UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Anillos, clima y actividad solar

Jorge Andrés Giraldo Jiménez

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ciencias Forestales

Medellín, Colombia

2012

Anillos, clima y actividad solar

Jorge Andrés Giraldo Jiménez

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Bosques y Conservación Ambiental

Director:
Ph.D honoris causa: Jorge Ignacio del Valle Arango,

Línea de Investigación:
La Dendroclimatología tropical como herramienta para conocer los efectos del cambio climático en el trópico.
Grupo de Investigación:
Grupo de Bosques y Cambio Climático

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ciencias Forestales
Medellín, Colombia
2012

A mis padres y a Julio mi abuelo

Agradecimientos

Agradezco a mis padres a mis hermanos y a los demás miembros de mi familia que sin duda me han apoyado de manera incondicional en todos mis caprichos académicos. A mi director de tesis, el profesor Jorge Ignacio del Valle, investigador apasionado e incansable, le agradezco por compartirme sus conocimientos y contagiarme el gusto por la investigación. A Juan Cancio Arcila consejero y amigo a quien le debo haber despertado mi pasión por la Física, las Matemáticas y todo lo relacionado con la academia. Finalmente Agradezco a mis amigos y compañeros de maestría.

Resumen

En este trabajo de investigación se presentan dos capítulos, un capitulo de revisión que aborda los antecedentes de la dendrocronología tanto en las regiones templadas como en el trópico, los principios que rigen esta ciencia, así como las principales aplicaciones. Se mencionan los resultados de muchas experiencias exitosas, a fi n de incentivar la aplicación de esta fascinante ciencia en todo el trópico. En el capitulo dos se presentan los resultados de una investigación que puede considerarse pionera tanto en el trópico como en regiones templadas, con lo que se demuestra el potencia del los árboles tropicales en registrar fenómenos de escala global y extra planetaria.

Palabras clave: Dendrocronología, cambio climático, anillos de crecimiento, árboles tropicales, actividad solar, rayos cósmicos galacticos.

Abstract

In this research we present two chapters. Chapter one presents the backgrounds of dendrochronology intemperate and tropical regions, the principles that guide this science and some applications. The results of many successful experiences have been presented in order to encourage the application of this fascinating science in tropical regions.

In chapter two we present the results of an original research that can be considered a pioneer both in the tropics and in temperate regions, which demonstrates the capability of tropical trees to record global and extra-planetary phenomena

Keywords: Dendrochronology, climatic change, tree-rings, tropical trees, solar activity, cosmic rays.

Contenido

Pág.

Tabla de contenido

1. Capítulo 1. Dendrocronología en el trópico: aplicaciones actuales y potenciales
1.1 Resumen ... 12
1.2 Abstract ... 13
1.3 Introducción ... 14
1.4 Antecedentes de la dendrocronología ... 15
1.5 Principios de la dendrocronología ... 17
1.6 Aplicaciones de la dendrocronología en el trópico ... 19
1.6.1 Ecología ... 19
1.6.2 Climatología ... 20
1.6.3 Geomorfología ... 23
1.6.4 Isótopos estables ... 24
1.6.5 Isótopos de carbono ... 25
1.6.6 Isótopos de hidrógeno y oxígeno ... 25
1.6.7 Actividad solar y cambio climátco ... 27
1.7 Agradecimientos ... 28
1.8 Bibliografía ... 29

2. Capítulo 2. Los rayos cósmicos y la actividad solar afectan el crecimiento de los árboles tropicales ... 39
2.1 Resumen ... 39
2.2 Introducción ... 40
2.3 Métodos ... 42
2.3.1 Área de estudio ... 42
2.3.2 Obtención de la serie de anillos ... 43
2.3.3 Variables climáticas locales y astronómicas ... 43
2.3.4 Relaciones lineales entre el clima local y el índice de anillos ... 44
2.3.5 Función respuesta ... 44
2.3.6 Transformada en onditas, espectro cruzado y coherencia ... 44
2.4 Resultados ... 46
2.4.1 Cronología ... 46
2.4.2 Relaciones lineales: Índice de anillos-clima local ... 47
2.4.3 Función respuesta ... 51
2.4.4 Transformada en onditas y espectro cruzado ... 52
2.5 Discusión ... 56
2.6 Agradecimientos ... 59
2.7 Referencias ... 59

1. Capítulo 1. Dendrocronología en el trópico: aplicaciones actuales y potenciales

1.1 Resumen

Los anillos de crecimiento de los árboles son bandas de células producidas por el cambium vascular en un periodo. La existencia de anillos anuales en árboles tropicales ha sido puesta en duda por algunos investigadores. Sin embargo, son muchas las especies de árboles tropicales que forman anillos anuales y que han sido empleadas para reconstruir las condiciones medioambientales pasadas de un sitio. Los primeros estudios dendrocronológicos en el trópico se remontan a finales del siglo XIX. En numerosos países tropicales se han realizado investigaciones dendrocronológicas tanto en climas secos como húmedos, desde el nivel del mar hasta el límite de vegetación arbórea a más de 4000 m de altitud. En este artículo, se presentan los antecedentes de la dendrocronología tanto en las regiones templadas como en el trópico, los principios que rigen esta ciencia, así como las principales aplicaciones. Se mencionan los resultados de muchas experiencias exitosas, a fi n de incentivar la aplicación de esta fascinante ciencia en todo el trópico.

Palabras clave: actividad solar, anillos de crecimiento, árboles tropicales, isótopos estables, reconstrucción del clima.

1.2 Abstract

Tree rings are bands of cells produced by the vascular cambium in a period of time. The existence of rings in tropical trees has been questioned by several researchers. However, many tropical tree species form annual tree-rings and have been used to reconstruct past environmental conditions of a site. Early dendrochronology studies in the tropics were carried out from late XIX. In most tropical countries, dendrochronologycal researches have been carried out in dry and wet climates, from sea level to the limit of the tree-line over than 4000 m altitude. This paper presents the backgrounds of dendrochronology in temperate and tropical regions, the principles that guide this science and some applications. The results of many successful experiences have been presented in order to encourage the application of this fascinating science in tropical regions.

Key words: solar activity, growth rings, tropical trees, stable isotopes, climate reconstruction

1.3 Introducción

Los anillos de crecimiento de los árboles son archivos naturales de las condiciones medioambientales tales como: temperatura, precipitación, composición química del aire o del agua, variaciones del crecimiento de la biomasa vegetal, erupciones volcánicas, variaciones geomorfológicas, actividad solar y rayos cósmicos (Reedy *et al.* 1983, Bradley 1999). Los anillos son bandas de células producidas por el cambium vascular de algunas plantas leñosas durante un período de tiempo (Kaennel & Schweingruber 1995).

Se denomina dendrocronología a la ciencia que estudia los anillos de crecimiento de los árboles, el tiempo de formación y su relación con las condiciones medioambientales pasadas de un sitio, a su vez es la ciencia que permite datar la madera con anillos anuales de crecimiento (Kaennel & Schweingruber 1995). Muchos fenómenos naturales se entienden mejor desde su pasado, por ello la dendrocronología es una herramienta útil en: ecología, climatología, química, geomorfología, arqueología (Kaennel & Schweingruber 1995, Robertson 2008). La información ambiental se puede obtener del ancho de los anillos, la densidad intraanular de la madera, la densidad de poros y el contenidos de isotopos (^{14}C, $\delta^{13}C$ $\delta^{2}H$, $\delta^{18}O$), entre otros (Stuiver & Quay 1980, Roig 1987, Schweingruber 1988, Kaennel & Schweingruber 1995, Schweingruber 1996, Poussart *et al.* 2004, Robertson 2008).

A pesar de las evidencias científicas exitosas sobre la aplicación de la dendrocronología en árboles tropicales (Worbes 1989, 1995, 1999, D´Arrigo *et al.* 1994, Pumijumnong *et al.* 1994, Argollo *et al.* 2004, Schöngart *et al.* 2004, 2005, Brienen 2005, Lisi *et al.* 2008, Schöngart 2008, Tomazello *et al.* 2009, Borgaonkar *et al.* 2010 Rozendaal & Zuidema 2011), esta idea no es ampliamente compartida por algunos científicos, quizás por prejuicios ó desinformación. Por lo anterior, esté artículo busca comunicar aspectos importantes de la dendrocronología en el trópico. Su principal objetivo es exponer algunas aplicaciones actuales y potenciales de la dendrocronología y sus ventajas al aplicarse en regiones tropicales.

1.4 Antecedentes de la dendrocronología

Desde la antigüedad el hombre se ha interesado por interpretar los fenómenos del ambiente. Teofrasto (322 A.C), discípulo de Aristóteles, fue aparentemente quien por primera vez estudió el tiempo a partir de la observación de los astros, las nubes, los animales y las plantas (Gil & Olcina 1997). De esta manera, atribuyó la formación de los anillos en la madera de los árboles a la interacción de estos con los fenómenos meteorológicos circundantes (Studhalter 1956). En el siglo XV, Leonardo da Vinci al observar secciones transversales de pinos escribió "Los anillos en los troncos de árboles cortados muestran los años y, según su espesor, años más o menos secos…" (Hubber 1952, Schweingruber 1996). La primera investigación sobre anillos de crecimiento se atribuye a Duhamel y Buffon en Francia (1737), quienes buscaron explicaciones de la excentricidad de los anillos, su desigual espesor, y la formación de la albura (Studhalter 1956, Schweingruber 1988). En 1783, el botánico alemán Burgsdorf, aduce que la formación de anillos está acompasada en árboles de la misma especie y la misma localidad. Observó que las fuertes heladas del invierno entre 1708-1709 se reflejaban en los anillos de crecimiento de los árboles, Studhalter (1956) lo cataloga como el padre del crossdating (cofechado). El forestal europeo Georg Ludwig Hartig, uno de los padres de la silvicultura, produjo curvas del volumen de árboles por unidad de área en función de la edad, hasta 210 años. Para todo ello empleó anillos de crecimiento, algunas de sus curvas están reproducidas en Prodan (1968). Theodor Hartig, hijo, (1805-1880) estudió las estructuras anatómicas de la madera y la formación de anillos de crecimiento; Robert Hartig, nieto, (1869-1901) publicó varias investigaciones sobre anatomía y ecología en relación con los anillos de crecimiento, a su vez, empleó los anillos de crecimiento para datar daños provocados a los árboles por granizo, heladas e insectos (Schweingruber 1988, Wimmer 2001, Worbes 2002). El forestal austriaco Arthur Freiherr von Seckendorff-Gudent (1845-1886) estudió la anualidad y la edad de 6410 árboles de *Pinus nigra*, colectados en diversas regiones del imperio austro-húngaro, sus observaciones le permitieron establecer secuencias y patrones a través de una técnica que denominó "anillos característicos" hoy conocida como crossdating **(**Wimmer 2001**).**

En la actualidad se reconoce como padre de la ciencia o disciplina de la Dendrocronología a Andrew E. Douglass (1867-1962) astrónomo norteamericano quien, interesado en estudiar la actividad solar y su relación con el clima en la tierra, halló la dependencia entre el espesor de los anillos y la precipitación en árboles de *Pinus ponderosa* (Douglass 1914). Al mismo tiempo Bruno Huber (1899-1969) motivado por los problemas planteados por Douglass, desarrolló la dendrocronología en Europa, ambos fundaron los principios de la dendrocronología moderna dejando al descubierto un nuevo campo de investigación con aplicaciones en arqueología, climatología y geomorfología (Fritts 1976, Schweingruber 1988).

Aunque las investigaciones dendrocronológicas en el trópico se remontan a más de 100 años (Worbes 2002), en la actualidad algunos científicos dudan de la capacidad de los árboles tropicales para formar anillos de crecimiento anuales (Turner 2004). En 1870 el Alemán Dietrich Brandis, luego Sir Brandis, conocido como el padre de la silvicultura tropical, realizó el primer estudio dendrocrononológico en el trópico, estudió el crecimiento de la teca (*Tectona grandis*) y determinó los ciclos de corta con base en los anillos, de este modo estableció un sistema silvicultural sostenible (Worbes 2002). Coster en 1923 estudio la actividad del cambium vascular e hizo observaciones fenológicas en muchas especies forestales de Java, para explicar la formación anual de los anillos y su relación con la precipitación. Muchos de los resultados de Coster fueron desconocidos hasta hace poco, pues al estar publicados en alemán eran de difícil acceso a la mayoría de científicos que solo leen inglés (Liese 1986, Worbes 2002). Basado en hallazgos hechos por Coster, Berlage en 1931 realizó en Java la primera reconstrucción de la precipitación con los anillos de *Tectona grandis* remontándose 415 años atrás, sin duda, la primera reconstrucción climática del trópico (Pumijumnong *et al.* 1994, Worbes 2002).

Tal vez la primera especie arbórea de América tropical estudiada fue *Cordia alliodora* por César Pérez en 1954 (Tschinkel 1966), quien supuso acertadamente que los anillos eran anuales. Más tarde Heinrich Tschinkel, demostró la anualidad de los anillos de la misma especie (Tschinkel 1966). Mariaux (1967) fue el primero en plantear un método para demostrar la anualidad de los anillos de crecimiento, el cual consiste en realizar marcas del

cambium vascular (heridas), que dejan una cicatriz en la madera con fechas conocidas, y luego se corrobora un año o años después mediante observaciones macro y microscópicas de una sección transversal, o muestra de barreno, tomada a la altura de la herida del árbol en cuestión. Este método es conocido como "ventanas de Mariaux" (Worbes 1999, López *et al.* 2006, Lisi *et al.* 2008). Con este método Mariaux determinó la anualidad de los anillos de importantes especies maderables de África tropical. Mckenzie (1972) utilizó la técnica del marcaje del xilema, y demostró la formación anual de los anillos de *Prioria copaifera*. En la actualidad el método más empleado para verificar la anualidad de los anillos de crecimiento de árboles tropicales es el análisis del contenido de ^{14}C de la madera, este es un marcador isotópico muy importante para datar la fecha de formación de productos orgánicos como la madera (Stuiver *et al.* 1981, Worbes & Junk 1989).

Borman & Berlyn (1981) recopilaron importantes estudios dendrocronológicos enfocados principalmente en el estudio de la edad, las tasas de crecimiento y en probar la existencia de anillos anuales en árboles tropicales, No obstante, tales investigaciones se centraron en resaltar las dificultades del empleo de la dendrocronología en árboles tropicales. Actualmente se reconoce como la mayor autoridad en el tema al profesor Martin Worbes de la Universidad de Gotinga (Göttingen, Alemania), quien desde 1985 ha llevado a cabo numerosos estudios dendrocrolológicos en los trópicos América y África.

1.5 Principios de la dendrocronología

El proceso de hacer coincidir patrones de anillos de árboles que crecieron en la misma época, en el mismo sitio, bajo las mismas condiciones medioambientales, se denomina crossdating (por sus siglas en ingles), datación cruzada ó cofechado. Se conoce como el principio más importante en dendrocronología. El cofechado supone que los factores ambientales afectan el crecimiento de todos los árboles de un sitio en forma similar. Es decir, los anillos de los árboles reflejan una respuesta común a un factor ambiental. Una correcta sincronización de los anillos de crecimiento deriva en una adecuada datación de

los mismos (Fritts 1976, Schweingruber 1988, Kaennel & Schweingruber 1995, Luckman 2007).

