

DENDROCLIMATOLOGÍA ISOTÓPICA EN EL PARQUE NACIONAL DE DOÑANA: EFECTOS DEL CAMBIO GLOBAL

Granados-Páez S., Delgado-Huertas A., Reyes, E.

Laboratorio de Isótopos Estables. Estación Experimental del Zaidín (CSIC), Profesor Albareda 1, 18008 Granada

E-mail: sonia.granados@eez.csic.es, antonio.delgado@eez.csic.es, emilio.reyes@eez.csic.es

Abstract

A study of the isotopic composition of carbon ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) in tree-rings of two species of pine (*Pinus pinea*) from the National Park of Doñana, Spain has been performed with the objective of validating its potential in the reconstruction of changing climate conditions and paleohydrologies in the Southern Iberian Peninsula and of evaluating the effects of Global Change on the stress conditions of this ecosystem. Both isotopic series, despite coming from specimens located in diverse zones of the park, present similar tendencies. The $\delta^{13}\text{C}$ values range from -23.6‰ y -27.9‰ (V-PDB). The observed stress patterns during the last century suggest a first phase of improving conditions (less stress) culminating with an especially favourable period of some 15 years (1935 to 1950). In general terms, from 1950, one sees a decrease in carbon isotope discrimination ($\Delta^{13}\text{C}$) corresponding with the general increase in temperature during this period.

Keys words: stable carbon isotopes, tree-ring, cellulose, paleoclimate

Resumen

Se ha estudiado la composición isotópica del carbono ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) en anillos de pinos (*Pinus pinea*) del Parque Nacional de Doñana con el objeto de validar su potencial en la reconstrucción de la evolución de las condiciones climáticas y paleohidrológicas del Sur de la Península Ibérica y evaluar los efectos del Cambio Global sobre las condiciones de estrés de este ecosistema. Ambas series isotópicas, a pesar de proceder de individuos localizados en zonas diversas del parque, presentan tendencias similares. Los valores $\delta^{13}\text{C}$ están comprendidos entre $-23,6\text{‰}$ y $-27,9\text{‰}$ (V-PDB). Durante el último siglo, se observa una primera fase de mejora de las condiciones de estrés que culmina con un periodo especialmente favorable de unos 15 años (1935 a 1950). En general, desde 1950 se observa una disminución de la discriminación isotópica del carbono ($\Delta^{13}\text{C}$) que concuerdan con el aumento generalizado de temperatura debido a los efectos del Cambio Global.

1. Introducción

El clima terrestre es el resultado de la evolución de los diferentes sistemas naturales durante millones de años, la reconstrucción de la historia climática de la tierra ayuda a entender los factores que han intervenido en su evolución y a desarrollar las herramientas necesarias para prever tendencias futuras. Son muchos los métodos y materiales empleados para este fin como los testigos de hielo, sedimentos continentales y marinos, espeleotemas, travertinos, etc. y el uso de técnicas geoquímicas, mineralógicas, paleontológicas, polínicas etc. En este contexto, los análisis isotópicos en anillos de árboles ofrecen la posibilidad de obtener una información climática más detallada, a escala anual o incluso intraanual, permitiendo abarcar escalas de tiempo de hasta miles de años con gran precisión. Por ejemplo, son especialmente útiles para el estudio de eventos climáticos recientes como puede ser la Pequeña Edad del Hielo o cuantificar los efectos del Cambio Global sobre diferentes tipos de ecosistemas.

Urey (1947), sugirió por primera vez que la celulosa podría contener una señal climática debido a que los componentes sintetizados por las plantas y sus razones isotópicas eran un reflejo de las condiciones ambientales. A partir de ahí son muchos los estudios que corroboran que la composición isotópica de los anillos de árboles está relacionada con el clima (Edwards y Fritz, 1986; Anderson et al., 1998; Treydte et al., 2006). Por otra parte, los análisis de $\delta^{13}\text{C}$ no sólo nos aportan información de la temperatura y precipitación, sino también de la evolución del $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2 atmosférico.

El propósito de este estudio es usar la señal isotópica del carbono ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$), debido a su capacidad integradora de diversos parámetros ambientales, para evaluar los efectos del Cambio Global sobre la cobertura vegetal. Por otra parte, se pretende verificar su potencial en climas de grandes contrastes hídricos como es el caso del Sur de la Península Ibérica para establecer series paleoclimáticas de alta resolución en series más antiguas.

