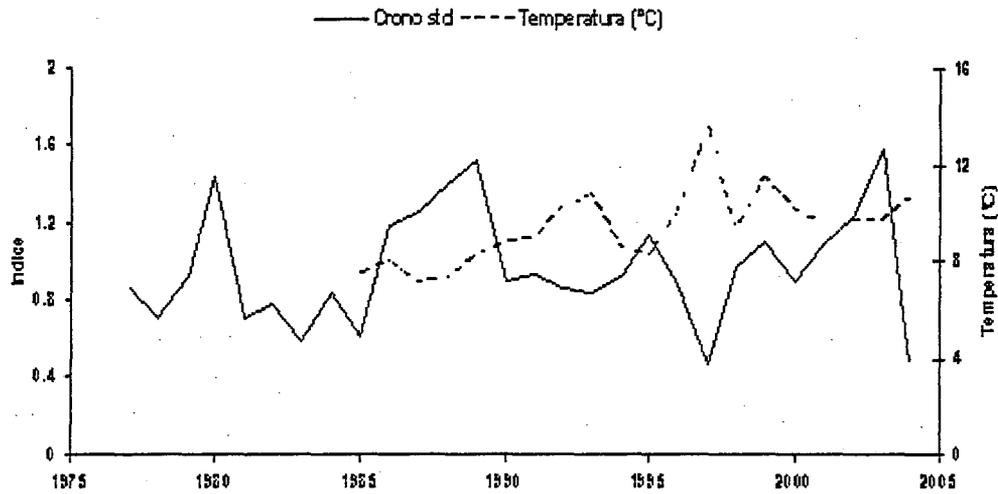


Figura 34. Correlación entre la cronología master con la temperatura media anual obtenida en la Granja Porcon

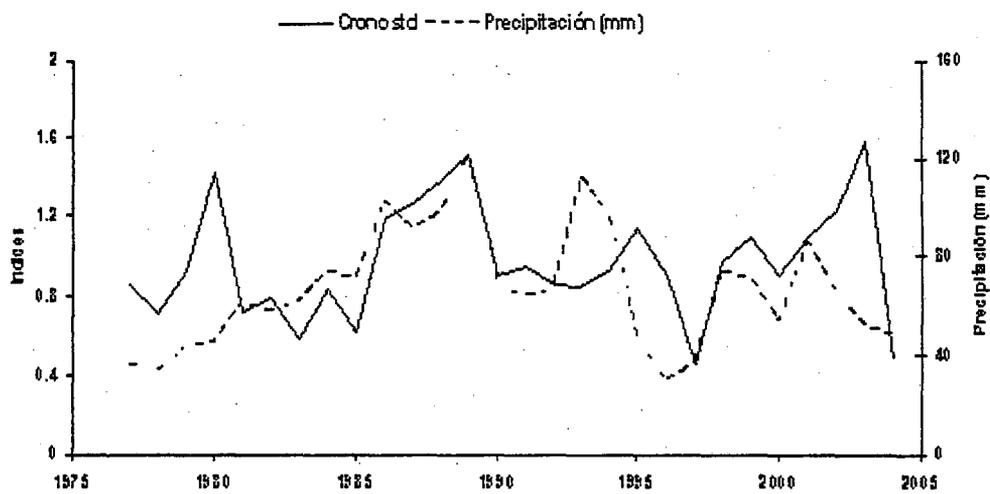


Figura 35. Correlación entre la cronología master con la precipitación media anual obtenida en la Granja Porcon

El análisis detallado a través del programa RESPO (HOLMES, 1994) determinó en que periodo las variables climáticas influyen significativamente en el crecimiento en diámetro de los árboles de *P. radiata*.

Se obtuvieron correlaciones negativas y significativas del crecimiento del tronco con la temperatura al inicio de la estación seca (invierno), en los meses de marzo y mayo; positiva y significativa con la precipitación al inicio de la estación lluviosa, en el mes de enero (Figura 36). Este resultado indica que la precipitación pluviométrica presenta una mayor influencia en el crecimiento en diámetro de los árboles al inicio de la estación lluviosa, principalmente en el mes de enero donde las lluvias son más fuertes. Por otro lado, la temperatura puede influir negativamente en el crecimiento de los árboles en los meses de marzo y mayo, posiblemente debido, a la disminución de reservas de agua en el suelo con el aumento de la temperatura (Clark, 1994; Rosero, 2009).

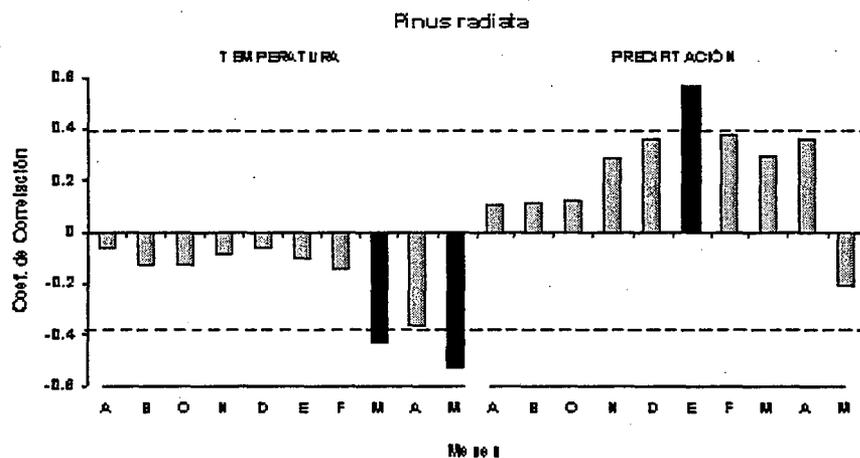


Figura 36. Correlaciones entre índices de anillos de crecimiento con las variables climáticas mensuales obtenidas en la Granja Porcon

4.3 Análisis densitométrico

4.3.1 Variación de la densidad aparente del leño en el sentido radial del tronco de *Pinus radiata* por la técnica de densitometría de rayos X

El perfil de la densidad aparente de la madera de los árboles de *P. radiata* muestra una tendencia de aumento de valores de densidad aparente en sentido médula-corteza, con una estabilización de los valores en la región próxima a la corteza. Se puede observar que conforme aumenta la edad, los valores de densidad aparente son más altos debido a un mayor porcentaje de leño tardío y menor porcentaje de leño inicial, identificándose el límite entre leño juvenil y leño maduro, siendo este encontrado aproximadamente a los 8 años de edad en árboles de *Pinus* (Figura 37).