Las especies se han adaptado y evolucionado bajo ciertas condiciones que les permite crecer y desarrollarse normalmente en cierto rango de hábitats, a este concepto se le denomina amplitud ecológica. El principio afirma que los árboles son más sensibles a las variables ambientales (precipitación, temperatura, inundación de las llanuras aluviales, competencia, etc.) en los límites de su amplitud ecológica (Fritts 1976). Por ejemplo: son límites ecológicos los suelos con baja retención de humedad como los arenosos y pedregosos y sitios anegados donde las condiciones hipóxicas regulan el crecimiento de algunas especies.

El crecimiento individual de un árbol puede descomponerse como una suma de factores de distinta índole (Crecimiento agregado). Así, el espesor de un anillo de crecimiento (R_t) en cualquier año (t) se expresa como: $R_t = A_t + C_t + \Delta D_{1t} + \Delta D_{2t} + E_t$, donde: A_t es la tendencia ontogénica o forma de crecimiento de la especie influenciada por la edad y el tamaño del árbol; C_t es la influencia de todas las variables climáticas sobre el crecimiento, los deltas están asociados con presencia o ausencia (1 ó 0) de disturbios en el bosque o hábitat, pudiendo ser endógenos D_{1t} (e.g, competencia por luz, formación de claros) o exógenos D_{2t} (e.g, ataques de insectos, incendios); E_t es la variabilidad no explicada o error aleatorio, asociada con otras señales. La señal es la información de interés, se considera "ruido" a la parte de la información presente en la serie de anillos que no brinda respuestas al problema analizado (Cook & Kairiukstis 1990, Delgado 2000). Por ejemplo, si se desea estudiar el clima, está será la señal de interés y las demás señales que componen el crecimiento serán consideradas "ruido", y deberán ser filtradas o reducidas mediante la desestandarización o "detrend" por sus siglas en inglés, en cuyo caso $R_t \approx C_t$ (Cook & Kairiukstis 1990, Luckman 2007).

En las plantas el crecimiento transcurre normalmente, siempre que los factores limitantes lo permitan. Por ejemplo el anegamiento es normalmente el factor limitante del crecimiento vegetal en llanuras de inundación de los ríos (Worbes 1989, 1995), el déficit

hídrico es el factor limitante del crecimiento vegetal en regiones áridas y semiáridas (Fritts 1976, Luckman 2007).

La selección del sitio implica conocer o intuir los factores limitantes del crecimiento, que a menudo representan la señal de interés. Además, discernir los factores que definen la sensibilidad de los árboles permite establecer el sitio de muestreo. Por ejemplo, si hay interés en estudiar las sequías pasadas se deberían muestrear árboles que crecen en lugares marcadamente secos, lejos de las capas freáticas, donde el suelo tenga baja retención de humedad como cimas de montañas o laderas donde la señal climática se hace máxima. Así mismo, árboles que crecen a elevaciones bajas, en condiciones más húmedas, cerca del nivel freático no formarían anillos sensibles al déficit hídrico sino anillos complacientes ó anillos de anchura uniforme (Kaennel & Schweingruber 1995).

1.6 Aplicaciones de la dendrocronología en el trópico

1.6.1 Ecología

El desconocimiento de las tasas de crecimiento de los árboles tropicales lleva al aprovechamiento insostenible que implica la pérdida parcial o total de la biodiversidad (Davey *et al.* 2003). Más aún, la conservación de los bosques tropicales es crucial en el ciclo global del carbono, pues estos tienen el potencial de absorber carbono e incorporarlo en su biomasa y suelo (Clark 2004, Shöngart *et al.* 2008, Körner 2009). Algunos científicos sugieren que el incremento de CO_2 atmosférico estimula el crecimiento de los árboles, lo que resulta con el consiguiente aumento de la biomasa del bosque (Norby *et al.* 1999, Lloyd & Faquhar 2008, Rozendaal & Zuidema 2011). Determinar las tasas de crecimiento diamétrico de los bosques es el insumo fundamental para cuantificar las tasas de absorción de CO_2 en su biomasa; también se requiere esta información para la ordenación sostenible de los bosques tropicales. Para tales fines se han empleado parcelas permanentes, aunque estas implican un sesgo, al considerar solo una fracción de la vida de los árboles.

La dendroecología es una excelente herramienta que permite reconstruir las trayectorias de crecimiento diamétrico de cada árbol durante todo su lapso vital, la historia de disturbios naturales y ocasionados por el hombre (formación de claros naturales, pulsos de liberación y supresión, incendios y plagas, entre otros), y permite datar la fecha exacta en que se presentaron (Kitzberger *et al.* 2000, Brienen & Zuidema 2005, Shöngart 2008, Rozendaal 2010, Rozendaal & Zuidema 2011). Temas poco conocidos como la edad, las tasas de crecimiento y periodicidad del crecimiento de los árboles tropicales, han sido estudiados mediante la dendroecología (Worbes 1989, 1995, 1999, Martínez-Ramos & Alvarez-Buylla 1998, Brienen 2005, Soliz 2010).

En la mayoría de las especies de árboles tropicales en las que se ha estudiado la frecuencia de formación de los anillos de crecimiento estos han resultado anuales; algunas de ellas son: *Cedrela odorata, Swietenia macrophylla, Rhizophora mangle, Pseudobombax septenatum, Capparis odoratissima, Parkinsonia praecox, Prioria copaifera, Protium pittieri, Pentaclethra macroloba, Dipteris panamensis, Minquartia guianensis, Simarouba amara, Mangifera indica, Psidium guajaba, Tamarindus indica, Persea americana, Hymenaea courbaril, Tachigali vazquezii, Amburana cearensis y Cedrelinga catenaeformis* (Mackenzie 1972, Fahn *et al.* 1981, Devall *et al.* 1995, Williams & Banerjee 1995, Fichtler *et al.* 2003, Dünisch *et al.* 2003, Menezes *et al.* 2003, Roig *et al.* 2005, Brienen 2005, Westbrook *et al.* 2006, Ramírez 2007).

1.6.2 Climatología

El clima define la distribución del agua continental, determina la ubicación de los organismos vegetales, animales y el hombre. La mayoría de asentamientos humanos se han concentrado donde el clima es más favorable. Sin embargo, el clima es fluctuante y de difícil predicción pudiendo generar eventos catastróficos fortuitos. Se sabe de culturas movilizadas, abatidas o simplemente extinguidas como producto de cambios climáticos abruptos (Díaz & Stahle 2007). Los cambios en la precipitación y la temperatura del aire pueden favorecer el aumento súbito de parásitos que afectan la salud de hombre y los animales. Tal es el caso del dengue, la malaria, la leshmaniosis y la fiebre hemorrágica,

entre otras (Gage *et al.* 2008). Por ejemplo, la muerte de miles de aztecas tanto antes como después de la llegada de los europeos a México fue producida por fiebre hemorrágica. Tales mortandades correlacionaron con megasequías de varias décadas reconstruidas con cronologías de anillos de árboles de cerca de un milenio de extensión y con pictogramas aztecas en los cuales se encontraba la fecha del evento (Acuña-Soto *et al.* 2002).

Debido a la corta duración de los registros instrumentales existen limitaciones para la identificación de señales de cambio climático, en especial, eventos de baja y media frecuencia, como el fenómeno ENSO (El Niño Southern Oscilation en inglés) y de las tendencias seculares que determinan si las variables climáticas aumentan o se reducen a largo plazo por efecto del cambio climático global (Bradley 1999).

Existe la posibilidad de estudiar el clima antes de la existencia de registros instrumentales mediante los registros indirectos o substitutivos del clima (*Proxy* en inglés) tales como: anillos de crecimiento de los árboles, polen fósil, anillos de coral, sedimentos laminados (Varvas), sedimentos marinos, y análisis de los isotopos contenidos en núcleos de hielo o en la madera de los árboles (Mesa *et al.* 1997, Bradley 1999). Registros indirectos de resolución anual como anillos de coral solo informan de la temperatura y salinidad del mar ó las Varvas que son escasas y difíciles de encontrar tienen desventajas sobre los anillos de crecimiento de los árboles que son fáciles de muestrear pues se encuentran en casi todos los continentes y rangos latitudinales. Más aún, los árboles son los organismos vivos más longevos de la naturaleza (e.g Pinus *longeava* con 4700 años) (Schweingruber 1988). El estudio del clima pasado mediante los anillos de crecimiento de los árboles se denomina dendroclimatología (Kaennel & Schweingruber 1995, Schweingruber 1988, 1996, Luckman 2007), la cual durante los últimos 30 años se ha convertido en la herramienta paleoclimática más importante lográndose reconstruir las precipitaciones y temperaturas de los últimos 12.500 años mediante el análisis de madera de árboles vivos y troncos subfósiles extraídos de turberas y de sitios que han permitido su preservación por cientos o miles de años (Hughes 2002).

Hay un creciente número de estudios de especies tropicales con fines dendrocronológicos, los cuales se centran en demostrar la presencia, periodicidad o características anatómicas de los anillos de crecimiento (Worbes & Junk 1989, Worbes

1989, 1999, 2002, Hua *et al.* 2000, Tomazello *et al.* 2000, Westbrook *et al.* 2006, Boninsegna *et al.* 2009). También existen algunas pocas cronologías de anillos con las cuales se han hecho reconstrucciones climáticas locales en el trópico. La primera reconstrucción dendroclimática del trópico fue realizada en Java por Berlage quien en 1931 reconstruyó 415 años de precipitaciones con anillos de *Tectona grandis* (Pumijumnong *et al.* 1994, Worbes 2002). Investigaciones más recientes han logrado relacionar los anillos de crecimiento con los monzones y variaciones del ENSO en la India (D´Arrigo *et al.* 1994, Pumijumnong *et al.* 1994, Borgaonkar *et al.* 2010). Mas aun, Cook *et al.* (2010) reconstruyeron 1000 años de los monzones y megasequías en el Asía con anillos de crecimiento, observaron que registros históricos como el colapso de dinastía Ming, entre otros, fueron precedidos por severas sequías de varias décadas. Sin duda esta es la reconstrucción dendroclimática más extensa construida hasta ahora en el trópico.

En el altiplano de Bolivia se observó la alta correlación entre los anillos de crecimiento de *Polylepis tarapacana* y la precipitación en cronologías de 98 hasta 705 años. En particular, esta es la cronología con anillos de árboles realizada a mayor altitud en el mundo (4000 y 5200 m de elevación) (Argollo *et al.* 2004, Solíz *et al.* 2009). Además, Christie *et al.* (2009) hallaron correlaciones altas entre cronologías de *P. tarapacana* y los registros del ENSO

En Mato Grosso, Brazil, Dünisch *et al.* (2003), encontraron relaciones significativas entre los anillos de *S. macrophylla* y *C. odorata* con la precipitación pluvial entre los años 1890 y 2000. Schöngart *et al.* (2004) estudiaron los anillos de crecimiento de *Piranhea trifoliata*, una especie que crece bajo ambientes de inundaciones estacionales asociadas con la variación de las descargas del río Amazonas. Los autores encontraron que existe conexión entre el crecimiento de los árboles, el fenómeno “El Niño” y los ciclos de inundación, además muestran como en los últimos 200 años los efectos del ENSO se han hecho cada vez más intensos en la Amazonia. Posteriormente, también en la Amazonia brasileña, Schöngart *et al.* (2005) usaron *Macrolobium acaciifolium*, especie que crece en dos tipos de suelos (suelos de várzea inundados periódicamente por aguas blancas, ricas en nutrientes, e igapó, inundados por aguas negras, pobres en nutrientes). Aunque los dos ambientes están sometidos al mismo régimen de inundación, tanto la edad como la

densidad de la madera de *M. acaciifolium* en los dos ambientes es contrastante. Las cronologías de 150 años (várzea) y 400 años (igapó), correlacionaron significativamente con El Niño, fase cálida del ENSO.

Cerca de la costa Norte de Perú donde el fenómeno ENSO se hace más evidente, allí donde los árboles responden muy bien a la fase lluviosa Rodríguez *et al.* (2005) realizaron el primer estudio dendrocronológico de la región: construyeron cronologías cortas de los anillos de *Bursera graveolens* que muestran respuesta al ENSO durante los últimos 50 años.

En un estudio llevado a cabo en Panamá con *Cordia alliodora, Pseudobombax septenatum* y *Annona spraguei*, distribuidas en un gradiente de precipitación encontraron fuerte relación entre los índices de anillos con la precipitación y la temperatura (Devall 1995). En Costa Rica Enquist & Leffer (2001) encontraron relación estadísticamente significativa con la temperatura y la precipitación tanto en *Capparis indica* como en *Genipa americana*. La precipitación local reconstruida correlacionó positivamente con el índice SOI (Southern Oscilation Index) y negativamente respecto a NAO (The North Atlantic Oscilation). En Colombia. Ramírez (2007) obtuvo cronologías cortas de *C. odoratissima* y *P. praecox* que permitieron la reconstrucción climática de la precipitación de la media Guajira. Así mismo encontró una fuerte correlación entre los índices de anillos con la precipitación (la más alta registrada en la literatura), la temperatura superficial del mar, la velocidad del viento y algunos índices del ENSO.

1.6.3 Geomorfología

La erosión hídrica y eólica del suelo son los principales procesos de erosión natural que afectan la región andina (Sánchez *et al.* 2002). La tasa de erosión hídrica se ha estudiado con parcelas de escorrentía basadas en la pérdida de suelo en un tiempo determinado. Un método alternativo es la dendrogeomorfología que permite datar y reconstruir los procesos erosivos en lapsos que se extienden desde pocos años hasta centurias. Para ello se emplean las raíces de los árboles expuestas por la erosión (Gärtner 2007, Chartier *et al.* 2009). Esto es posible, pues la estructura anatómica de los anillos de crecimiento difiere entre el

tronco, raíces y ramas. Cuando inicia un proceso erosivo, al tiempo que elimina suelo, descubre parte de las raíces superficiales y la estructura anatómica de los anillos cambia para dejar un marcado contraste que permitirá datar con exactitud el inicio del evento erosivo (Schweingruber 1996, Hitz *et al.* 2008).

También la dendrogeomorfología permite medir reptación del suelo con los anillos debido a que los árboles se inclinan, pero luego recuperan su verticalidad. Este punto está marcado en los anillos de la madera. También se puede datar la frecuencia de las avalanchas por las cicatrices dejadas por la abrasión y laceraciones de las rocas en el cámbium vascular, las cuales se observan tiempo después como cicatrices en los anillos de los troncos de los árboles (Schweingruber 1996; Kitzberger *et al.* 2000).

1.6.4 Isótopos estables

Los principales constituyentes químicos de las plantas leñosas son carbono, oxígeno e hidrógeno, estos son tomados de la atmosfera en forma de CO_2 (dióxido de carbono) y del suelo en forma de H_2O (agua) (McCarroll & Loader 2004, Gagen *et al.* 2010). Pequeños cambios en la composición química del aire y del agua son captados por las plantas como la proporción de isótopos estables ($^{13}C/^{12}C=\delta^{13}C$, $^{18}O/^{16}O= \delta^{18}O$, $^{2}H/^{1}H= \delta D$ ó deuterio) almacenados en su tejido orgánico. Es decir, son archivos de las condiciones medioambientales pasadas tales como temperatura, precipitación y humedad relativa entre otras (McCarroll & Loader 2004, 2005).