Aspectos generales

Isótopos del Carbono en las plantas

La razón de $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ en el dióxido de carbono del aire tiene en la actualidad un valor de aproximadamente -8‰ y de $-6,5\text{‰}$ (V-PDB) antes de la revolución industrial (Friedli et al., 1986). Las hojas y la madera de los árboles tienen valores mucho más negativos (-20‰ a -30‰ vs V-PDB), debido a que los árboles están empobrecidos en ^{13}C con respecto al aire (Craig, 1953). Este fraccionamiento isotópico entre CO_2 atmosférico y tejido vegetal está relacionado fundamentalmente con los siguientes procesos:

1. Entrada de CO_2 a través de los estomas, ya que durante este proceso las moléculas de CO_2 con el isótopo ligero se difunden más fácilmente que las del isótopo pesado. El efecto neto es que el CO_2 del interior de la planta está empobrecido en ^{13}C con respecto al aire del ambiente, resultando un fraccionamiento del $-4,4\text{‰}$.
2. El segundo proceso de fraccionamiento tiene lugar durante la fotosíntesis. Las plantas C_3 , que realizan la fotosíntesis mediante el ciclo Calvin-Benson se enriquecen más en carbono ligero (^{12}C) con respecto al CO_2 atmosférico que las C_4 en las que interviene el ciclo Hatch-Slack (ciclo fotosintético C_4). Todos los árboles siguen un ciclo fotosintético C_3 . En este caso, actúa la encima RUBISCO para producir azúcares por carboxilación y como resultado se obtiene un fraccionamiento en contra del isótopo pesado de un -27‰ .

Por tanto, cualquier especie de árbol quedará empobrecida con respecto al CO_2 atmosférico (-8‰ vs V-PDB) en aproximadamente un $31,4\text{‰}$. En unas condiciones ideales el tejido de la planta debería presentar valores ideales próximos a $-39,4\text{‰}$ (V-PDB). Sin embargo, cuando la cantidad de agua es escasa, la planta cierra los estomas para no perder agua por transpiración, disminuyendo así la concentración de CO_2 dentro de la planta lo que conduce a un incremento en los valores ^{13}C . Esto queda reflejado en la siguiente ecuación:

$$\delta^{13}\text{C}_p = \delta^{13}\text{C}_{atm} + a(1 - (C_i/C_a)) + b(C_i/C_a) \quad (\text{Farquhar et al., 1982})$$

donde $\delta^{13}\text{C}_p$ y $\delta^{13}\text{C}_{atm}$ son las composiciones isotópicas de la planta y la atmósfera respectivamente, a es el fraccionamiento por difusión ($-4,4\text{‰}$), b es el fraccionamiento por

carboxilación (-27‰) y C_i y C_a son las concentraciones de CO_2 en el interior de la planta y atmosférico.

Debido a que la razón $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ del CO_2 atmosférico se está haciendo cada vez más negativa por la mayor emisión a la atmósfera de gases procedentes de la quema de combustibles fósiles (ricos en ^{12}C), sería más riguroso emplear el término discriminación isotópica de la planta ($\Delta^{13}\text{C}$):

$$\Delta^{13}\text{C} = (\delta^{13}\text{C}_{\text{atm}} - \delta^{13}\text{C}_p) / (1 + (\delta^{13}\text{C}_{\text{atm}}/1000)) \quad (\text{Farquhar et al., 1982})$$

Obteniéndose así valores absolutos no afectados por la edad del anillo y la composición isotópica de la atmósfera en ese momento.

WUE (Water Use Efficiency) y $\delta^{13}\text{C}$

La eficiencia en el uso del agua (WUE) es lo que tradicionalmente se define como la razón entre la fotosíntesis neta y la transpiración (proceso por el cual el agua de la planta pasa a la atmósfera, por gradientes de humedad) y se considera una característica de la tolerancia de la planta al estrés hídrico y a la salinidad. Además mantiene una relación inversa con C_i (Farquhar et al, 1989), lo que significa que cuando los estomas están poco abiertos (por ejemplo, en el caso de estrés hídrico o por salinidad) y por tanto la conductancia estomatal sea reducida, la C_i (concentración de CO_2 en el interior de la planta) será también menor y, por tanto, habrá menos discriminación de la enzima RUBISCO en contra del isótopo pesado ($^{13}\text{CO}_2$). Por el contrario si los estomas están abiertos, la C_i es más alta, lo que incrementa la discriminación contra el isótopo pesado. Por tanto, a menor discriminación isotópica (mayor enriquecimiento en ^{13}C), mayor será la WUE.

$$\text{WUE} = A/E = C_a(1 - C_i/C_a) / 1,6 * (e_i - e_a) \quad (\text{Farquhar et al, 1989})$$

Donde A es la fotosíntesis neta, E la transpiración, e_i y e_a son la presión vapor dentro de la hoja y en la atmósfera respectivamente. El factor 1,6 está relacionado con la diferente capacidad de difusión del CO_2 y del vapor de agua.