Larson (1967) explicó que existe mas variabilidad en las características de la madera dentro de un árbol que entre árboles aun creciendo en el mismo sitio o entre árboles creciendo en diferentes sitios. Para el caso de la especie *P. radiata* la densidad de la madera de árboles jóvenes es menor que en las maderas de los árboles adultos.

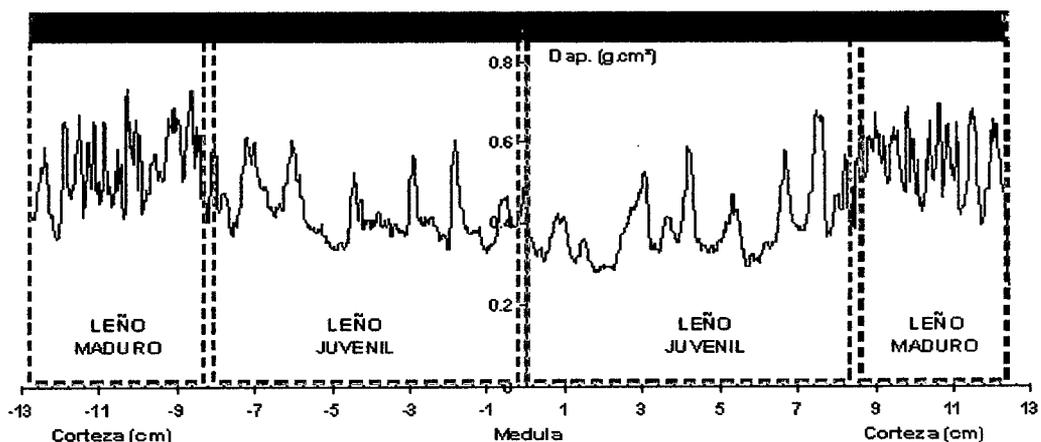


Figura 37. Perfil radial de la densidad aparente en árboles de *P. radiata*

Los valores de densidad aparente media, máxima y mínima en la madera de *P. radiata* fueron de 0.47, 0.69 y 0.23 g.cm⁻³(cuadro 5). Las diferencias de densidad aparente media de la madera de cada árbol, está probablemente relacionada a la edad.

Cuadro 5. Densidad aparente de la madera de árboles de *P. radiata*

Muestras	Densidad media (g.cm ⁻³)	Densidad Máxima (g.cm ⁻³)	Densidad Mínima (g.cm ⁻³)	Desvío std
P1R1	0.49	0.11	0.92	0.11
P1R2	0.50	0.78	0.20	0.07
P2R1	0.47	0.73	0.33	0.09
P2R3	0.45	0.69	0.08	0.11
P3R1	0.40	0.64	0.10	0.06
P3R3	0.36	0.48	0.12	0.04
P5R1	0.54	0.87	0.10	0.10
P5R3	0.41	0.74	0.15	0.10
P7R2	0.53	0.89	0.15	0.13
P7R4	0.57	0.99	0.15	0.16
Promedio	0.47	0.69	0.23	0.10

Dentro del perfil también se pudo identificar el límite exacto del anillo de crecimiento, siendo caracterizado por un aumento (pico) seguido de la disminución de valores de densidad aparente debido al abrupto cambio del leño tardío para leño inicial (Figura 38).

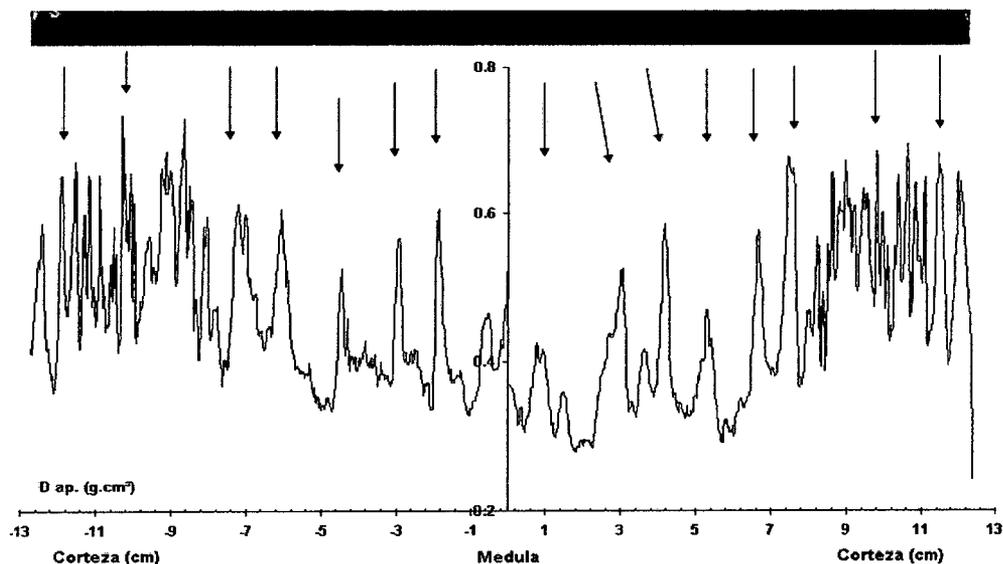


Figura 38. Demarcación del límite exacto de anillos de crecimiento en la especie *P. radiata*, identificación de algunos anillos en el perfil densitométrico

V. CONCLUSIONES

- Los árboles de *P. radiata* de las plantaciones de la Granja Porcón forman anillos de crecimiento anuales, comprobados por la metodología de sincronización de series de crecimiento.
- El análisis dendrocronológico demostró que los árboles de *P. radiata* presentaron edades que varían de 15 a 28 años y estas fueron comprobadas con informaciones de las respectivas edades de plantaciones.
- El análisis dendroclimatológico demostró que el crecimiento de los árboles de *P. radiata* de la Granja Porcón está directamente influenciado con la variable climatológica precipitación, teniendo esta mayor influencia en el mes de enero.
- La densitometría de rayos X permite la identificación del límite exacto de anillos de crecimiento en los árboles de *P. radiata* así como también brinda informaciones fehacientes sobre la calidad de la madera de esta especie.
- Los valores de densidad aparente encontrados en los diferentes arboles analizados presentaron diferencias relacionadas con la edad.

VI. RECOMENDACIONES

Aumentar el número de muestras para el análisis dendrocronológico con la finalidad de tener replica de muestreo y ampliar la cronología obteniendo datos de crecimiento en más años.

Ampliar los estudios planteados a los programas de manejo forestal en el país a través del muestreo no destructivo.

La implementación de un laboratorio de Anillos de crecimiento y de Densitometría de Rayos X en la facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú.