La proporción de isótopos estables de una muestra orgánica se mide en un espectrofotómetro de masas y se compara con una referencia estándar. Para el hidrógeno y el oxígeno la referencia se conoce como Vienna Standard Mean Ocean Water (Vienna-SMOW); el valor de referencia del carbono se basa en el contenido isotópico de un fósil marino del cretáceo, conocido como Pee Dee Belemnite (PDE) (Schweingruber 1996, McCarroll & Loader 2004, 2005).

Las proporciones muestra y estándar de los isótopos estables se expresan en partes por mil (‰):

$$\delta_{(pesado/liviano)} = \left(\frac{\delta_{(pesado/liviano)_{muestra}}}{\delta_{(pesado/liviano)_{standard}}} - 1 \right) x1000 ,$$

donde la relación pesado/liviano se refiere a $^{13}C/^{12}C$, $^{18}O/^{16}O$, $^{2}H/^{1}H$

1.6.5 Isótopos de carbono

En la atmosfera existen dos isótopos estables de carbono, ^{12}C (98.9%) y ^{13}C (1.1%); ambos pueden mezclarse con el oxígeno y formar CO_2 con distinta carga isotópica ($^{12}CO_2$, $^{13}CO_2$) (Farquhar *et al.* 1989). En las plantas C_3 la fotorespiración depende de la temperatura y de la concentración de CO_2. Las mayores tasas de asimilación de CO_2 en plantas C3 ocurren cuando la irradiancia y temperatura son bajas. A su vez cuando los estomas absorben el aire las moléculas de CO_2 que incluyen isótopos de carbono livianos (^{12}C) se difunden con mayor facilidad, ya que la Rubisco discrimina en contra de los isotopos más pesados (^{13}C) (Farquhar *et al.* 1989, McCarroll & Loader 2004), pues los isótopos livianos requieren menor energía para formar enlaces químicos (Santiago *et al.* 2009). Por tanto las condiciones ambientales como la luz, el agua, la contaminación, afectan la cantidad de CO_2 tomada por las plantas del aire y pueden ser reconstruidas y estudiadas mediante las proporción de $\delta^{13}C$.

Los combustibles fósiles como el carbón y el petróleo son compuestos empobrecidos en ^{13}C que han aumentado la concentración de CO_2 atmosférico, lo cual ha derivado en una reducción del $\delta^{13}C$ atmosférico (efecto de dilusión), fenómeno que ha sido captado y almacenado en la madera de las plantas (McCarroll & Loader 2004), es decir el $\delta^{13}C$ de la madera es *proxy* del CO_2 atmosférico.

1.6.6 Isótopos de hidrógeno y oxígeno

El hidrógeno y el oxígeno en la madera provienen del agua (H_2O) disponible en el suelo y, por tanto, de la precipitación. El contenido isotópico de la planta es igual al de la fuente, pues no existe un fraccionamiento de isótopos por las raíces en el proceso de absorción (Santiago *et al.* 2005). El agua absorbida del suelo llega a las hojas y la evapotranspiración libera a la atmosfera el hidrógeno y el oxígeno con carga isotópica más liviana (^{1}H y ^{16}O),

dando lugar al enriquecimiento de isótopos de agua más pesados (^{2}H y ^{18}O) (McCarroll & Loader 2004). Finalmente el agua con esos isótopos se emplea en la formación de la celulosa de los anillos de crecimiento. Así, un simple análisis de la proporción de isótopos de $\delta^{18}O$ y/o δD en finas porciones de madera desde el centro del árbol hasta su corteza, permite reconstruir la marcha anual de la precipitación año tras año. Más aun, puede ser empleado con árboles que no poseen anillos de crecimiento. Por ejemplo Evans & Schrag (2004) hallaron correlación entre la acumulación de $\delta^{18}O$ en la madera de árboles tropicales y períodos marcadamente secos.

Los isótopos estables de hidrógeno y oxígeno proveen una señal mixta. Existen altas correlaciones entre la temperatura y los isótopos contenidos en la madera, aunque la temperatura tiene un efecto directo en la composición isotópica de la precipitación, también causa un efecto indirecto en el enriquecimiento de isótopos pesados en las plantas por evapotranspiración (McCarroll & Loader 2004, Gagen *et al.* 2010).

Los isótopos de $\delta^{13}C$ son un excelente proxy de la precipitación en regiones áridas y semiáridas tropicales, por ejemplo: En México, Brienen *et al.* (2010), emplearon el contenido de isótopos de $\delta^{13}C$ en anillos de crecimiento de *Mimosa acanthaloba*, para estudiar el CO_2 atmosférico y la eficiencia de toma de agua en esa especie. En África tropical, Gebrekirstos *et al.* (2009), estudiaron en *Acacia senegal*, *Acacia tortilis*, *Acacia seyal*, *Balanites aegyptiaca*, la relación entre el contenido de $\delta^{13}C$ de los anillos, el espesor de los anillos de crecimiento y la precipitación. Encontraron correlaciones inversas, pero significativas entre las cronologías de $\delta^{13}C$, el ancho de los anillos, así como el período lluvioso; situación explicada por la reducción de la tasa fotosintética, inducida por el estrés hídrico en las plantas. En Tailandia, Poussart & Schrag (2005), encontraron que los isótopos de $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C$ extraídos de la madera de *Miliusa velutina* y *Quercus kerrii*, siguen ciclos regulares que correlacionan con los momentos de máxima y mínima humedad relativa.

1.6.7 Actividad solar y cambio climátco

Aunque es innegable el actual cambio climático, su origen es controversial pues muchos científicos afirman que es ocasionado por las actividades antrópicas al generar incremento en los gases atmosféricos de efecto invernadero desde los inicios de la revolución industrial (IPCC 2007). Otras evidencias indican que tal cambio en el clima no es ocasionado únicamente por la actividad antrópica sino por fenómenos cíclicos que ocurren cada cientos o miles de años, como lo son las variaciones del ángulo de la tierra respecto al sol (ciclos de Melankovitch) e incrementos de la actividad solar (Dean 2000). Lean *et al.* (1995) hallaron fuerte relación entre la actividad solar y el incremento de 0.51 ºC de temperatura en el hemisferio Norte desde el siglo XVII hasta el presente. En efecto, gran parte de las evidencias de cambio climático se han acopiado con los anillos de crecimiento de los árboles y otras fuentes sustitutivas con resolución anual tales como núcleos de hielo y datos históricos (Stuiver & Quay 1980, Stuiver & Pearson, 1986, Lean *et al.* 1995, Mann *et al.* 1998, Fröhlich & Lean 1999).

El sol es la principal fuente de energía de todos los procesos ocurridos en la tierra: crecimiento de las plantas, circulación de las masas de aire, evaporación y temperatura, entre otros fenómenos asociados con el clima. Por tanto, cabría preguntarse si los cambios ocurridos en el sol, pudieron haber ocasionado pasados cambios climáticos en la tierra y, a su vez, generarlos en el futuro (Covey & Hoffert 1997). De ahí han surgido las nuevas discusiones acerca de la posible influencia de la actividad solar de los últimos 100 años sobre el actual cambio climático (Rigozo *et al.* 2008, Velasco 2008).

Los máximos solares se evidencian por la presencia de manchas solares cerca al Ecuador del Sol, presentan ciclos de actividad de 11, 22 y 88 años. Por el contrario, un mínimo solar indica ausencia o baja incidencia de manchas solares (De Jager 2005). Eddy (1976) encontró relación directa entre la pequeña edad de hielo (Mínimo de Maunder) y un mínimo solar. Las temperaturas más bajas coincidieron con la ausencia de manchas solares. Curiosamente, ese período coincide con una mayor cantidad de radiocarbono atmosférico registrado en los anillos de los árboles (Stuiver & Quay 1980, Stuiver & Pearson, 1986). Lo anterior es explicable pues, actividades solares bajas permiten mayor flujo de rayos cósmicos galácticos (RCG) que inciden en la tierra y reaccionan

químicamente con isotopos de ^{14}N en la atmósfera y producen altas cantidades de ^{14}C atmosférico (Reedy *et al.* 1983, Kromer 2009), el cual se oxida y en forma de CO_2 ingresa a las plantas a través de la fotosíntesis.

Tanto las concentraciones de ^{14}C atmosféricas como los ciclos de manchas solares pasados se almacenan en los anillos de crecimiento de los árboles (Stuiver & Quay 1980). Ambas son señales proxy complementarias de la actividad solar (Stuiver *et al.* 1986**,** Rigozo *et al.* 2008). En este sentido, los anillos de crecimiento de los árboles reflejan la interacción entre la tierra y el espacio mediante fenómenos como la actividad solar, el campo magnético de la tierra, rayos cósmicos y las variaciones climáticas (Kocharov 1990).

Investigaciones recientes han demostrado que *Araucaria angustifolia*, conífera subtropical, tiene gran potencial para la reconstrucción de máximos solares y sus implicaciones sobre el clima de la tierra (Rigozo *et al.* 2002, 2004, 2008). Nordemann *et al.* (2005) encontraron alta relación entre cronologías de anillos con ciclos de 11 años. Concluyen sobre la alta influencia de los máximos solares en los anillos de crecimiento. Aunque todavía no existen estudios del efecto de las manchas solares en los anillos de árboles tropicales, no debería dudarse de su potencial como respuesta los cambios de la actividad del sol.

El cambio actual del clima en la tierra se debe entender desde las condiciones climáticas pasadas, tanto en latitudes altas como en el trópico. Por tanto, los registros *proxy* del clima y del sol construidos con anillos de crecimiento permitirán examinar su variabilidad espacio-temporal y realizar conexiones entre patrones del clima global como ENSO y NOA (North Atlantic Oscilation) para un mejor entendimiento futuro del cambio climático.

1.7 Agradecimientos

Agradezco especialmente a Flavio Moreno por su insistencia para la realización de este trabajo, a Jorge Ignacio del Valle por su lectura, comentarios y horas de conversaciones que me han permitido aprender sobre este apasionante tema. Gracias a todas las personas que con sus comentarios ayudaron a mejorar el manuscrito.

1.8 Bibliografía

Acuña-Soto, R., D. Stahle., M.K. Cleveland & M.D. Therrel. 2002. Meghadrought and megadeath in 16th century, Mexico. Emerging Infectious Diseases 8: 360-362.

Argollo, J., C. Soliz & R. Villalba. 2004. Potencialidad dendrocronologica de Polylepis tarapacana en los Andes Centrales de Bolivia. Ecologia en Bolivia 39: 5-24.

Bradley, R.S. 1999. Paleoclimatilogy: Reconstructing climates of the quaternary. Academic, San Diego. Pg. 613.

Brienen, R. 2005 Tree rings in the tropics: A study on growth and ages of Bolivian rain forest trees. PROMAB Scientific Series 10. Riberalta, Bolivia. Pg. 137

Brienen, R.J.W & P.A Zuidema. 2005. Relating tree growth to rainfall in Bolivian rain forests: a test for six species using tree ring analysis. Oecologia 146: 1-12.

Brienen, R., W.W. Wanek & P. Hietz. 2010. Stable carbon isotopes in tree rings indicate improved water use efficiency and drought responses of a tropical dry forest tree species. Trees 25: 103-113.

Boninsegna, J. A., J. Argollo, J. C. Aravena, J. Barichivich, D. Christie, M. E. Ferrero, A. Lara, C. L. Quesne, B. H. Luckman, M. Masiokas, M. Morales, J. M. Oliveira, F. Roig, A. Srur & R. Villalba. 2009. Dendroclimatological reconstructions in South America: A review. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 281: 210-228.

Borgaonkar H.P., A. B. S., S. Ram & G.B. Pant. 2010. El Niño and related monsoon drought signals in 523-year-long ring width records of teak (Tectona grandis L.F.) trees from south India. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 285: 74–84.

Borman, F.H & G. Berlyn. 1981. Age and growth rate of tropical trees: New directions for research. Yale University School of Forestry and Environmental Studies, Yale University Press. New Haven, Connecticut, USA. Pg. 137.

Chartier, M.P., C.M. Rostagno & F.A Roig. 2009. Soil erosion rates in rangelands of northeastern Patagonia: A dendrogeomorphological analysis using exposed shrub roots. Geomorphology 10: 344-351.

Christie, D.A., A. Lara, J. Barichivich, R. Villalba, M.S. Morales & E. Cuq. 2009. El Niño-Southern Oscillation signal in the world's highest-elevation tree-ring chronologies from the Altiplano, Central Andes. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 281: 309-319.

Clark, D.A. 2004. Sources or sinks? The responses of tropical forests to current and future climate and atmospheric composition. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 359: 477-491.

Cook, E. & A. Kairiukstis. 1990. Methods of Dendrochronology - Applications in the Environmental Sciences. International Institute for Applied Systems Analysis, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. Pg. 394.

Cook, E., K.J. Anchukaitis., B.M. Buckley., R.D. D´Arrigo., G.J. Jacoby & W.E. Wright. 2010. Asian moonsoon failture and megadrought during the last millennium. Science 328: 486-489.

Covey, C & M. Hoffert.1997.The sun-climate connection: A challenge to conventional wisdom? Climatic Change 37: 387-390.

D'Arrigo, R.D., G.C. Jacoby & P.J. Krusic. 1994. Progress in Dendroclimatic Studies in Indonesia. Journal of TAO (Terrestrial, Atmospheric and Oceanographic) Sciences 5: 349-363.

Davey, S.M., J.R.L. Hoare & K.E. Rumba. 2003. La ordenación forestal sostenible y el enfoque por ecosistemas: Una perspectiva australiana. Unasylva 64: 5-13.

De Jager. 2005. Solar forcing of climate: solar variability. Space Science Reviews 120: 197-241.

Dean, W.E. 2000.The sun and climate. U.S. Geological survey fact sheet 0095-00.

Delgado, S. C. 2000. Aplicaciones estadísticas en estudios dendrocronológicos, pp: 79-102 En: Roig. F.A (Ed.). Dendrocronología en América latina. EDIUNC. Mendoza, Argentina.

Devall, M.S., B.R. Parresol & S.J. Wright. 1995. Dendroecologycal analysis of Cordia alliodora, Pseudobombax septenatum and Annona spraguei in central Panama. IAWA Journal 16: 411-424.

Díaz, H & D. Stahle. 2007. Climate and cultural history in the Americas: An overview.

Climate Change 83: 1-8.

Douglass, A. E. 1914. A method of estimating rainfall by the growth of trees. Bulleting of the American Geographical Society 46: 321-335.

Dünisch, O., R. Montóia & J. Bauch. 2003. Dendroecological investigations on Swietenia macrophylla King and Cedrela odorata L. (Meliaceae) in the central Amazon. Trees 17: 244-250.

Eddy, J.A. 1976. The Maunder Minimun. Science, New series 192: 1189-1202.

Enquist, B., & J. Leffler. 2001. Long-term tree ring chronologies from sympatric tropical dry-forest trees: individualistic responses to climatic variation. Journal of Tropical Ecology 17: 41-60.

Evans, M.N & D.P. Schrag. 2004. A stable isotope-based approach to tropical dendroclimatology. Geochimica et Cosmochimica Acta 68: 3295-3305.

Fahn, A., Burley, J., Longman, K.A., A. Mariaux & P.B. Tomlinson. 1981. Possible contribution of wood anatomy to the determination of the age of tropical trees.pp: 31-42. En: Bormann, F.H. & Berlyn, G. (Eds.). Age and growth rate of tropical tees: new directionsfor research. Yale University, School of Forestry and Environmental Studies, Bulletin No. 94.

Farquhar. G.D., J.R. Ehleringer & K.T. Hubick. 1989. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology 40: 503-537.