Es importante señalar que los valores de $\delta^{13}\text{C}$ del material vegetal estructural sólo serán detectables cuando haya cambios en C_i/C_a y en las condiciones ambientales (sequía, salinidad) que persistan durante un período de tiempo suficientemente representativo y no por cambios puntuales.

Variación de $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2 atmosférico

El carbono presente en los anillos de los árboles tiene su origen en el CO_2 atmosférico, por tanto en los constituyentes del anillo (celulosa, hemicelulosa y lignina) podemos encontrar registros de las variaciones del $\delta^{13}\text{C}$ atmosférico, que a su vez está siendo muy afectado desde la revolución industrial por el incremento en la quema de combustibles fósiles (Friedli et al., 1986). Durante los últimos 250 años el CO_2 ha aumentado exponencialmente, este aumento

continúa debido a la quema de combustibles fósiles y a los cambios de uso del suelo. Hasta el año 1920 los cambios en el CO₂ atmosférico se debían fundamentalmente a los cambios en el uso del suelo, después de 1920 esta fuente fue mucho menos relevante y fue tomando preponderancia el carbono procedente del aumento en el uso de combustibles. Así, solo en unas décadas la concentración del CO₂ atmosférico aumentó 100 ppm, desde 280 ppm hasta 380 ppm que hay en la actualidad. Esto corresponde a un aumento del 35% del valor preindustrial, además el CO₂ procedente de la quema de combustibles fósiles y de los cambios de uso del suelo está empobrecido en ¹³C, es decir, ha habido una tendencia hacia valores más negativos de δ¹³C en el CO₂ atmosférico. Medidas realizadas por Friedli *et al.*, (1986) y posteriormente por Leuenberger *et al.*, (1992), Smith *et al.*, (1997), Fischer *et al.*, (1999) y Francey *et al.*, (1999) indican que ha habido una disminución del valor de δ¹³C atmosférico desde -7,5‰ hasta -7,8‰, entre 1982 y 1994.

Por esta razón es necesario corregir el efecto de la evolución de los valores de δ¹³C en cada momento. Para ayudar a esto se han dado algunas ecuaciones generales que, sin embargo, deben de tomarse con precaución ya que algunas áreas pueden tener fondos de δ¹³C diferentes. Una de estas ecuaciones es la dada por Enting (1987):

$$\Delta\delta^{13}\text{C} = A * \text{Tiempo} + B \quad (\text{Enting, 1987})$$

Los coeficientes *A* y *B* serán diferentes, según el período de tiempo y si estamos en el Hemisferio Norte o en el Sur, según se muestra en la tabla 1

Tabla 1: Corrección para la tendencia atmosférica del Δ¹³C (Enting, 1987)

Fecha	Hemisferio Sur	Gradiente Norte-Sur	Hemisferio Norte
1000-1682	A=0,00018459 B=-0,18459	A=0,0000222 B=-0,0221526	A=0,00020674 B=-0,20674257
1683-1891	A=-0,00138829 B=2,46158732	A=-0,00016661 B=0,29541415	A=-0,00155490 B=2,75700147
1892-1961	A=-0,00522930 B=9,72796331	A=-0,00062757 B=1,16744913	A=-0,00585687 B=10,89541244
1962-2005	A=-0,02615944 B=50,78324932	A=-0,00313938 B=6,09447817	A=-0,02929882 B=56,87772749

El aumento del CO₂ atmosférico producido desde la revolución industrial hasta la actualidad, ha traído implícito el aumento de la WUE y de los valores de δ¹³C de las plantas, debido fundamentalmente a aumentos en la fotosíntesis y sobre todo en la conductancia estomatal.

2. Materiales y métodos

Para llevar a cabo este estudio, se recogieron muestras de *Pinus pinea* del Parque Nacional de Doñana. Las muestras se secaron al aire libre durante 24 horas y posteriormente se lijaron y

dataron visualmente utilizando el método de datación cruzada (cross-dating) (Stokes y Smiley 1968, Yamaguchi 1991). Se midieron las anchuras, con una exactitud de 0,01mm y se chequeó con COFECHA (Holmes, 1983).