Incluir en los estudios densitométricos la investigación con otras ciencias para determinar especies sensibles a efectos de contaminación a nivel de áreas urbanas como rurales, especialmente las cercanas a empresas contaminantes.

Los árboles suelen ser buenos indicadores de la composición de la atmósfera, el agua y el suelo. Esto puede ser utilizado para analizar casos de contaminación industrial, de cambios en la composición química del agua a partir de una fecha determinada o de contaminación del suelo, lo cual, debería de proyectarse este tipo de estudios en el país.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL, A.; TOMAZELLO FILHO, M. 1998. Avaliação das características dos anéis de crescimento de *Araucaria columnaris* HOOK, a través de microdensitometria de raios X. In: MEETING ON NUCLEAR APPLICATION, 4, Poços de Caldas, 1997. Programas e resumos. São Paulo: SBF. 202 p.
- AKACHUKU, E. 1981. Estimation of volume and weight growth in *Gmelina arborea* with X ray. In: FOREST RESOURCE INVENTORY, GROWTH MODELS, MANAGMENT PLANNING AND REMOTE SENSING, Orono 1981. Proceedings Orono: University of Maine, the Plate Tree Institute of the School of Forest Resources. p 105-113.
- AKACHUKU, E. 1984. The possibility of tree selection and breeding for genetic improvement of wood properties of *Gmelina arborea*. *Forest Science* v. 30 n. 2 p275-283.
- AKACHUKU, E. 1985 (b). Intra anual variation in wood density in *Gmelina arborea* from X-ray densitometry and its relations with rainfall. *Tree Ring Bulletin* v.45 p43-45.
- BANZATTO, N. 1994. Melhoramento e genética. São Paulo: Melhoramentos. 301 p.
- CAMERON, J.; HAND, F. 1978. Production of radiata pine cuttings for seed orchards establishment. *Australian Forestry*. 39(2): 121-130.

- CLARK DA, CLARK DB, 1994. Climate-induced annual variation in canopy tree growth in a Costa-Rican tropical rain-forest. *J Ecol* 82:865–872.
- COOK, E; HOLMES, R. 1984. Program ARSTAN user manual. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, Arizona.
- COOK, E. 1989. A time-series analysis approach spline to tree-ring standardization. University of Arizona, Tucson.
- CORREA, E. 2004. Longevidad de los anillos de crecimiento de sus troncos. Colegio de Ingenieros Forestales de Chile. Panorama forestal CIF N° 034 (Enero-Abril).
- COOK, E.; KAIRIUKSTIS, L. 1989. Methods of dendrochronology: application on the environmental sciences. Dordrecht: Kluwer Academic. 394 p.
- DEL VALLE, F.; FERNÁNDEZ, F.; ROMERO, A. 1999. Manual de selvicultura del Pino radiata en Galicia. Disponible en:
<http://www.agrobyte.com/agrobyte/publicaciones/pinoradiata/indice.html>.
Consultado en Diciembre de 2008.
- DÍAZ, C.; TOUCHAN, R.; SWETNAM, W. 2001. Una reconstrucción del anillo de crecimiento de la última precipitación en México del noroeste. *Diario internacional de la climatología* (8): 1007-1019.
- DIETERICH, H.; SWETNAM, W. 1984. Dendrocronología de un pino ponderosa marcado con una cicatriz de fuego. *Ciencia del Bosque* 30(1):238-247.
- EVERTSEN, A. 1982. The influence of compression wood on the strength properties of Stika spruce. *Forest Products Journal*. 38(9): 67-69.
- FRITTS, C. 1976. *Tree rings and Climate*. Academic Press. Nueva York. 567 p.

- FRITTS, C. 1991. Reconstructing Large-Scale Climatic Patterns from Tree-ring Data. en Arizona Press. Associated program DIFMAP to Display and analyze the Climatic Reconstructions. Tucson.
- FRITTS, C.; VAGANOV, A.; SVIDERSKAYA, V.; SHASKIN, V. 1991. Climatic variation and tree-ring structure in conifers: empirical, mechanistic models of tree-ring width, number of cells, cell size, cell-wall thickness, wood density. *Climate Research*, 1: 97-116.
- GANDULLO, M.; GONZÁLEZ, A.; SÁNCHEZ, O. 1974. *Ecología de los pinares españoles. IV. Pinus radiata D. Don*. Colección Monografías INIA nº. 13. Madrid, España.
- GÉNOVA, M.; FERNÁNDEZ, A.; CREUS, J. 1994. Diez series medias de anillos de crecimiento en los sistemas carpetanos e ibérico. En *Investigación agraria: sistemas y recursos forerales Vol. 2*. INIA-Ministerio de Agricultura. Madrid.
- GRISSINO-MAYER, H. 1997. Principles of Dendrochronology. <http://www.ltrr.arizona.edu/people/henri/princip.htm>. Consultado el 24 de Junio del 2008.
- GRISSINO-MAYER, H. 2001. Evaluating crossdating accuracy: manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree Ring Research*, Tucson, v. 57, p. 205-221.
- HOLMES, L.; ADAMS, K.; FRITTS, C. 1986. Quality control of crossdating and measuring: a user's manual for program COFECHA. In: _____. *Tree-ring chronologies of Western North America: California, eastern Oregon and northern Great Basin*. Tucson: Arizona University. p. 15-35.
- HOLMES, R. 1994. *Dendrochronology: program manual*. Tucson: Laboratory of Tree-Ring Research. 40 p.

- SCHWEINGRUBER, F. 1996. Tree Rings and Environment Dendrocronology. Paul Haupt Publishers Berne. Stuttgart.
- HOLMES, R. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-Ring Bulletin Vol. 43.
- HUGHES, K.; KELLY, M.; PILCHER, R.; LAMARCHE, C. 1982. Climate from tree rings. Cambridge University Press. 240 p.
- KELLOGG, M. 1982. Mechanical stimulation and xylem production in Douglas-fir. Forest Science. 26(4): 643-651.
- KIPFMUELLER, F.; SWETNAM, W. 2001. Usar dendrocronología para reconstruir la historia de ecosistemas. In: D. Egan y E. A. Howell eds. Técnicas para descubrir ecosistemas históricos. Prensa de la Isla, Washington. Capítulo 8, páginas 199 – 228.
- LARSON, M. 1967. Effect of temperature on initial development of ponderosa pine seedlings from three sources. Forest Science. 13(3): 286-94.
- MABBERLEY, D. 1990. The plant book. Cambridge University Press.
- MEDEIROS, J.G.S. 2005. Caracterização anatômica, densitométrica e aplicação no monitoramento ambiental. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de Anéis de crescimento de árvores de *Araucaria columnis* Hook.: São Paulo, Piracicaba. 85 p.
- MINAG – Ministerio de Agricultura. 2005. Plan estratégico regional Cajamarca. Política agraria. En Portar Agrario: www.minag.gob.pe/polit_cajamarca2.shtml