Fichtler, E., D.A. Clark & M. Worbes. 2003. Age and long-term growth of trees in an old-growth tropical rain forest, based on analyses of tree rings and ^{14}C. Biotropica 35: 306-317.

Fritts, H.C. 1976. Tree-rings and climate. Academic Press, London, Pg. 567.

Fröhlich, C & J. Lean. 1999. The sun's total irradiance: cycles, trends and related climate change uncertainties since 1976. Geophysical Research Letters 25: 4377-4380.

Gage, K. L., T. R. Burkot, R. J. Eisen & E. B. Hayes. 2008. Climate and vector borne diseases. American Journal of Preventive Medicine 35: 436-450.

Gagen, M., D. McCarroll, N.J. Loader & I. Robertson. 2010. Stable isotopes in dendroclimatology: Moving beyond 'Potential', pp: 147-172. En: Hughes, M., T.W. Swetnam & H.F Diaz (Eds.). Dendroclimatology: Progress and Prospects. Springer, New York.

Gärtner, H. 2007. Tree roots-methodological review and new development in dating and quantifying erosive processes. Geomorphology 86: 243-251.

Gil, A. & J. Olcina.1997. Climatología General. Barcelona, España, Editorial Ariel, S.A. Pg. 579.

Gebrekirstos, A., M. Worbes, D. Taketay, M. Fetene & R. Mithlöhner. 2009. Stable carbon isotope ratios in tree rings of co-occurring species from semi-arid tropics in Africa: Patterns and climatic signals. Global and Planetary Change 66: 253-260.

Hitz, O.M., H. Gärtner, I. Heinrich & M. Monbaron. 2008. Application of ash (Fraxinus excelsior L.) roots to determine erosion rates in mountain torrents. Catena 72: 248-258

Hubber, B. 1952. Tree Physiology In: Annual Review of plant Physiology and Plant Molecular Biology 3: 333-346

Hua, Q., M. Barbetti, G.E. Jacobsen, U. Zoppi & E.M. Lawson. 2000. Bomb radiocarbon in annual tree rings from Thailand and Australia. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 172: 359-365.

Hughes, M. K. 2002. Dendrochronology in climatology the state of the art. Dendrochronologia 20: 95-116.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Climate Change 2007: The physical science basis. contribution of working group to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by S. Solomon *et al.* Cambridge University. Press, Cambridge. U. K.

Kaennel, M & F.H. Schweingruber. 1995. Multilingual glossary of dendrochronology. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, WSL/FNP, Paul Haupt Publisher, Berne. Pg.463.

Kitzberger, T., T. T. Veblen & R. Villalba. 2000. Métodos dendroecológicos y sus

aplicaciones en estudios de dinámica de bosques templados de Sudamérica. pp: 17-78 En: Roig F.A. (Ed.). Dendrocronología en América latina. EDIUNC. Mendoza, Argentina.

Kocharov, G.E. 1990. Tree rings: A unique source of information on processes on the earth and space. pp: 289-296 En: Cook, E. & Kairiukstis, A. (Eds.). Methods of Dendrochronology-Applications in the Environmental Sciences. International Institute for Applied Systems Analysis, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

Körner, C. 2009. Responses of humid tropical trees to rising Co_2. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics 40: 61-79.

Lean, J., J. Beer & R. Bradley. 1995. Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change. Geophysical Research Letters 22: 3195-3198.

Liese, W. J. 1986. To the memory of Sir Dietrich Brandis. Indian Forester 112: 639-644.

Lisi, C. L., M. Tomazello Fo., P.C. Botosso., F.A. Roig., V.R.B. Maria., L. Ferreira & A.R.A. Voigt. 2008. Tree-ring formation, radial increment periodicity, and phenology of tree species from a seasonal semi-deciduous forest in Southeast Brazil. IAWA Journal 29: 189-207.

Lloyd, J & G.D Farquhar. 2008. Effects of rising temperatures and (CO_2) on the physiology of tropical forest trees. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 363: 1811-1817.

López, J.L., J.I. Valdez., T. Terrazas & J.R. Valdez. 2006. Anillos de crecimiento y su periodicidad en tres especies tropicales del estado de Colima, México. Agrociencia 40: 533-544.

Luckman, B.H. 2007. Dendroclimatology. Encyclopedia of Quaternary Science 1: 465-475.

McCarroll, D & N.J. Loader. 2004. Stable isotopes in tree rings. Quaternary Science reviews 23: 771-801.

McCarroll, D & N.J Loader. 2005. Isotopes in tree rings, pp: 67-116. En: Leng, M.J (ed.). Isotopes in Palaeoenvironmental Research. Springer. The Netherlands.

Mckenzie, T.A. 1972. Observations on growth and technique for estimating annual growth in Prioria copaifera. Turrialba 22: 353-354.

Mann, M.E., R.S. Bradley & M.K. Hughes. 1998. Global scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. Nature 392: 779-787.

Mariaux, A. 1967. Les cernes dans les bois tropicaux africains, nature et periodicité. Revue Bois etForêts Des Tropiques 113: 3-14.

Martínez-Ramos, M & E. R. Alvarez-Buylla 1998. How old are tropical rain forest trees? Trends in Plant Science 3: 400-405.

Menezes, M., U. Berger & M. Worbes. 2003. Annual growth rings and long-term growth patterns of mangrove trees from the Bragança peninsula, North Brazil. Wetlands Ecology and Management 11: 223-242.

Mesa, O. J., G. Poveda & L.F Carvajal. 1997. Introducción al Clima de Colombia. Medellín, Colombia Pg. 390.

Nordemann, D. J. R., N. R. Rigozo & H.H de Faria. 2005. Solar activity and El-Niño signals observed in Brazil and Chile tree ring records. Advances in Space Research 35: 891-896.

Norby, R.J., S. D. Wullschleger, C. A. Gunderson, D.W. Johnson & R. Ceulemans. 1999. Tree responses to rising CO_2 in field experiments: implications for the future forest. Plant, Cell and Environment 22: 683-714.

Poussart, P., Evans, M.N & D.P. Schrag. 2004. Resolving seasonality in tropical trees. Multi-decade, high-resolution oxygen and carbon isotope records from Indonesia end Tahiland. Earth and Planetary Science Letters 218: 301-316.

Prodan, M. 1968. Forest Biometrics. Pergamon Press, Headington Hill Hall, Oxford. Pg. 447.

Pumijumnong, N., D. Eckstein & U. Sass. 1994. Tree-ring research on Tectona grandis in northern Thailand IAWA Journal 6: 385-392.

Ramírez, J.A. 2007. Relación entre la señal climática de cronologías de Capparis odoratissima JAQ. Y Cercidium praecox (RUÍZ & PAVON EX HOOK.) HARMS con la variabilidad climática local y global de la Guajira, Colombia. Tesis Magíster

en Bosques y Conservación Ambiental, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Medellín, Colombia. Pg 61.

Reedy, R.C., J.R. Arnold & D. Lal. 1983. Cosmic-ray record in solar system matter. Annual Review of Nuclear and Particle Science 33: 505-537.

Rigozo, N.R., D.J.R. Nordemann, E. Echer, A. Zanandrea & W.D. Gonzalez. 2002. Solar variability effects studied by tree-ring data wavelet analysis. Advances in Space Research. 29: 1985-1988.

Rigozo, N.R., D.J.R. Nordemann, E. Echer & L.E.A. Vieira 2004. Search for Solar Periodicities in tree-ring widths from Concórdia (S.C., Brazil). Pure and Applied Geophysics 161: 221-233.

Rigozo, N.R., A. Prestes, D.J.R. Nordemann, H.E. da Silva, M.P. Souza Echer & E. Echer. 2008. Solar maximum epoch imprints in tree-ring width from Passo Fundo, Brazil (1741-2004). Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 70:1025-1033.

Robertson, I., S.W. Leavitt, N.J. Loader & W. Buhay. 2008. Progress in isotope dendroclimatology. Chemical Geology 252: EX1-EX4.

Rodríguez, R., Mabres, A., Luckman, B.H., Evans, M., Masiokas, M., & M.K. Ektvedt. 2005. "El Niño" events recorded in dry-forest species of the lowlands of northwest Peru. Dendrochronologia 22: 181-186.

Roig, F.A. 1987. Principios y aplicaciones de la Dendrocronología. Serie Científica 31: 23-30.

Roig F.A., J.J. Jiménez-Osorio, J. Villanueva-Díaz, B. Luckman, H. Tiessen, A. Medina & E.J. Noellemeyer. 2005. Anatomy of growth rings at the Yucatán Peninsula. Dendrochronologia 22: 187-193.

Rozendaal, D.M. 2010. Looking backwards: Using tree rings to evalueate long-term growth patterns of Bolivian forest trees. Programa Manejo de Bosques de la Amazonía Boliviana (PROMAB). Scientific series 12. Riberalta, Bolivia. Pg. 150.

Rozendaal, D.M & P.A. Zuidema. 2011. Dendroecology in the tropics: a review. Trees 25: 3-10.

Santiago, L.S., K. Silvera., J.L. Andrade & T.E Dawson. 2005. El uso de isótopos estables en biología tropical. Interciencia 30: 536-542.

Sánchez, L.A., M. Ataroff & R. López. 2002. Soil erosion under different vegetation covers in the Venezuelan Andes. The Enviromentalist 22: 161-172.

Solíz, C., R. Villalba, J. Argollo, M.S. Morales, D.A. Christie, J. Moya & J. Pacajes. 2009. Spatio-temporal variations in Polylepis tarapacana radial growth across the Bolivian Altiplano during the 20th century. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 281: 296-308.

Soliz, C.C. 2010. Shedding light on tree growth: ring analysis of juvenile tropical trees. PROMAB Scientific Series 13. PhD thesis, Utrecht University, Utrecht, The Netherlands. Pg. 108.

Schöngart, J., W. Junk, M.T. Piedade, J.M. Ayress, A. Huttermann & M. Worbes. 2004. Teleconection between tree growth in the Amazonian floodplains and the El Niño-Southern oscillation effect. Global Change Biology 10: 683-692.

Schöngart, J., M. Piedade, F. Wittmann, W. Junk & M. Worbes. 2005. Wood growth patterns of Macrolobium acaciifolium (Benth.) (Fabaceae) in Amazonian black-water and white-water floodplain forests. Oecologia 145: 454-461.

Schöngart, J. 2008. "Growth-Oriented Logging (GOL): A new concept towards sustainable forest management in Central Amazonian várzea floodplains." Forest Ecology.and Management 256: 46-58.

Studhalter, R.A. 1956. Early history of crossdating. Tree-Ring Bulletin 21: 31-35.

Stuiver, M & P.D. Quay. 1980. Changes in atmospheric carbon-14 attributed to a variable sun. Science 207: 11-19.

Stuiver, M., A.L. Rebello, J.C. White & W. Broecker. 1981. Isotopic indicators of age/growth in tropical trees, pp 72-82. En: Bormann & Berlyn (Eds.). Age and growth rate of tropical trees: new directions for research. Yale University Press. New Haven, Connecticut, USA.

Stuiver, M. & G.W. Pearson. 1986. Higth precision calibration of the radiocarbon time scale, AD 1950-500 BC. Radiocarbon 28: 805-838.

Schweingruber, F.H. 1988. Tree-rings: Basics and application of dendrochronology. D. Reidel Publishing Co. Dordrecht, Holand. Pg. 276.

Schweingruber, F.H. 1995. Tree rings and environment Dendroecology. Birmensdorf, Swis Federal institute for Forest, Snow and Landscape Research. Berne Sttutgart, Viena, Haupt. Pg. 609.

Turner, I.M. 2004. The Ecology of trees in the tropical rain forest. Cambridge University Press. Cambridge, UK. Pg. 298.

Tschinkel, H.M. 1966. Annual growth rings in Cordia alliodora. Turrialba 16: 73-80.

Tomazello M; P.C, Botosso & C.S Lisi. 2000. Potencialidade da familia Meliaceae para dendrocronología em regiões tropais e subtropicais, pp: 381-431. En: Roig, F.A. (Ed.). Dendrocronología en América latina. EDIUNC, Mendoza, Argentina.

Tomazello, M., F.A. Roig & P.A. Zevallos. 2009. Dendrocronología y dendroecología tropical: Marco histórico y experiencias exitosas en los países de América Latina. Ecología en Bolivia 44: 73-82.

Velasco, V.M. & B. Mendoza 2008. Assessing the relationship between solar activity and some large scale climatic phenomena. Advances in Space Research 42: 866-878.

Westbrook, J. A., T.P. Guilderson & P.A. Colinvaux. 2006. Annual growth rings in a sample of Hymenaea courbaril. IAWA Journal 27: 193-197.

Williams, A.J & S.K. Banerjee. 1995. Effect of thermal power plant emissions on the metabolic activities of Mangifera indica and Shorea robusta. Environmental Ecology 13: 914-919.

Wimmer R. 2001. Arthur Freiherr von Seckendorff-Gudent and the early history of tree-ring crossdating. Dendrochronologia 19: 153-158.

Worbes, M. 1985. Estructural and others adaptations to long-term flooding by trees on Central Amazonia. Amazoniana 9: 459-484.

Worbes, M. 1989. Growth rings, increment and age of trees in inundation forests, savannas and a mountain forest in the Neotropics. IAWA Bulletin 10: 109-122.

Worbes, M & W. Junk. 1989. Dating tropical trees by means of ^{14}C from bom test. Ecology 70: 503-507.

Worbes, M. 1995. How to measure growth dynamics in tropical trees a review. IAWA Journal 164: 337-351.

Worbes, M. 1999. Annual growth rings, rainfall dependent growth and long-term growth patterns of tropical trees from the Caparo forest reserve in Venezuela. Journal of Ecology 87:391-403.

Worbes, M & W. Junk. 1999. How old are tropical trees? The persistence of a myth. IAWA Journal 20: 255-260.

Worbes, M. 2002. One hundred of tree-ring research in the tropics - a brief history and outlook to future challenges. Dendrochronologia 20: 217-231.

2. Capítulo 2. Los rayos cósmicos y la actividad solar afectan el crecimiento de los árboles tropicales

2.1 Resumen

- Los bosques responden de diversas maneras a los cambios ambientales que dependen tanto de la energía proveniente del espacio como de la composición de gases atmosféricos.
- Evaluamos la relación entre índice de anillos crecimiento (IA) de *Albizia niopoides* y las variables climáticas locales y CO_2 mediante el coeficiente de correlación de *Pearson* y su relación con las variables astronómicas: Índice anual de manchas solares (IMS) y el flujo de rayos cósmicos galácticos (RCG) mediante el espectro cruzado en onditas y coherencia en onditas.
- Encontramos relaciones significativas con el mes de menor precipitación de cada año, las demás variables climáticas y el CO_2 no fueron significativas. El espectro cruzado entre el IA, el IMS y los RCG son significativos en el período de 11 años entre 1930-1995 y 1965-1995, respectivamente. La coherencia entre el IA y el IMS es significativa en el período de 11 años entre 1970-1995. La coherencia de los anillos con los RCG es significativo en el período de 11 años y aparece de manera continua entre 1965-1995.
- Las variables astronómicas, tienen mayor efecto en el crecimiento de *A. niopoides* que las variables climáticas locales. Es la primera vez que se estudia la relación entre los RCG y el IA de un árbol tropical. Nuestros resultados sugieren potencial de los árboles tropicales para registrar variables astronómicas.