Los análisis isotópicos se realizaron en el laboratorio de Biogeoquímica de Isótopos Estables de la Estación Experimental del Zaidín (Granada). Para el análisis isotópico se extrajeron 50 mg de muestra de cada anillo, se homogenizaron y se extrajo celulosa con el método de Brendel, et al., (2000). A continuación se tomaron 0,5-0,6 mg de muestra y se introdujeron en una cápsula de estaño para la determinación de $\delta^{13}\text{C}$ en un Analizador Elemental Carlo Erba 1500 NC conectado a un IRMS (Isotope Ratio Mass Spectrometry) Thermo Finnigan Delta Plus XL. Los datos de las muestras se expresan con la notación δ en relación al estándar de referencia V-PDB, donde $\delta(\text{‰}) = (R_{\text{muestra}}/R_{\text{estandar}} - 1) * 1000$, donde $R = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$. La desviación estándar de estos análisis son $<0,1\text{‰}$.

3. Resultados y discusión

Se ha analizado la composición isotópica del carbono en 144 anillos de crecimiento de dos individuos de pino (*Pinus pinea*) situados en el Parque Nacional de Doñana con el objeto de observar el grado de estrés que ha sufrido la población arbórea del área durante casi un siglo (desde 1918). Como se ha mencionado en los apartados anteriores, las razones isotópicas del carbono (${}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$) presente en la madera de cada anillo integran una serie de factores climáticos y ambientales que afecta al grado de estrés que ha sufrido el árbol, lo que nos permite detectar efectos del Cambio Global sobre el ecosistema que sería difícil de cuantificar con otros métodos. En la figura 1 se han representando los datos isotópicos de los dos individuos estudiados junto con los datos de precipitación total anual obtenidos por el Equipo de Seguimiento de los procesos naturales de la Estación Biológica de Doñana (<http://www-rbd.ebd.csic.es/Seguimiento/mediofisico.htm>), la serie pluviométrica anual reconstruida de la estación Sevilla-Tablada (Custodio et al., 2005) y datos de precipitación de la Estación de Gibraltar para los períodos anteriores.

Como puede observarse en la figura 1, los valores isotópicos de ambos individuos muestran, en general, tendencias paralelas con algunas diferencias que posiblemente estén relacionadas con la posición, distancia al nivel freático y contexto edáfico de cada individuo, o el propio desarrollo de la raíz. En años de menor pluviometría, y especialmente cuando el invierno y la primavera han sido secos, se suelen dar los valores menos negativos en $\delta^{13}\text{C}$. Esto se debe a que en momentos de estrés la planta cierra sus estomas para perder menos agua por transpiración, esto hace que al mismo tiempo entre menos CO_2 por lo que la encima RUBISCO es menos selectiva hacia el ${}^{12}\text{C}$. Así, ambas especies muestran valores menos negativos en las últimas sequías importantes como la de los años 90-95, mientras que en 1996 que fue especialmente lluvioso presentan los valores más negativos (Fig. 1). Otras sequías como la de 1930, 1935, 1940, 1943 o la de los años 53, 54 y 70 también aparecen marcadas con tendencia hacia valores menos negativos en $\delta^{13}\text{C}$. El último registro del que disponemos es de la sequía de 2005, para la cual sólo disponemos de los datos isotópicos del individuo *Pinus pinea* F, en este caso el valor de $\delta^{13}\text{C}$ es significativamente mayor ($-24,6\text{‰}$ vs V-PDB) con respecto por ejemplo a años con intensa pluviometría como el 1996 ($-25,7\text{‰}$ vs V-PDB). Sin embargo, el valor menos negativo se registra el año 1988 que si bien no es el más seco en la zona, si coincide con uno de los veranos más calurosos de los últimos 30 años (Fig1 y Fig.2).