- MOTHE, F.; DUCHANOIS, G.; ZANNIER, B.; LEBAN, J. 1998. Microdensitometric analysis of wood samples: data computation method used at Inra-ERQB (CERD program). *Annals des Forestiers Sciences*, v.55, n.3, p. 301-313.
- ONERN - Oficina de Evaluación de Recursos Naturales. 1976. Mapa ecológico del Perú. Guía explicativa. Lima.
- PERKINS, D.; SWETNAM, W. 1996. Dendroecología del pino de Whitebark (*Pinus albicaulis*) en la región del río de los Salmones de Idaho. *Diario canadiense de la investigación del bosque*. 26:2123-2133.
- POLGE, H. 1978. Fifteen years of wood radiation densitometry. *Wood Science and Technology*, Berlin, v. 12, p. 187-196.
- RODRIGUEZ, R. 2008. Curso de Dendrocronología Básica. Universidad Privada de Piura – Laboratorio de Dendrocronología. 44 p.
- ROSERO, J. 2009. Dendrocronología de árboles de mogno, *Swietenia macrophylla* King., Meliaceae, ocorrentes na floresta tropical Amazônica do Departamento de Madre de Dios, Peru. Piracicaba, 129 p.
- SCHWEINGRUBER, H. 1993. *Trees and Wood in Dendrochronology*. Springer- Verlag. Berlin-Heidelberg.
- SCHWEINGRUBER, H.; ECKSTEIN, D.; SERRE-BACHET, F.; AND BRÄKER, O.U. 1990. Identification, Presentation and Interpretation of Event Years and Pointer Years in Dendrochronology. *Dendrocronología* 8: 9-38.
- SINTERIZA, C.; SWETNAM, W. 1989. Dendroecología: Una herramienta para evaluar las variaciones adentro últimas y Los actuales ambientes del bosque. *Avances en la investigación ecológica* 19: 111- 189.

- STOKES, M.; SMILEY, T. 1996. An introduction to Tree – Ring Dating. University of Arizona Press – Tucson. 95 p.
- SCHULMAN, E. 1956. Dendroclimatic changes in semiarid America”. University of Arizona Press, Tucson.
- TOMAZELLO, M ; BOTOSSO, P.; LISI, C. 2000. Potencialidade da família Meliaceae para dendrocronologia em regiões tropicais e subtropicais.. In: ROIG F A. (Org.). Dendrocronologia en America Latina. Mendonza: EDIUNC.p. 381-431.
- TOMAZELLO, M.; BOTOSSO, C.; LISI, C. 2001. Análise e aplicação dos anéis de crescimento das árvores. In: indicadores ambientais conceitos e aplicações. Educ. São Paulo, Brasil.
- VETTER, R.E. 2000. Growth periodicity and age of Amazonian tree species. Methods for their determination. In: F.A. Roig (ed.), Dendrocronología en América Latina: 135–155. Mendoza.
- VETTER, R. & BOTOSSO, P. 1989. Remarks on age and growth rate periodicity of Amazonian trees. IAWA Journal, Leiden, v. 10, n. 2, p. 133-145.
- WIKISILVA, s/f. *Pinus radiata*. Aula silvicultura 07. Disponible en: <http://silvicultura.wikispaces.com/Pinus+radiata>. Consultado en enero del 2009.
- WORBES, M. 1995. How to measure growth dynamics in tropical trees - A review. Iawa Journal 16:337-351.
- WORBES, M. 1989. Growth rings, increment and age of trees in inundation forest, savannas and a mountain forest in the Neotropics. IAWA Bull. n.s. 10: 109 -122.

WORBES, M. 1995. How to measure growth dynamics in tropical trees - A review. *Iawa Journal* 16:337-351.

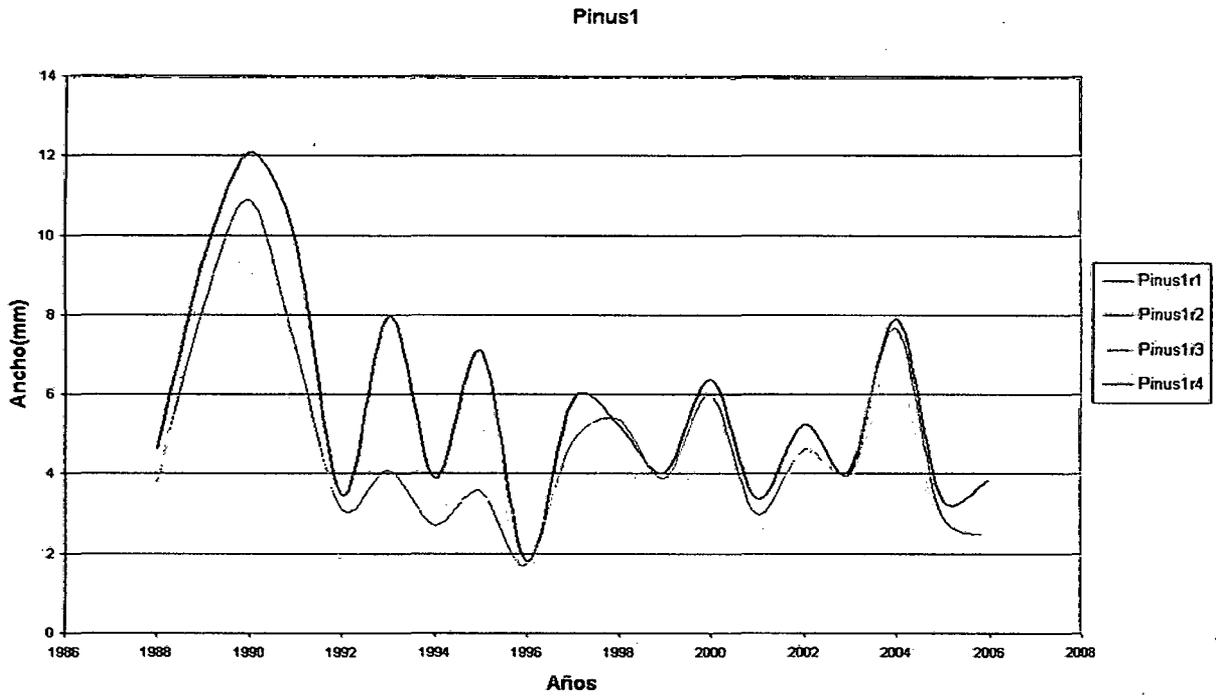
YAMAGUCHI, K. 1986. Interpretation of cross-correlation between tree ringd series. *Tree Ring Bulletin* 46: 47-54.