Palabras clave: Dendrocronologìa, *Albizia niopoides*, transformada en onditas, espectro cruzado, CO_2

2.2 Introducción

El Sol es la principal fuente de energía en la Tierra. De él depende la fotosíntesis, la circulación de las masas de aire y, en gran medida, el clima, entre otros procesos vitales. Pero existen evidencias científicas de que los rayos cósmicos galácticos (RCG) son una fuente extraplanetaria de energía que también influencia el clima de la Tierra (Svensmark & Friis-Christensen, 1997; Carslaw *et al.,* 2002).

La actividad solar (AS) afecta el clima debido a la variabilidad de baja frecuencia repetida cada 11 años (ciclo de Schwabe), 22 años (ciclo de Hale), 30-33 años (ciclo de Brückner) y de 80-100 años (ciclo de Gleissberg) (Lean *et al.,* 1995; Raspopov *et al.,* 2004; Kasatkina *et al.,* 2007). Las manchas solares (MS) son un registro directo de la AS: A mayor número de MS, mayor es la radiación emitida por el Sol (Usoskin *et al.,* 2003). Se emplea el término irradiancia solar total (IST) para determinar la energía en Wm^{-2} que ingresa a la Tierra (Rozelot & Lefebvre, 2006). A la IST se la ha llamado erróneamente constante solar (Haigh, 2003). Los registros radiométricos de satélites muestran que la IST varía alrededor de 0.19% durante el ciclo de 11 años. Parece poco, pero esa energía es suficiente para modificar el clima de la Tierra debido a que existen mecanismos de amplificación del forzamiento radiativo (Lean *et al.,* 1995; Solanki & Fligge, 1999). Lean *et al,* (1995) explican claramente a partir de las IST reconstruidas, que de los 0.36°C de aumento de temperatura ocurridos desde 1970, la AS puede explicar 0.11°C de ese aumento. La AS es responsable de modular el flujo de RCG que ionizan la atmósfera de la Tierra y produce el ^{14}C (Oeschger *et al.,* 1987), cuando el Sol es menos activo, el flujo de RCG es mayor sobre la Tierra aumentando el contenido de $^{14}CO_2$ en la atmósfera.

Los esfuerzos para explicar los mecanismos físicos involucrados en los efectos del Sol en el clima y la biosfera, hallaron la pieza faltante de este rompecabezas (Svensmark & Friis-Christensen, 1997; Carslaw *et al.,* 2002). Se trata de la correlación positiva entre el flujo de RCG y la cobertura global de nubes descubierta por Svensmark & Friis-Christensen (1997) y posteriormente observada por otros investigadores

(Kniveton, 2004; Todd & Kniventon, 2004; Harrison & Stepheson, 2006; Svensmark *et al.,* 2009).

El clima medio de la tierra depende de la energía proveniente del espacio exterior, mientras que la composición de gases atmosféricos y vapor de agua determinan en qué medida ésta se absorbe o se emite (Yepes & Bukeridge, 2011). El aumento de la concentración de ($|CO_2|$) y sus efectos en el aumento de la temperatura del aire ha sido extensamente documentado (IPCC, 2007).

Los ecosistemas forestales responden de diversas maneras a la variabilidad ambiental circundante y, por tanto, a cambios en la luminosidad, humedad, temperatura precipitación e incrementos de la $|CO_2|$. Los bosques son los sumideros terrestres de C más importantes (Körner, 2009). Entender las interacciones de la $|CO_2|$ con las plantas ha cobrado vital importancia (Norby & Luo, 2004). El aumento de la $|CO_2|$ afecta de tres maneras el crecimiento y productividad de los bosques: *i*, efecto de fertilización (Phillips & Gentry, 1994; Phillips *et al*., 1998), *ii*, aumentando el forzamiento radiativo y la temperatura atmosférica (Allison *et al.,* 2009), *iii*, aumentando la eficiencia del uso del agua (Good *et al*., 2011).

La dendrocronología como herramienta paleoclimática permite reconstruir variables medioambientales como: temperatura, precipitación, composición química del aire o del agua, erupciones volcánicas, variaciones geomorfológicas e, incluso, la AS (Reedy *et al.,* 1983; Bradley, 1999). En efecto, gran parte de las evidencias del cambio climático han sido aportadas por los anillos de crecimiento de los árboles y otros *proxies* con resolución anual (Stuiver & Quay, 1980; Fröhlich & Lean, 1995; Mann, 2002).

Los reportes que asocian la AS con los anillos de crecimiento de los árboles son escasos en las regiones templadas y frías (Murphy, 1990, 1991; Rigozo *et al.,* 2004; Norderman *et al.,* 2005; Prestes *et al.,* 2011; Wang & Zhang, 2011). Sólo existe un reporte que incluye dos especies de árboles subtropicales y una tropical (*Parkia* sp) de la Amazonia (Rigozo *et al*., 2012). En esta investigación empleamos la especie de árbol tropical *Albizia niopiodes* que forma anillos anuales (Giraldo & del Valle, 2012) para investigar el potencial de sus anillos de crecimiento en el registro de variables climáticas

locales y astronómicas: Índice anual de manchas solares (IMS), flujo de RCG, así como la $|CO_2|$.

2.3 Métodos

2.3.1 Área de estudio

Empleamos árboles de *A. niopoides* de los bosques del cañón del río Porce, cordillera Central de los Andes colombianos: 6^0 40'- $7^0$60' N y $75^0$20'-$75^0$135' W. El relieve es montañoso, con pendientes superiores al 50%. La precipitación anual levemente bimodal es de 1952 mm, El mes de enero es ecológicamente seco, precipitación <46 mm. Los demás meses son húmedos o muy húmedos, precipitación >100 mm. La temperatura promedio anual es 22.9º (Figura 1).

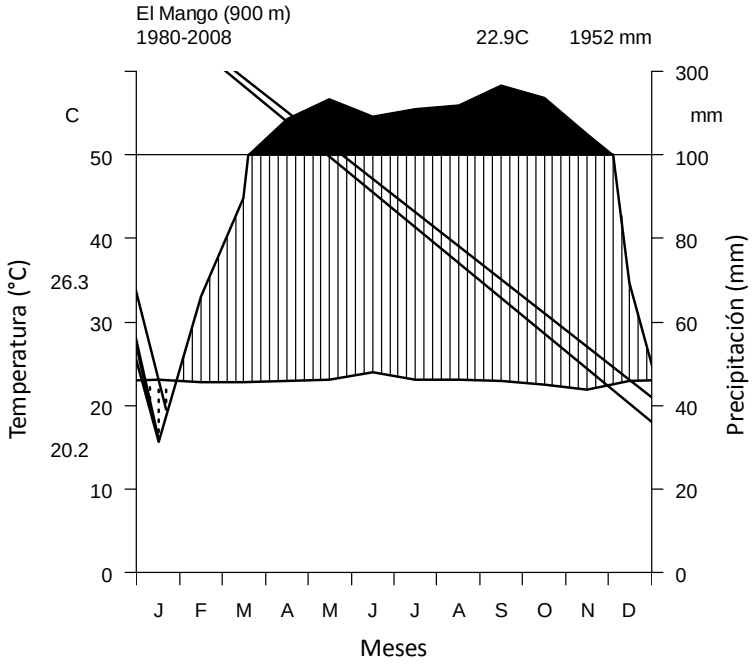

Figura 1. Clima-diagrama del área del estudio (Walter & Lieth 1964). El área punteada corresponde al mes seco (enero), las rayas verticales corresponden a meses húmedos (febrero y noviembre), las áreas llenas corresponden a meses muy húmedos (marzo a noviembre).

2.3.2 Obtención de la serie de anillos

Empleamos 52 series de ancho de anillos de 16 secciones transversales de *A. niopoides* cuya longitud máxima de registro fue 92 años (Giraldo & del Valle, 2012). Con el paquete *dplR* (Bunn 2008) del *software* R 2.15.1 (R Core Team 2012), empleamos el método de desestadarización interactiva, permitiendo ajustar una exponencial negativa, una *spline* cúbica o una media, según la tendencia de cada serie. Este procedimiento permite eliminar la tendencia ontogénica o ruido asociado con la edad del árbol y filtrar el 50% de la varianza de la amplitud de la señal. Posteriormente construimos una cronología de valores medios que representa a los árboles muestreados mediante una media robusta doblemente ponderada y pre-blanqueamiento de la serie para eliminar la autocorrelación serial.

2.3.3 Variables climáticas locales y astronómicas

Empleamos series de temperatura (1992-2007, n=15) y precipitación (1980-2007, n=27) de la estación El Mango (6°48`00``N–75°08`00``W), de Empresas Públicas de Medellín (EPM) y las series de brillo solar (1982-2007, n=25) y nubosidad (1997-2007, n=9) de la estación Guayabito (6º32`00``N–75º08`00``W) pertenecientes al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Empleamos las tasas anuales y la $|CO_2|$ anual del observatorio Manua Loa, Hawaii (http://scrippsco2.ucsd.edu, µmol mol^{-1}, ppm), con el fin de evaluar sus efectos sobre el crecimiento de *A. niopoides.* Tanto las variables climáticas locales como a las series de $|CO_2|$ fueron estandarizadas con filtros autorregresivos, a fin de reducir la variabilidad, la tendencia y la autocorrelación.

Empleamos las variables astronómicas anualizadas de IMS (1915-2007, n=92), flujo de RCG de los observatorios Huancayo, Perú (1953-2005, n=52) (12º2`00``S–75º13`00``O) y Climax, USA (1953-2005, n=52) (39º.37``00``N–253º82`00``E) disponibles en NGDC (National Geophysical Data Center, Boulder, Colorado, http://www.ngdc.noaa.gov/).

2.3.4 Relaciones lineales entre el clima local y el índice de anillos

Mediante el coeficiente de correlación de *P*earson evaluamos el grado de asociación lineal entre el índice de anillos (IA) con las variables climáticas locales y $|CO_2|$ estandarizadas: temperatura media anual (**Tmean**), mes de menor temperatura de cada año (**Tmin)**, mes de mayor temperatura de cada año **(Tmax),** precipitación media anual (**Pmean**), el mes con menor precipitación de cada año **(Pmin),** el mes de mayor precipitación de cada año (**Pmax**), nubosidad media anual (**Cloudmean**), mes con la menor nubosidad de cada año (**Cloudmin**), mes con la máxima nubosidad de cada año (**Cloudmax**), brillo solar anual (**BStot**), mes de menor brillo solar de cada año (**BSmin**), mes con el mayor brillo solar de cada año (**BSmax**), tasa de aumento anual de CO_2 atmosférico (**CO_2r**); y **$|CO_2|$** en la atmósfera .

2.3.5 Función respuesta

Uno de los procedimientos más importantes en dendrocronología es identificar las influencias del clima en el crecimiento de los árboles (IA), para lo cual empleamos la función de correlación y la función respuesta (Biondi, 1997). Es decir, una secuencia de coeficientes calculados entre la cronología de anillos y las variables climáticas mensuales las cuales permiten establecer interpretaciones ecofisiológicas. Empleando el paquete *bootRes* (Zang & Biondi, 2012) del *software* R 2.15.1 (R Core Team 2012), calculamos con los valores mensuales de temperatura y precipitación las funciones de correlación y función respuesta con *bootstrap* (Biondi, 1997; Zang & Biondi, 2012). En el caso del análisis de la función respuesta el programa ejecuta un *bootstrap* de 1000 remuestreos tomados de la distribución original, además realiza la descomposición en componentes principales. El programa remueve los vectores propios no relevantes usando el criterio de PVP, punto en que el valor acumulado de los valores propios es menor que 1 (Guiot, 1990). Los coeficientes respuesta los encontramos mediante la descomposición de los valores, y verificamos utilizando el método del rango de percentil con 95% de confianza (Dixon, 2001).

2.3.6 Transformada en onditas, espectro cruzado y coherencia

Usando las series de IA, el IMS y los RCG, aplicamos la transformada en onditas con el paquete *biwavelet* (Gouhier & Grinsted, 2012) del *software* R 2.15.1 (R Core Team 2012),

el método permite identificar las variaciones en amplitud de la señal (potencia) de diferentes frecuencias y su evolución temporal (Torrence & Compo, 1998). Posteriormente evaluamos el espectro cruzado y la coherencia de las series en el mismo período. Empleamos la función compleja de Morlet que consiste en una onda plana modulada por una gaussiana:

$$\psi_0(t) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{iw_0\eta} e^{-\frac{\eta^2}{2}},$$

Donde $w_0 = 6$ es la frecuencia no-dimensional, este valor proporciona un buen equilibrio entre el tiempo y la localización de la frecuencia (Grinsted *et al*., 2004), y *η* un parámetro del tiempo. Para ello es necesario emplear series continuas y con igual espaciamiento entre valores (Torrence & Compo, 1998). A su vez la transformada continua de la serie analizada (x_n) se define como la convolución de x_n con un escalar y transformado a la forma de $\psi_0(\eta)$:

$$W_n(s) = \sum_{n'=0}^{N-1} X_{n'} \psi * \left[\frac{(n' - n)\Delta t}{s}\right],$$

Donde *s* parámetro de escala, el símbolo (*) indica la conjugada compleja y *n* el parámetro de localización. Esta técnica permite la construcción de un gráfico que muestra las variaciones de la amplitud de la señal en el tiempo (Torrence & Compo, 1998; Hoyos, 1999; Rigozo *et al*., 2012).

El análisis de espectro cruzado en onditas indica si existe o correspondencia detectable de ciclos entre dos series de tiempo de la misma longitud temporal (Rigozo, 2012), y revela áreas con alta energía común entre las dos series (Grinsted *et al.,* 2004). Dadas dos series de tiempo *X* y *Y*, con sus respectivas trasformas de onditas $W_n^X(s)$ y $W_n^Y(s)$, puede definirse el espectro cruzado de onditas como $W_n^{XY}(s) = W_n^X(s) W_n^{Y*}(s)$.

$W_n^{Y*}(s)$ es el conjugado complejo. El espectro cruzado es complejo. De modo que puede definirse la potencia cruzada de ondita como $|W_n^{XY}(s)|$ (Torrence & Compo, 1998; Hoyos, 1999; Rigozo *et al.,* 2012). A partir del espectro cruzado puede definirse la coherencia cuadrada en onditas (desde ahora simplemente coherencia) como el cuadrado del valor absoluto del espectro cruzado suavizado, dividido por el producto de los espectros de potencia suavizados de las dos series en cuestión (Hoyos, 1999); lo cual se asemeja a una covarianza estandarizada. De modo que se puede interpretar como la covarianza estandarizada cuadrada (coeficiente de determinación) localizada en tiempo y frecuencia, la significancia estadística de la coherencia en onditas se estima mediante simulaciones Monte Carlo (Torrence & Compo, 1998; Grinsted *et al,* 2004).

$$R_n^2(s) = \frac{\left|s^{-1}W_n^{xy}(s)\right|^2}{(s^{-1}|W_n^Y|^2)(s^{-1}\left|W_n^y\right|^2)}$$

2.4 Resultados

2.4.1 Cronología

El IA de *A. niopoides* abarca el período 1915-2007 (n=92) (Figura 1). El ancho medio de anillos fue 0.89 cm. La relación señal ruido (SNR) es un índice empleado para evaluar la fuerza relativa de una señal común en cronologías de diferentes regiones (Wigley *et al.,* 1984), también es un criterio útil y objetivo para la selección del mejor filtro empleado para la construcción de la cronología (Delgado, 2000), en nuestro caso la maximización del SNR ocurrió en 6.85. La señal expresada por la población (EPS) fue 0.87, valor aceptado para estudios dendroclimáticos pues supera el límite de 0.85 (Wigley *et al.,* 1984).