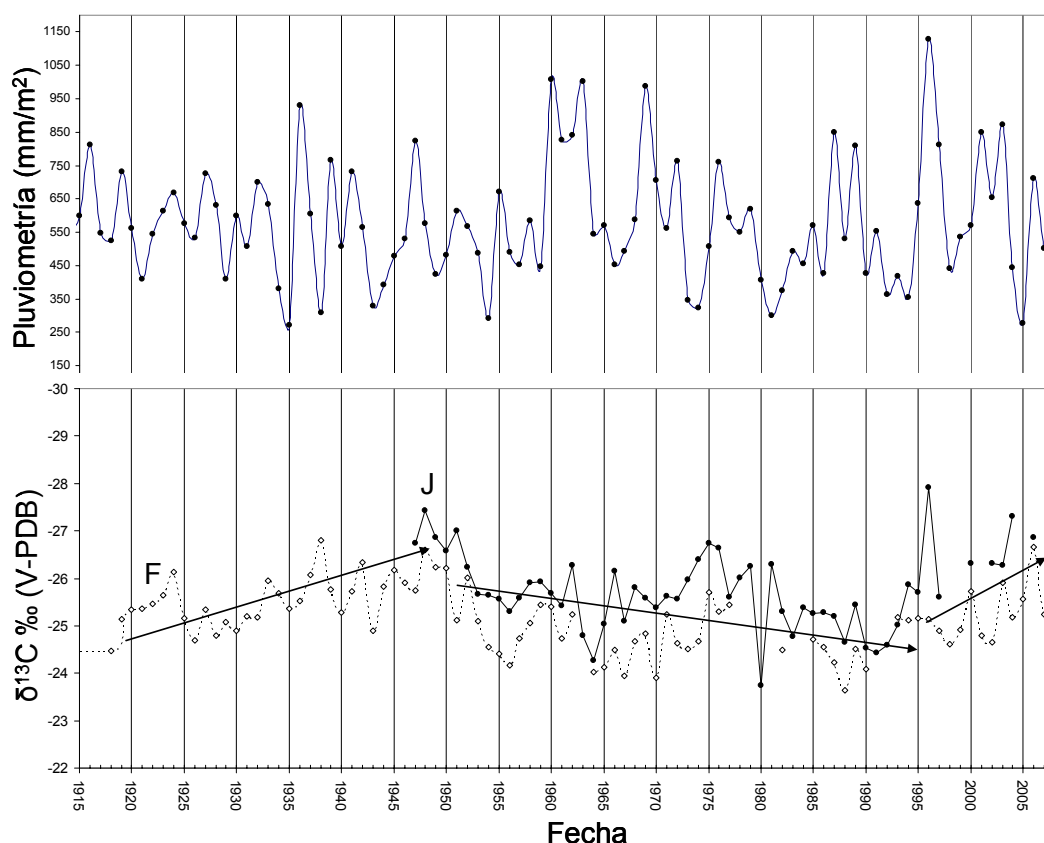


Figura 1. Composición isotópica de celulosa en anillos de crecimiento de *Pinus pinea* (J) y *Pinus pinea* (F). En la parte superior de la figura se ha representado la precipitación en el Parque Nacional de Doñana (datos reales desde 1979 hasta la actualidad y reconstruidos a partir de estaciones próximas antes de esa fecha). Obsérvese como durante el último siglo las condiciones de estrés se han incrementado con la excepción de una mejora entre 1945-50 y durante los últimos años desde el año 1996.

Los años de mayor pluviometría suelen coincidir con los valores más negativos de $\delta^{13}\text{C}$, (Anderson et al., 1998, Loader and Switsur, 1995) si bien al sobrepasar determinado umbral mínimo ya no constituye un factor limitante, por lo que la tendencia puede, en algún caso, ser menos clara. Por tanto, la interpretación de los datos no está exenta de problemas. Por ejemplo, una excesiva lluvia en áreas de marismas puede perjudicar a la planta provocando un estrés que se traduce en cierre estomático y valores menos negativos (similar a un estrés hídrico por falta de agua). Por otra parte, lluvias estacionales específicas en la época de crecimiento de los anillos (primavera-verano), pero en años que en general han sido secos, pueden dar lugar a un efecto isotópico contrario a lo esperado y viceversa. En cualquier caso, y a pesar de todos estos factores, la correlación entre precipitación y señal isotópica es bastante clara en la mayor parte de los casos. Otro aspecto a considerar, que si es posible corregir, es la variación en la composición isotópica del CO_2 atmosférico desde la revolución industrial, en especial durante las últimas décadas. Los valores isotópicos deben corregirse por el continuo decrecimiento en los valores $\delta^{13}\text{C}$ debido a la quema de combustibles fósiles (Ver Tabla 1 y Fig. 2).