ZAHNER, R. 1967. Evidence for a direct effect of water stress on tracheid cell wall metabolism in pine. *Forest Science*. 13(4): 397-400.

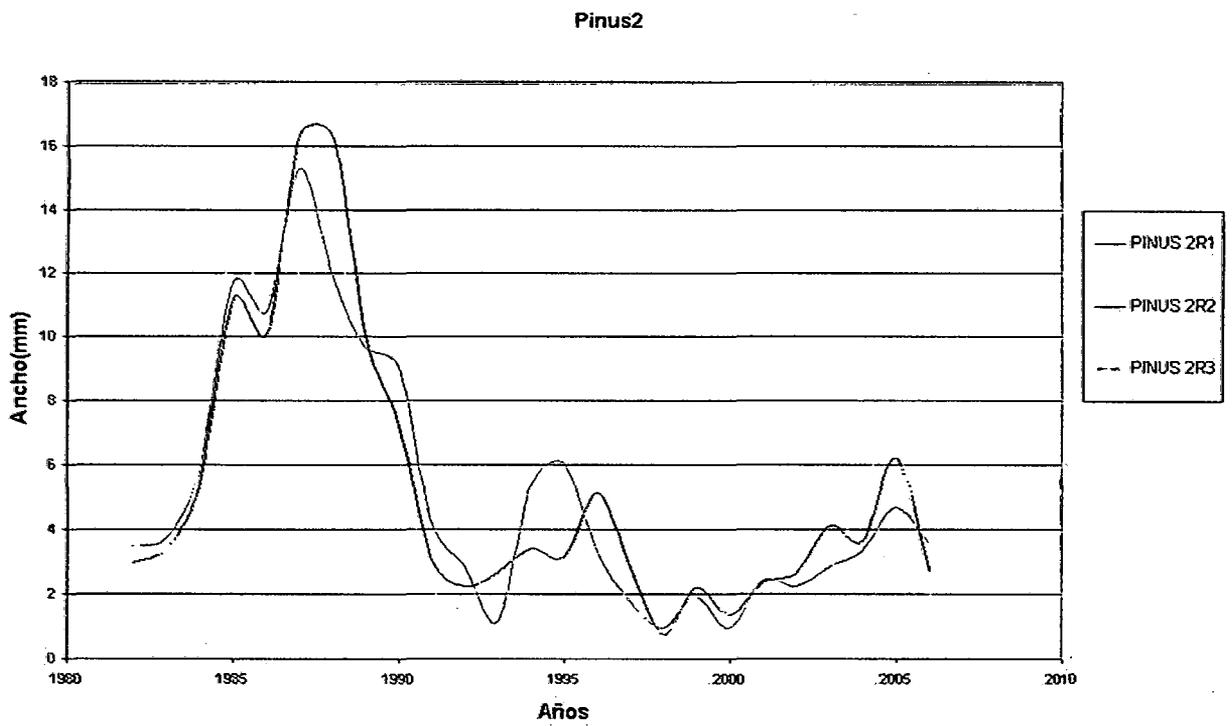
ANEXO

ANEXO 1. SERIES DE ANCHO DE ANILLOS DE LAS MUESTRAS DE PINUS RADIATA

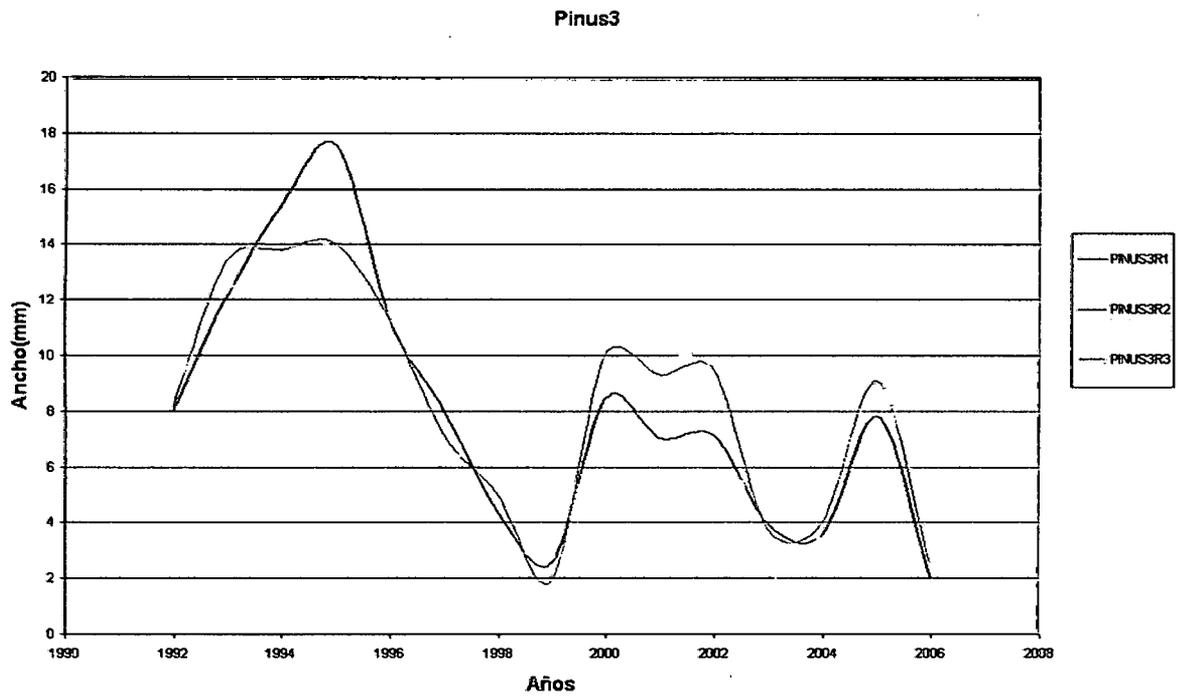
Anexo 1.1 Series de ancho de anillos de la muestra Pinus 1