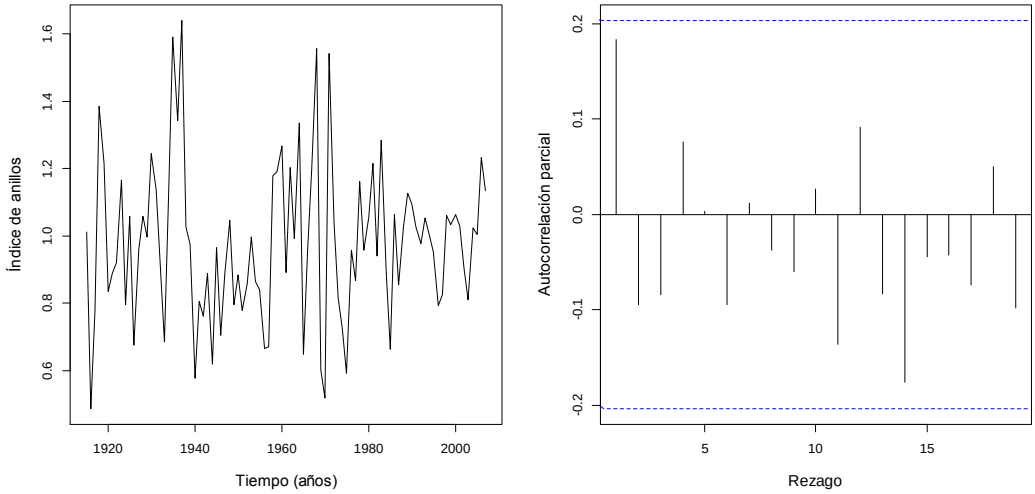

Figura 2. Serie de anillos de *Albizia niopoides* (izquierda). Función de auto- correlación parcial de la cronología de anillos (derecha).

2.4.2 Relaciones lineales: Índice de anillos-clima local

La mayoría las variables climáticas del área de estudio presentaban cierto grado de variabilidad y autocorrelación, las cuales normalizamos con filtros autorregresivos. En la Figura 3. Se presentan todas las variables climáticas locales las cuales poseen media cero, varianza constante y no poseen autocorrelación de primer orden.

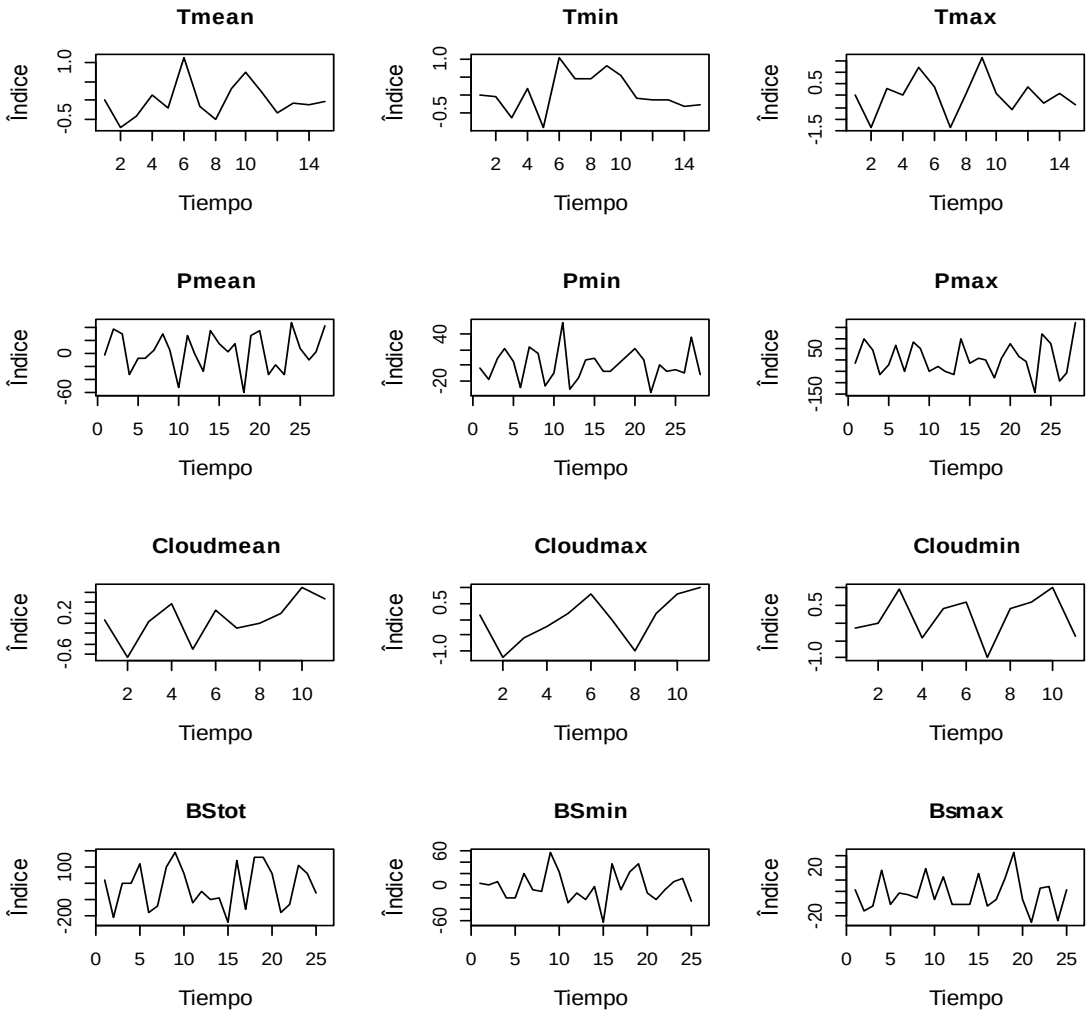

Figura 3. Series estandarizadas de las variables climáticas locales.

Tabla 1. Correlaciones de Pearson (r) entre los anillos de crecimiento (Factor 1, IA) de *Albizia. niopoides* y algunos factores climáticos (Factor 2). Los valores en negrita son estadísticamente significativos (P<0.1).

Factor 1	Factor 2	Grados de libertad	Período	*r*	*P*
IA	Tmean	13	1992-2007	-0.09	0.74
IA	Tmin	13	1992-2008	0.29	0.30
IA	Tmax	13	1992-2009	-0.22	0.42
IA	Pmean	25	1980-2007	0.02	0.93
IA	Pmin	25	1980-2007	**0.34**	**0.07**
IA	Pmax	25	1980-2007	-0.06	0.76
IA	Cloudmean	8	1997-2007	0.15	0.45
IA	Cloudmax	8	1997-2007	0.10	0.78
IA	Cloudmin	8	1997-2007	0.37	0.27
IA	BStot	23	1982-2007	0.24	0.26
IA	BSmin	23	1982-2007	0.24	0.25
IA	Bsmax	23	1982-2007	0.00	0.99
IA	CO_2r	46	1959-2007	-0.11	0.44
IA	$\|CO_2\|$	46	1959-2007	-0.06	0.72

Las relaciones lineales entre el IA y las temperaturas promedias anuales y máximas fueron negativas, con las temperaturas mínimas fueron positivas, pero en ningún caso significativas quizá por los pocos grados de libertad (Figura 4**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**,Tabla 1). En cuanto a las precipitaciones las relaciones lineales fueron positivas y significativas con el mes de menor precipitación de cada año (r=0.34, P=0.07, n=26), usualmente enero (Tabla 1, Figura 4).

Quizás debido a la existencia de datos faltantes de nubosidad en años consecutivos en los registros instrumentales y del corto período de observación (1997-2007), las relaciones lineales no fueron significativas: media anual (r=0.15), máxima anual (r=-0.10), mínima anual (r=0.37). La correlaciones entre el IA y el brillo solar fueron positivas y no significativas (Figura 4)

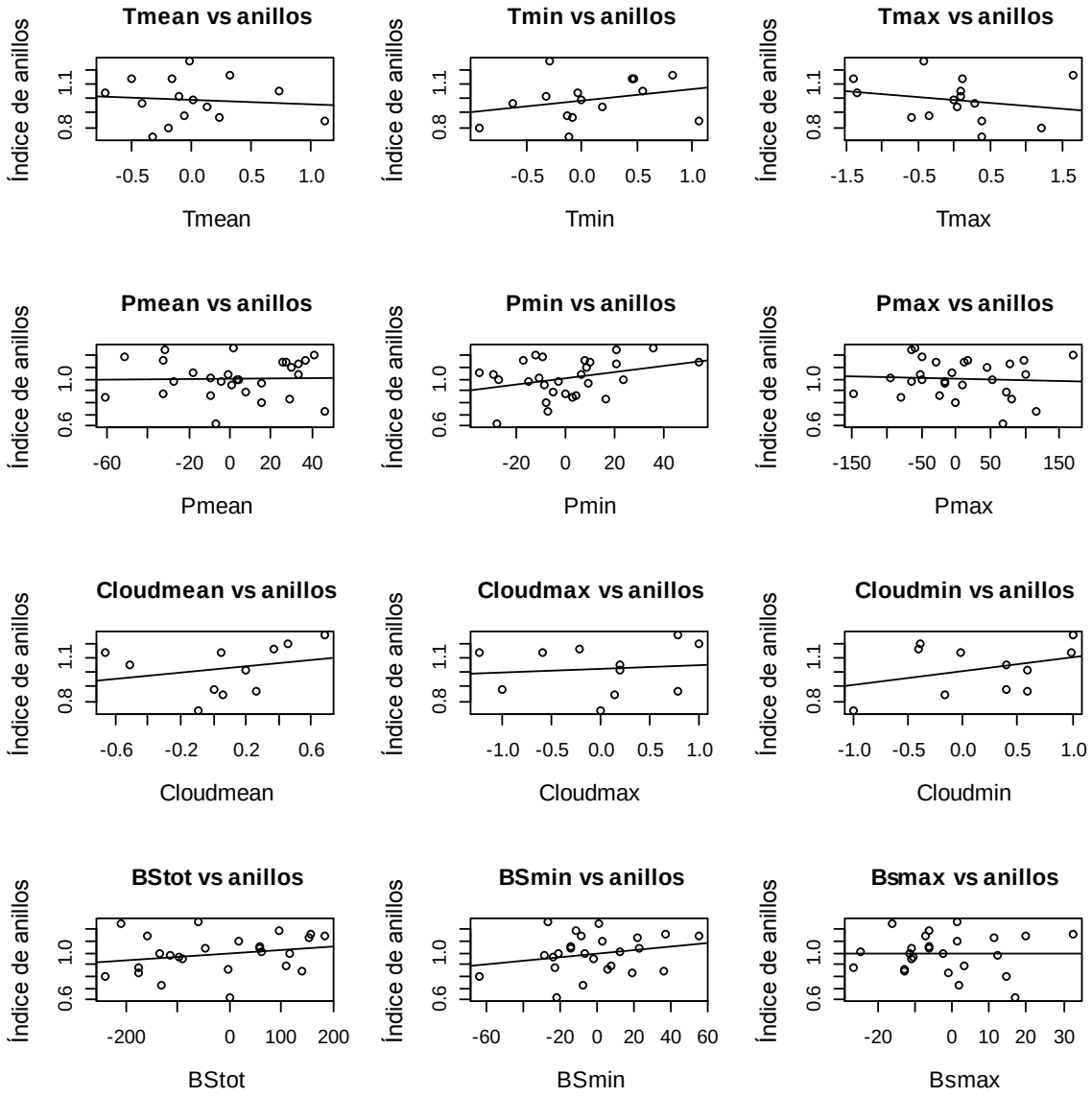

Figura 4. Gráficos de dispersión de la correlación entre las variables climáticas y el índice de anillos

2.4.3 Función respuesta

Del análisis de la función de correlación y de la función respuesta con *boostraping* encontramos que las correlaciones mensuales de la cronología con la precipitación estandarizada y la temperatura estandarizada fueron tanto positivas como negativas. No obstante, para la temperatura ningún mes resulto significativo. Para la precipitación sólo

el mes de enero resultó estadísticamente significativo, tanto para la función de correlación (r=0.39, P<0.05, n=25), como para la función respuesta (r=0.37, P<0.05, n=25, Figura 5), enero es el mes más seco del año (Figura 1). Las funciones de correlación y respuesta de la temperatura no resultaron estadísticamente significativas (Figura no mostrada).

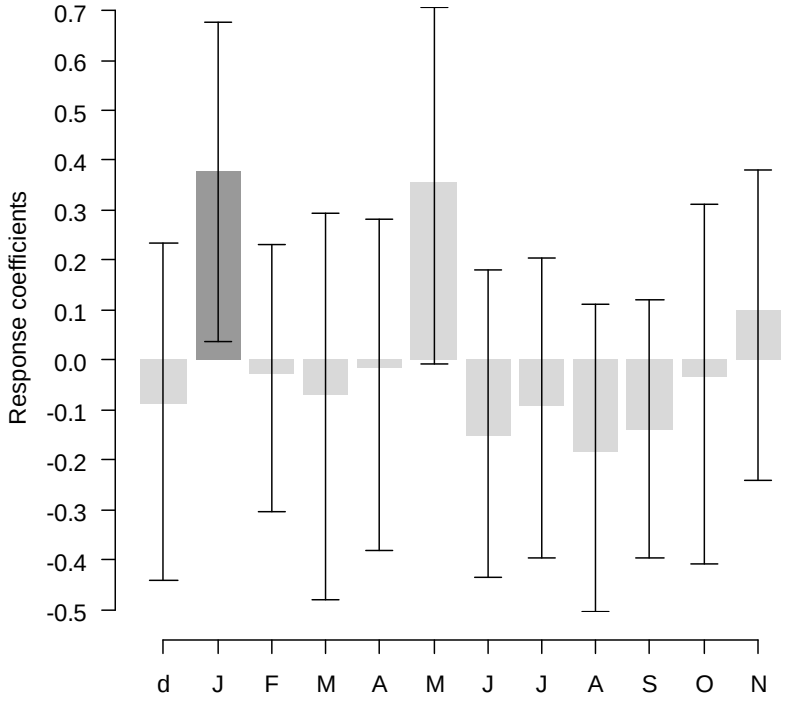

Figura 5. Función respuesta del crecimiento de *Albizia niopoides* durante el año fenológico (diciembre-noviembre). Las barras negras indican correlaciones significativas con P<0.05. Los bigotes indican intervalos de confianza para el valor de correlación.

2.4.4 Transformada en onditas y espectro cruzado

En las Figuras 6, 7, 8, 9 mostramos la descomposición en onditas, el espectro cruzado y la coherencia. En cada una de ellas aparece un cono de confianza que indica el punto donde empiezan a ser importantes los períodos, en los extremos pueden existir estimaciones engañosas y erróneas.