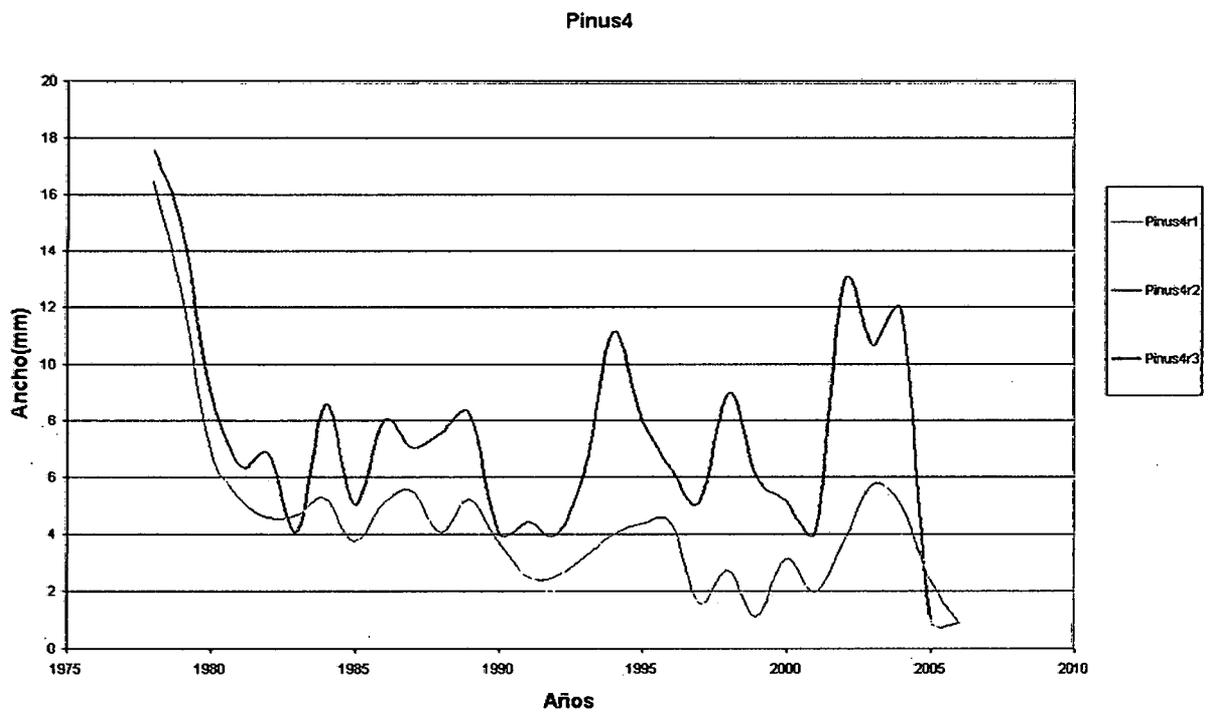
Anexo 1.2 Series de ancho de anillos de la muestra Pinus 2



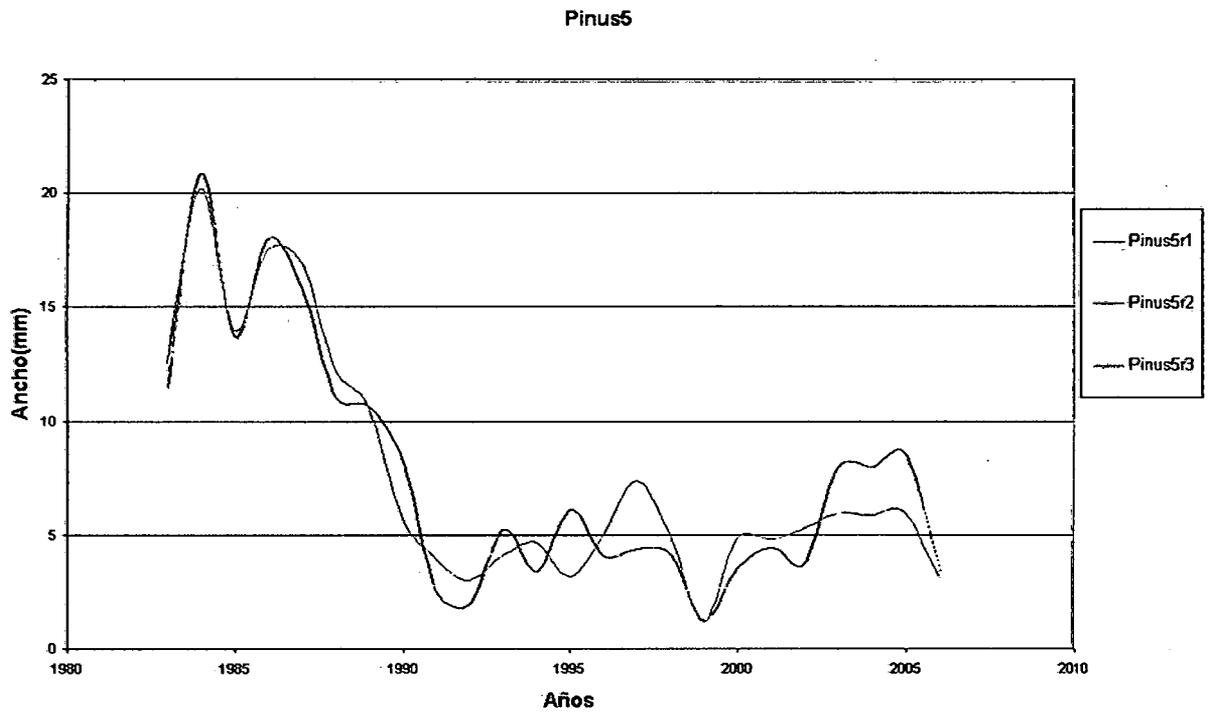
Anexo 1.3 Series de ancho de anillos de la muestra Pinus 3