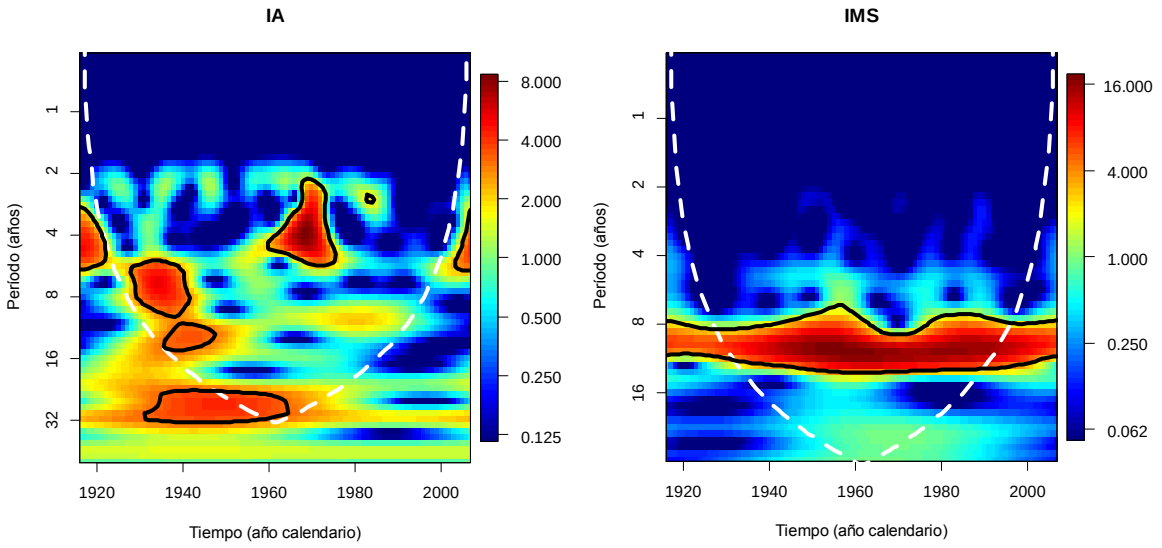

Figura 6. Transformada en onditas (Morlet) del índice de anillos (IA) de *Albizia niopoides* y del IMS. El código en escala de colores indica la variabilidad de la amplitud de la señal. El área de las bandas negras indica un nivel de confianza del 95%. El cono de influencia se muestra como una curva parabólica.

En la Figura 6 mostramos la transformada en onditas de el IA y IMS (1915-2007). Para el IA se pueden identificar algunos períodos significativos al 95% en las bandas de 2-4 que ocurre entre 1960-1970, 4-8 entre 1960-1970 y 1935-1945, 8-16 ocurre entre 1935-1950, y la banda 16-32 años ocurre 1950-1965, aproximadamente. Para el IMS la transformada en onditas muestra el período significativo de 11 años, continuo y temporalmente ubicado entre los años 1930-1995. En la Figura 7 mostramos el espectro cruzado y la coherencia entre las series de anillos. En el espectro cruzado se observa la banda de 8-11 años significativa al 95% de confianza y que aparece de manera continua desde 1925-1995, aproximadamente. Lo anterior demuestra que los anillos de crecimiento responden en gran medida al período de 11 años de AS.

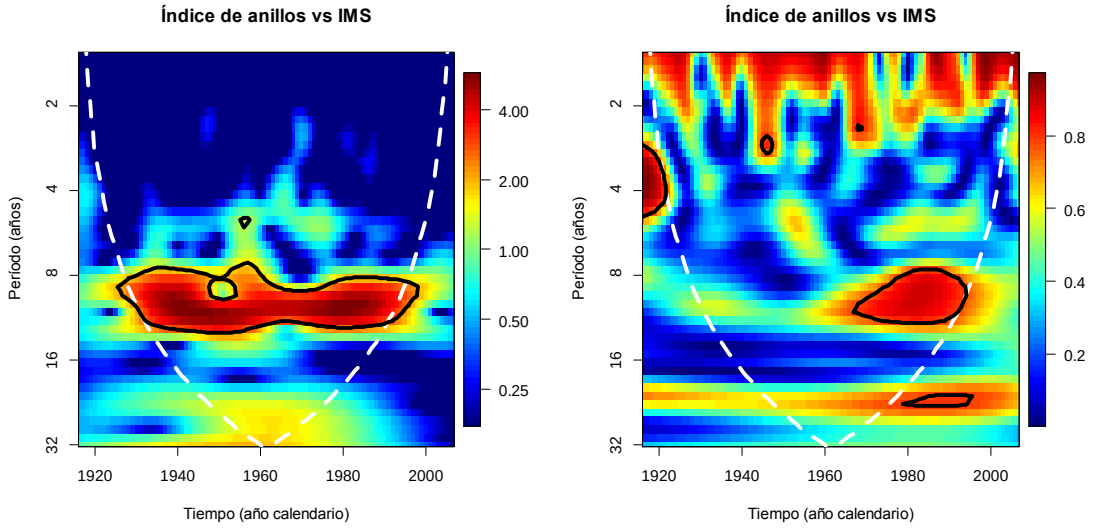

Figura 7. Espectro de potencia cruzado (izquierda) y coherencia (derecha) entre el IA y el IMS. Para el espectro cruzado el código en escala de colores indica la variabilidad de la amplitud de la señal o espectro de potencia. Para la coherencia el código en escala de colores oscila entre 0 y 1. El área de las bandas negras indica un nivel de confianza del 95%. El cono de influencia se muestra como una curva parabólica.

La coherencia entre el IA y IMS determinada por 1000 simulaciones Montecarlo, muestra cómo entre los años 1970 y 1995, aproximadamente, aparece la banda de 8-11 años de períodos significativos al 95%; es decir, el período en que ambas series covarían, cuyo valor es mayor a 0.8, es decir, alta coherencia entre las series (Figura 7). Las variaciones pequeñas de la periodicidad, visibles para pocos intervalos de tiempo podrían estar asociados con el ciclo de 5.5 años (ciclo de Helman) (Douglass 1933).

La relación del IA y los RCG se observa a través del espectro cruzado (Figura 8) y la coherencia (Figura 9), tanto para la estación Climax como Huancayo. Mostramos las bandas significativas al 95% de confianza de 8-11 años para el espectro cruzado y la coherencia entre las series durante 1965-1995, aproximadamente. La relación es virtualmente igual para ambas estaciones de rayos cósmicos (Climax y Huancayo). También con la serie de Climax aparece significativa la banda de 3-6 años entre 1970-1975, aproximadamente.

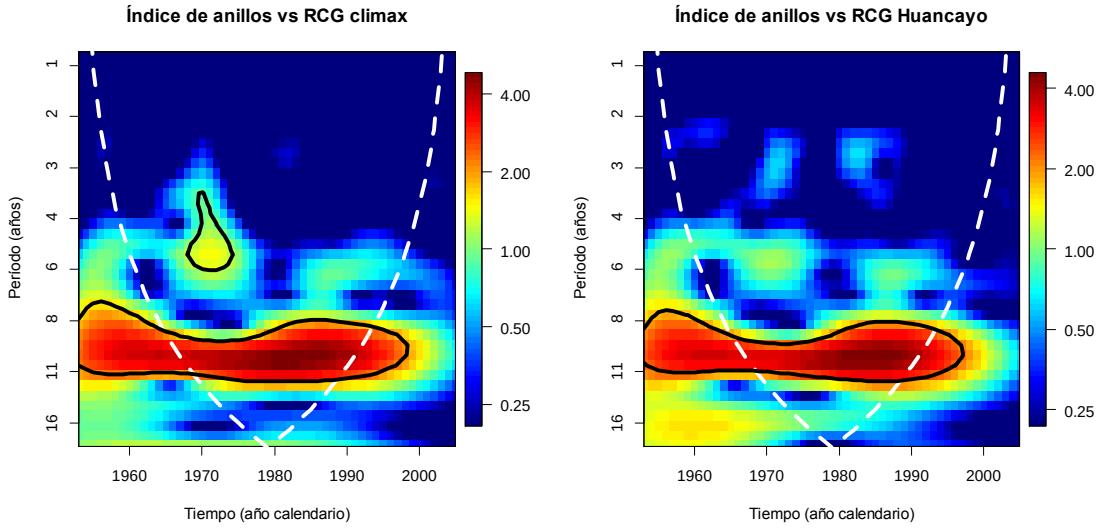

Figura 8. Espectro cruzado entre el IA y los RCG. Para el espectro cruzado el código en escala de colores indica la variabilidad de la amplitud de la señal o espectro de potencia. El área de las bandas negras indica un nivel de confianza del 95%. El cono de influencia se muestra como una curva parabólica.

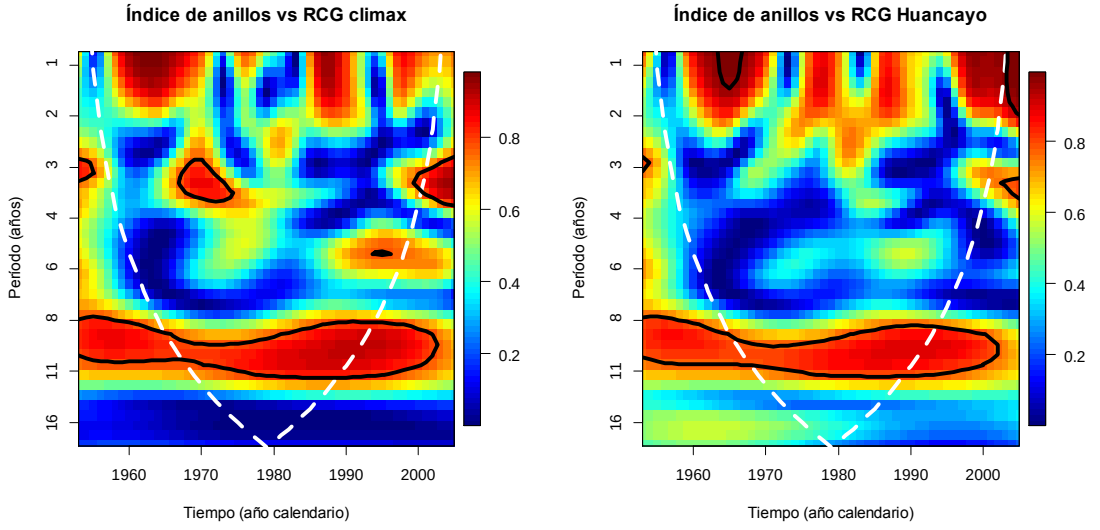

Figura 9. Coherencia entre el IA y el IMS. El código en escala de colores oscila entre 0 y 1. El área de las bandas negras indica un nivel de confianza del 95%. El cono de influencia se muestra como una curva parabólica.

2.5 Discusión

En ningún caso obtuvimos relaciones significativas entre el IA de *A. niopoides* y la temperatura, aunque es de importancia destacar el corto registro instrumental de las series de temperatura en el área de estudio (Figura 4 y Tabla 1). Brienen *et al.,* (2009), encontraron resultados similares. Otros autores han reportado relaciones negativas y significativas entre el crecimiento y las diversas expresiones de la temperatura, tanto a partir de mediciones hechas en parcelas permanentes (Clarck *et al.,* 2003, 2010, Feeley et al., 2007) como con métodos dendrocronológicos en climas estacionalmente secos y áridos (Worbes 1999; Enquist & Leffler, 2001; Fichtler *et al*., 2004; Ramírez & del Valle, 2011a,b), como ecuatoriales (Herrera & del Valle 2011).

Sólo la lluvia durante el mes más seco de cada año afecta positivamente el crecimiento de esta especie (Figura 1, Figura 4). El resultado de la función respuesta sugiere relaciones significativas de la especie a la precipitación de enero (Figura 5), mes que, en general, refleja la precipitación mínima mensual de cada año (Figura 1). Clark *et al*. (2010) reportan correlaciones positivas entre el crecimiento de los árboles medidos en parcelas permanentes en Costa Rica y la precipitación durante la estación menos lluviosa y ninguna correlación con la precipitación total, o correlación significativamente negativa con la precipitación anual (Clark, 2003). En climas áridos y estacionalmente secos, empleando anillos de crecimiento, también se ha reportado el efecto positivo en el crecimiento de las lluvias durante la estación seca (Worbes, 1999; Enquist & Leffler, 2001; Couralet *et al.,* 2010).

No encontramos correlaciones estadísticamente significativas entre el IA y la $|CO_2|$ (Tabla 1). Gedalof & Berg (2010) utilizaron 2402 cronologías de anillos de árboles del *International Tree Ring Data Bank*, la mayoría del hemisferio norte y Suramérica, ninguna del trópico, para estudiar el efecto del aumento de la $|CO_2|$ en el crecimiento de los árboles. Encontraron que sólo 20% de las cronologías respondieron positivamente al efecto de fertilización. La respuesta no parece relacionarse con el clima, la región ni con la eficiencia en el uso del agua.

En experimentos en cámaras cerradas y al aire libre se ha encontrado que el aumento en la $|CO_2|$ tiene efectos importantes en el crecimiento de las plantas C_3, debido a que las concentraciones actuales están lejos de la saturación (Porter *et al.,* 2007). No obstante, en el trópico nunca se han investigado estos efectos directamente en árboles adultos o en bosques (Körner *et al.,* 2007; Körner, 2009). Por esta razón, ha surgido la hipótesis del aumento de la productividad de los ecosistemas tropicales atribuida hipotéticamente al efecto de fertilización del CO_2 (Phillips & Gentry, 1994; Phillips *et al*., 1998; Malhi & Phillips, 2004), pero estos autores no presentan evidencias estadísticas entre el aumento de la biomasa y la $|CO_2|$, Ha habido mucho debate por los resultados opuestos (Feeley *et al*., 2007; Clark, 2004) o no significativos (Clark *et al.,* 2010). Körner (2009), basado en las pocas experiencias existentes en comunidades de árboles adultos en regiones templadas, cree que la respuesta depende de las especies y del sitio.

Ni la nubosidad ni el brillo solar correlacionaron con el IA de *A. niopides* (Tabla 1). No obstante, existen variables heliosféricas globales de mayor importancia cuyo registro es más extenso como el IMS que da cuenta de la irradiancia solar (Lean *et al*. 1995; Beer *et al.,* 2000), y la RCG que influencia la cobertura global de nubes (Svensmark & Friis-Christensen, 1997; Marsh & Svensmark, 2000; Carlsaw *et al.,* 2002). La variabilidad de la AS se refleja en ciclos registrados en diversos *proxies* (Oeschger *et al.,* 1987; Rozelot & Lefebvre, 2006), incluyendo los anillos de los árboles. Existen pocas investigaciones que relacionan los anillos de los árboles con la AS fuera del trópico (Douglass, 1933; Murphy, 1990, 1991; Zhou & Butler, 1998; Rigozo *et al.,* 2004; Nordeman *et al.,* 2005; Kasatkina *et al.,* 2007; Muraki *et al.,* 2011; Prestes *et al.,* 2011), y sólo recientemente en el trópico (Rigozo *et al.,* 2012).

El análisis de la transformada en onditas del IA muestra períodos significativos en la banda de periodicidades 2-8 años que aparecen entre 1960-1970 y 1935-1945, lo cual se asemeja a los resultados encontrados con Rigozo *et al,* (2012) quienes aplicando el mismo método encontraron las mismas periodicidades ubicadas alrededor de 1950 en *Araucaria angustifolia* y en *Parkia sp.* entre 1951-1965, así como en *Carianiana legalis* entre 1965-1981. Estos eventos parecen estar relación|ados con el ENSO (*El Niño Southern Oscilation*) (Rigozo *et al.,* 2002; Nordemann *et al.,* 2005; Prestes *et al.,* 2011) o con el ciclo de Helmann de actividad solar (Douglass, 1933; Wang & Zhang, 2011).