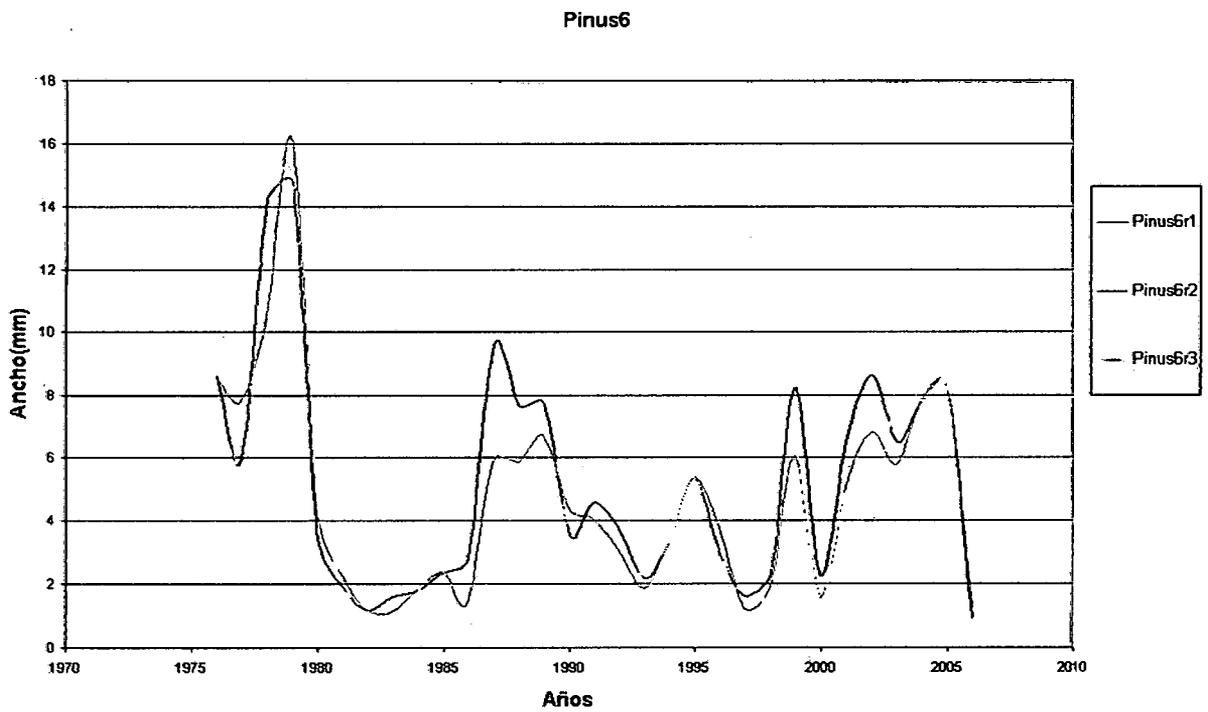
Anexo 1.4 Series de ancho de anillos de la muestra Pinus 4