Al observar el espectro cruzado entre el IMS y el IA este sugiere una relación entre las series, lo cual puede deberse a una posible influencia de IMS sobre el IA. Pero esta relación sólo indica la ubicación temporal en la cual los espectros de potencias (varianzas relacionadas con un período) se acompasan entre los años 1930-1995. Otros autores (Rigozo *et al.,* 2002; 2008, 2012; Nordemann *et al.,* 2005; Wang & Zhang, 2011) han encontrado relaciones similares para la misma banda de periodicidades al estudiar el espectro cruzado de series de anillos y la serie del IMS, como ocurrió en esta investigación. Hasta ahora ninguno de los estudios revisados efectúa análisis de coherencia de los espectros cruzados entre los IA y la AS. Nuestro análisis de coherencia muestra significativa la banda de periodicidades de 8-11 años, entre 1970-1995 (Figura 7), lo anterior podría dar cuenta de una relación de causalidad ya que entre los años 1983-2001 Pinker *et al,* (2005) demostraron con información satelital aumentos de la radiación solar de 0.18 W m^{-2} $año^{-1}$ en la región intertropical.

Por primera vez para una especie de árbol tropical se presenta la relación entre el IA y los RCG a través del espectro cruzado y la coherencia (Figura 8, Figura 9). El espectro cruzado y la coherencia entre estas series y el IA se acompasan en la banda de periodicidades 8-11 años, durante los años 1965-1995, aproximadamente (Figura 8, Figura 9). Esto es lógico pues los RCG son un índice de la actividad solar y su periodicidad es de 11 años. El único reporte previo de la relación entre anillos de crecimiento y los RCG es el de Dengel *et al.* (2009), quienes empleando el coeficiente de correlación de *Pearson* encontraron en el Reino Unido relaciones positivas y significativas entre los anillos de *Picea sitchensis* con los RCG y con la nubosidad. No obstante relaciones de este tipo podrían no ser significativas cuando las series presentan autocorrelación, haciendo cada observación no independiente por lo que es necesario corregirlas descontando los grados de libertad (Frits, 1976).

El análisis de transformada en onditas, el espectro cruzado y la coherencia permiten afirmar que existe una conexión entre los RCG y AS en el crecimiento de *A. niopoides.*

Los anillos de crecimiento se pueden considerar un registro geofísico que detecta fenómenos medioambientales a múltiples escalas de tiempo. Por cuanto, los árboles responden a diversos factores ambientales de alta frecuencia como algunos factores del

clima y de baja frecuencia como son la AS y los RCG. Los árboles tropicales parecen registrar mejor señales de baja frecuencia que señales de alta frecuencia. La capacidad de los árboles para registrar dichos fenómenos no es idéntica, ello dependerá de sus características ecofisiológicas y adaptativas al ambiente cambiante. Nuestros resultados sugieren que la incorporación de las variables astronómicas en los modelos ecosistémicos podrían explicar mejor los cambios de biomasa en los bosques tropicales.

2.6 Agradecimientos

Agradecemos a O.J Mesa por los comentarios hechos al manuscrito. A Empresas Públicas de Medellín (EPM) y al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) por el suministro de la información climática. A la Dirección de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín (DIME) y al Departamento Administrativo de Ciencia Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS) por la financiación parcial del proyecto. Al Laboratorio de Bosques y Cambio Climático de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín por el uso de la infraestructura y equipos.

2.7 Referencias

Allison I, Bindorf N, Bindschadler R, Cox P, de Noblet-Ducoudré N, England M, Francis J, Gruber N, Haywood A, Karoly D *et al.* 2009. The Copenhagen diagnosis: updating the World on the latest climatic science The University of New South West Sydney Australia.

Beer J, Mend W, Stellmacher R. 2000. The role of the sun in climate forcing *Quaternary Science Reviews* **19**: 403-415.

Bunn, A. 2008. A dendrochronolgy program library in R (dplR). Dendchronologia **26**: 115-124.

Carslaw KS, Harrison RG, Kirkby J. 2002. Cosmic Rays Clouds and Climate.

Science **298**: 1732-1738.

Clark DA, Piper SC, Keeling CD, Clark DB, 2003. Tropical rainforest tree growth and atmospheric carbon dynamics linked to interannual temperature variation during 1984–2000. *Proceedings of the National Academy of Science USA* **100**: 5852-5857.

Clark DA. 2004. Sources or sinks?: The responses of tropical forests to current and future climate and atmospheric composition. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B* **369**: 477-491.

Clark DB, Clark DA, Oberbauer SO. 2010. Annual wood production in a tropical rain forest in NE Costa Rica linked to climatic variation but not to increasing CO_2. *Global Change Biology* **16**: 747-759.

Couralet C, Sterch FJ, Sass-Klaassen U, Van Acker J, Beeckman H. 2010. Species-specific growth responses to climate variations in understory trees of central Africa rain forests. *Biotropica* **42**: 503-511.

Delgado S. 2000. Aplicaciones estadísticas en estudios dendrocronológicos In: Roig FA. ed. *Dendrocronología en América Latina* EDIUNC Mendoza Argentina 79-102.

Dengel S, Aeby D, Grace J. 2009. A relationship between galactic cosmic radiation and tree rings. *New Phytologist* **184**: 545-551.

Dixon, P.M. 2001. Bootstrap resampling. In: El-Shaarawi, AH., Piegorsch, WW. eds. *The Encyclopedia of Environmetrics*. Wiley, New York.

Douglass AE. 1933. Evidence of cycles in tree rings recods. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **19**: 350-360.

Enquist BJ, Leffler AJ. 2001. Long-term tree ring chronologies from sympatric tropical dry-forest trees: individualistic responses to climatic variation. *Journal of Tropical Ecology* **17**: 41-60.

Feeley KJ, Wright MN, Supardi N, Kassim AR, Davies SJ. 2007. Decelerating growth in tropical trees. *Ecology Letters* **10**: 461-469.

Fichtler E, Trouet V, Beeckman V, Coppin P, Worbes M. 2004. Climatic signals in tree rings of *Burkea africana* and *Pterocarpus angolensis* from semiarid forests in Namibia. *Trees* **18**: 442-451.

Fritts HC. 1976. Tree rings and climate. Academic Press Inc. London.

Gedalof Z, Berg AA. 2010. Tree ring evidence for limited direct CO_2 fertilization of forests over the 20th century. *Global Biogeochemical Cycles* **24** GB 3027 doi: 101029/2009GB003699.

Giraldo VD, del Valle JI. 2012. Modelación del crecimiento de *A niopoiedes* Mimosaceae) por métodos dendrocronológicos *Revista de Biología Tropical (International Journal of Tropical Biology)* **60**: 1117-1136.

Good P, Jones C, Lowe J, Betts R, Booth B, Huningford CH. 2011. Quantifying environmental drivers of future tropical forests extent. *Journal of Climate* **24**: 1337-1349.

Grinsted A, Moor J.C, Javrejeva S. 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics* **11**: 561-566.

Guiot J. 1990. Methods of calibration. In Cook E & Kairiukstis LA (eds). *Methods of Dendrochronology: Applications in the environmental sciences*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Netherlands 165-176.

Haigh JD. 2003. The effects of solar variability on the Earth`s climate. *Philoshopical Transactions: Mathematical Physical and Engineering Sciences* **361**: 95-111.

Harrison R.G, Stepheson D.B. 2006. Empirical evidence for a nonlinear effect of galactic cosmic rays on clouds. *Proceedings of the Royal Society A* **462**: 1221-1233.

Herrera DA, del Valle JI. 2011. Reconstrucción de los niveles del río Atrato con los anillos de crecimiento de *Prioria copaifera*. *DYNA* **169**: 121-130.

Hoyos, C.D. 1999. Algunas Aplicaciones de la Transformada de Fourier y la Descomoposición en Onditas a Señales Hidrológicas y Sísmicas. Degree Thesis. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

IPCC. 2007. Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL, eds. *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*Cambridge, UK & New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Kasatkina E, Shumilov O, Lukina NV, Krapiec M, Jacoby G. 2007. Stardust component in tree rings. *Dendrochronologia* **24**: 131-135.

Körner Ch, Morgan J, Norby N. 2007. Fertilization: When where how much?. In Canadell JG, Pataki DE, Pitelka LF. eds. *Terrestrial ecosystem in a changing world*. Springer Berlin Germany. 9-22

Körner Ch. 2009. Responses of humid tropical forests to risen CO_2. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics* **40**: 61-79.

Kniveton DR. 2004. Precipitation, cloud cover and Forbush decreases in galactic cosmic rays. *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics* **66**: 1135-1142

Lean J, Beer J, Bradley R. 1995. Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change. *Geophysical Research Letters* **22**: 3195-3198

Malhi Y, Phillips OL. 2004. Tropical forests and global atmospheric change: a synthesis *Philosophical Transactions of the Royal Society London B* **359**: 549-555.

Marsh N, Svensmark H. 2000. Cosmic rays clouds and climate. *Space Science Reviews* **00**: 1-16.

Muraki Y, Masuda K, Nagaya K, Wada K, Miyahara H. 2011. Solar variability and widht of tree ring. *Astrophysics and Space Sciences Transactions* 7: 395-401.

Murphy JO. 1990. Australian Tree ring Chronologies as proxy data for Solar Variability. *Astronomical Society of Australia* **8**: 292-297.

Murphy JO. 1991. The downturn in solar activity during cycles 5 and 6. *Astronomical Society of Australia* **9**: 330-331.

Norby RJ, Luo Y. 2004. Evaluating ecosystem responses to rising atmospheric CO_2 and global warming in multi-factor world. *New Phytologis* **162**: 281-293.

Nordemann DJR, Rigozo NR, de Faria HH. 2005. Solar activity and El-Niño signals observed in Brazil and Chile tree ring records. *Advances in Space Research* **35**: 891-896.

Oeschger H, Beer J, Andree M. 1987. ^{10}Be and ^{14}C in the earth system *Philosophycal Transactions of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physics Sciences* **323**: 45-55.

Phillips OI, Gentry A. 1994. Increasing turnover through time in tropical forests *Science* **263**: 954-958.

Phillips OI, Malhi Y, Higuchi N, Laurance WF, Núñez P, Vásquez VR, Laurence SG, Ferreira LV, Stern M, Brawn S, Grace J. 1998. Changes in carbon balance of tropical forests: Evidence from long-term plots. *Science* **282**: 439-442.

Prestes A, Rigozo NR, Nordemann DJR, Wrasse CM, Souza MP, Echer E, da Rosa MB, Rampelotto PH. 2011. Sun–earth relationship inferred by tree growth rings in conifers from Severiano De Almeida Southern Brazil. *Journal of Atmospheric and solar-Terrestrial Physics* **73**: 1587-1593.

Pinker RT, Zhang B, Dutton EG. 2005. Do satellites detect trends in surface solar radiation?. *Science* **308**: 850-854.

Porter JR, Jamieson PD, Grase PR. 2007. Wheat production systems and global Change. In: Canadell JG, Pataki DE, Pitelka LF. eds. Terrestrial ecosystem in a changing world Springer Berlin Germany. 195-209

R Core Team. 2012. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL http://www.R-project.org/.

Ramírez JA, del Valle JI. 2011a. Paleoclima de la Guajira Colombia: Según los anillos de crecimiento de *Capparis odoratissima* (Capparidaceae). *Revista de Biología Tropical (International Journal of Tropical Biology)* **59**: 1389-1405.

Ramírez JA, del Valle JI. 2011b. Local and global climate signals from tree rings of *Parkinsonia praecox* in La Guajira Colombia. *International Journal of Climatology* doi:101002/joc2335.

Raspopov OM, Dergachevb VA, Kolstro T. 2004. Periodicity of climate conditions and solar variability derived from dendrochronological and other palaeoclimatic data in high latitudes. *Palaeogography Palaeoclimatology Palaeoecolgy* **209**: 127-139.

Rigozo NR, Lisi CS, Tomazello M, Prestes A, Nodermann DJR, Souza-Echer M, Echer E, Da Silva H, Rigozo VF. 2012. Solar-Terrestrial signal record in tree ring width time series from Brazil. *Pure and Applied Geophysics* DOI 101007/s00024-012-0480-x

Rigozo NR, Nordemann DJR, Echer E, Vieira LEA. 2004. Search for solar periodicities in tree-ring widths from Concórdia (SC Brazil). *Pure and Applied Geophysics* **161**: 221-233.

Rigozo NR, Nordemann DJR, Echer E, Zanandrea A, Gonzalez, W.D. 2002. Solar variability effects studied by tree-ring data wavelet analysis. *Advances in Space Research* **29**: 1985-1988.

Rozelot JP, Lefebvre S. 2006. Advances in understanding elements of the Sun-Earth links In: Rozelot JP. ed. Solar and Heliospheric Origins of Space Weather Phenomena Lect Notes Phys 699 Springer Berlin Heidelberg. 5-23.

Solanki SK, Fligge M. 1999. A reconstruction of total solar irradiance since 1700.

Geophysical Research Letters **26**: 2465-2468.

Speers JH. 2010. Fundamentals of Tree Ring Research. The University of Arizona Press USA.

Stuiver M, Quay PD. 1980. Changes in atmospheric carbon-14 attributed to a variable sun. *Science* **207**: 11-19.

Svensmark H, Friis-Christensen E. 1997. Variation of cosmic ray flux and global coverage – a missing link in solar climate relationships *Journal of Atmospheric and solar Terrestrial Physics* **59**: 1225-1232.

Svensmark H, Bondo T, Svensmark J. 2009. Cosmic rays decreases affect atmospheric aerosols and clouds. *Geophysical Researh Letters* **36**: L15101, doi: 10.1029/2009GL038429

Gouhier T.C, Grinsted A. 2012. biwavelet: Conduct univariate and bivariate wavelet analyses. R package version 0.12. http://CRAN.R-project.org/package=biwavelet

Todd M.C, Kniveton D.R. 2004. Short-term variability in satellite-derived cloud cover and galactic cosmic rays: an update. *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics* **66**: 1205-1211.

Torrence C, Compo G.P. 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of American Meteorological Society* **79**: 61-71.

Usoskin IG, Solanki SK, Schüssler M, Mursula K, Alanko K. 2003. Millenium-Scale sunspot number reconstruction: evidence for an unusually active sun since 1940s. *The American Physical Society* **91**: 1-4.

Wang X, & Zhang QB. 2011. Evidence of solar signals in tree rings of Smith fir from Sygera Mountain in southeast Tibet. *Journal of Atmospheric and solar Terrestrial Physics* **73**:1959-1966.

Walter H, Lieth H. 1964. Klimadiagramm-Weltaltlas Gustav Fischer. Jena Germany.

Wigley TML, Briffa KL, Jones PD. 1984. On the average value of correlated time series with applications in Dendroclimatology and Hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology* **23**: 201-213.

Worbes M. 1999. Annual growth rings rainfall-dependent growthand long-term growth patterns of tropical trees from the Caparo Forest Reserve in Venezuela. *Journal of Ecology* **87**: 391-403.

Yepes A, Buckeridge MS. 2011. Respuestas de las plantas ante los factores ambientales del cambio climático global (Revisión). *Colombia Forestal* **14**: 213-232

Zhou K, Butler CJ. 1998. A statistical study of the relation between the solar cycle length and tree-ring index value. *Journal of Atmospheric and solar-Terrestrial Physics* **60**: 1711-1718.

Zang C, Biondi F. 2012. Dendroclimatic calibration in R: The bootRes package for response and correlation function analysis. *Dendrochronologia* http://dx.doi.org/10.1016/j.dendro.2012.08.001