Anexo 1.5 Series de ancho de anillos de la muestra Pinus 5

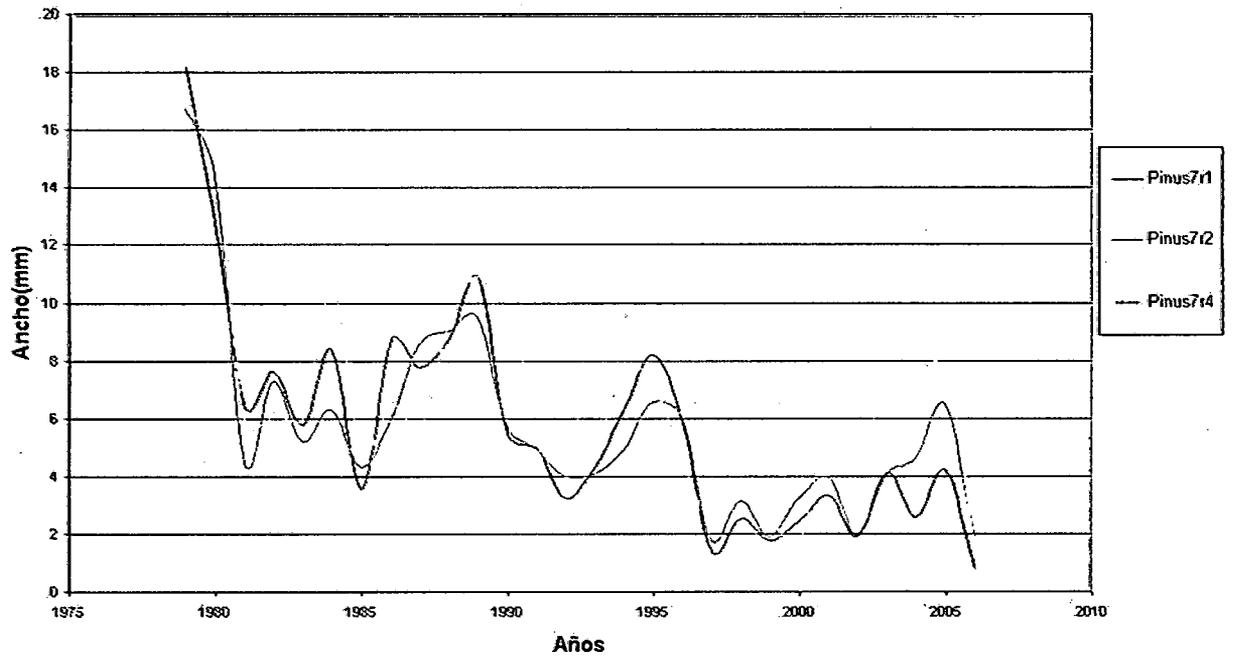


Anexo 1.6 Series de ancho de anillos de la muestra Pinus 6



Anexo 1.7 Series de ancho de anillos de la muestra Pinus 7

Pinus7

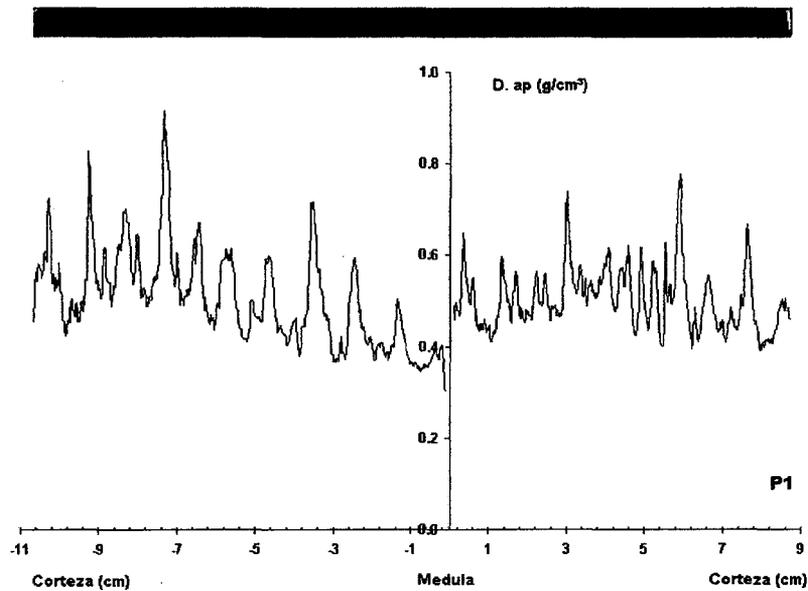


ANEXO 2. RELACIÓN DE RADIOS SELECCIONADOS PARA DENSITOMETRÍA

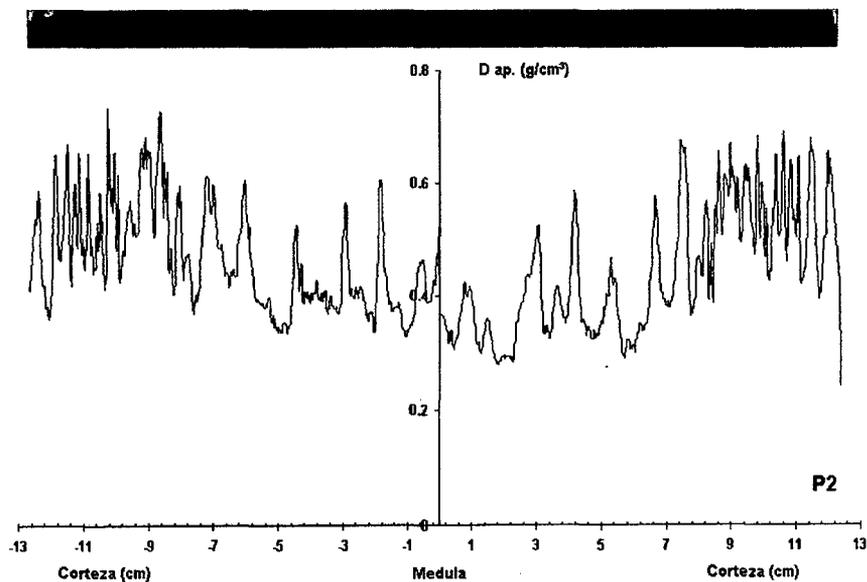
Árbol 1			
Año 1989-1990			
Radios	Dirección	ID	Observaciones
Radio 1	E - W	Pinus 1 r1	
Radio 4	E - W	Pinus 1 r4	
Árbol 2			
Año 1982			
Radios	Dirección	ID	Observaciones
Radio 1	E - W	Pinus 2 r1	Medula excéntrica
Radio 3	E - W	Pinus 2 r3	Anillos comprimidos
Árbol 3			
Año 1991			
Radios	Dirección	ID	Observaciones
Radio 1	E - W	Pinus 3 r1	
Radio 2	E - W	Pinus 3 r2	
Árbol 4			
Año 1979			
Radios	Dirección	ID	Observaciones
Radio 2	E - W	Pinus 4 r2	Medula excéntrica
Radio 3	E - W	Pinus 4 r3	Anillos comprimidos
Árbol 5			
Año 1982			
Radios	Dirección	ID	Observaciones
Radio 1	E - W	Pinus 5 r1	
Radio 2	N - S	Pinus 5 r2	
Árbol 7			
Año 1978			
Radios	Dirección	ID	Observaciones
Radio 1	E - W	Pinus 7 r1	
Radio 2	N - S	Pinus 7 r2	

ANEXO 3. PERFIL DE DENSIDAD APARENTE DE LA MADERA DE P. RADIATA

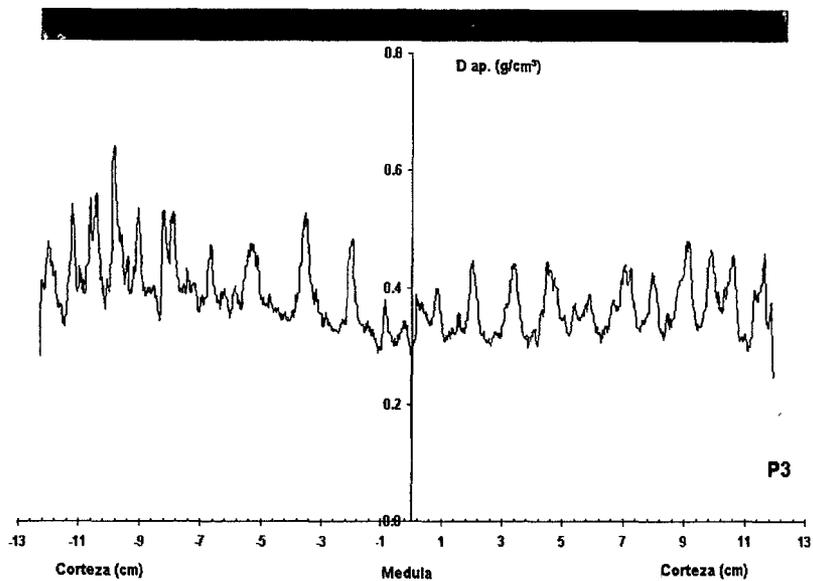
Anexo 3.1 Perfil de densidad aparente de madera de P. radiata correspondiente a la muestra P1



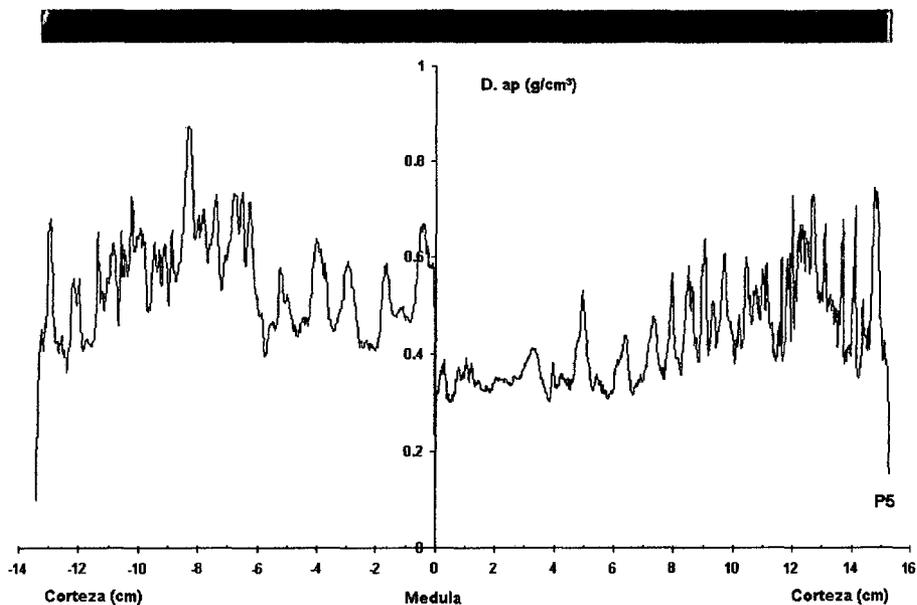
Anexo 3.2 Perfil de densidad aparente de la madera de P. radiata correspondiente a la muestra P2



Anexo 3.3 Perfil de densidad aparente de la madera de *P. radiata* correspondiente a la muestra P1



Anexo 3.4 Perfil de densidad aparente de la madera de *P. radiata* correspondiente a la muestra P5



Anexo 3.5 Perfil de densidad aparente de la madera de *P. radiata* correspondiente a la muestra P7