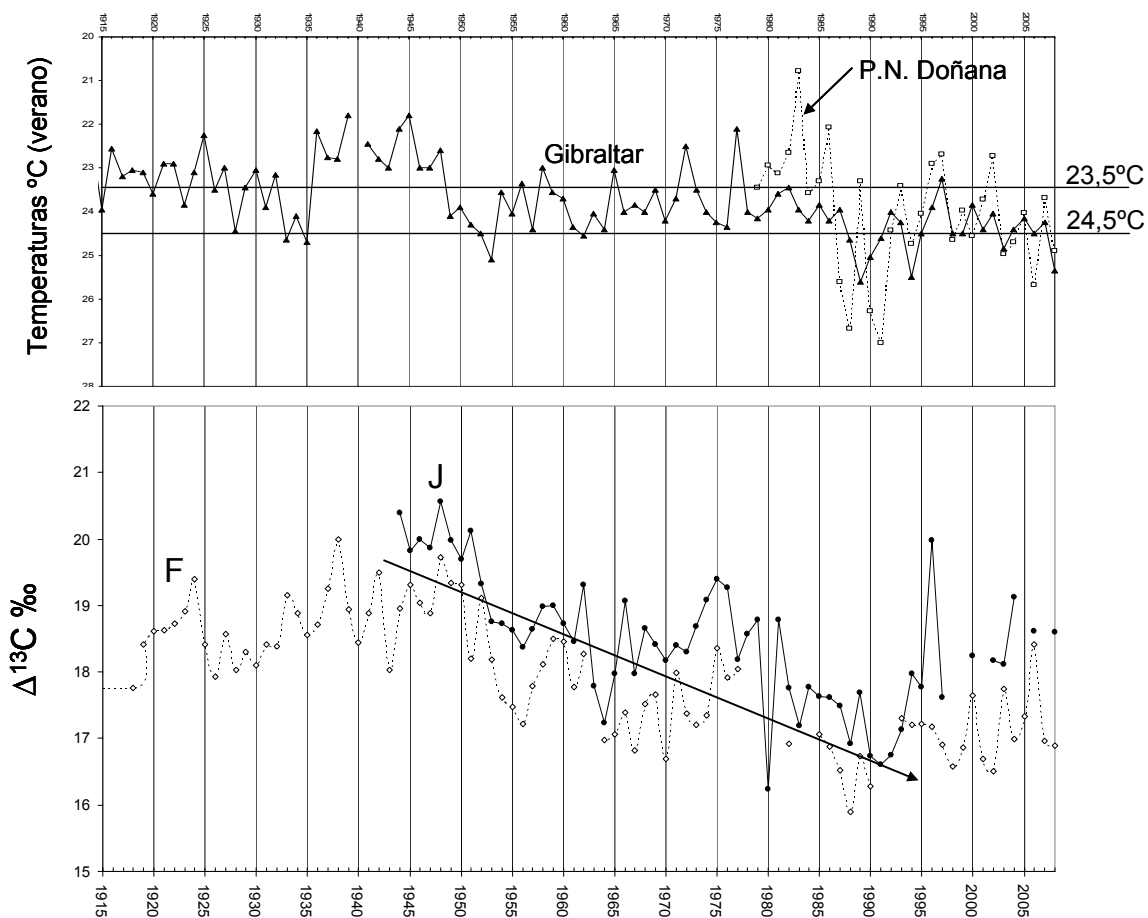


Figura 2. Discriminación isotópica ($\Delta^{13}\text{C}\text{‰}$) en anillos de crecimiento de *Pinus pinea* (J) y *Pinus pinaster* (F). Una vez descontado el efecto de la evolución de la composición isotópica del CO_2 atmosférico (ver Tabla I), se obtiene una tendencia más clara del deterioro en las condiciones de la planta con un paulatino incremento en las condiciones de estrés (disminución del fraccionamiento isotópico). En la parte superior de la figura se representa la temperatura media de los meses de verano (Julio-Agosto) en el P.N. de Doñana y en Gibraltar. Nótese que la temperatura esta representada en orden inverso para que pueda correlacionarse visualmente con la disminución de fraccionamiento isotópico.

Los datos de discriminación isotópica ($\Delta^{13}\text{C}$) indican un incremento paulatino en la condiciones de estrés desde el inicio de los años 50 hasta el año 1995. Este deterioro se inicia justo después de un período de unos 15 años que se inició en 1934 de veranos con temperaturas algo más suaves. El extremo opuesto ocurre entre los años 1987 y 1995 en los que se producen máximos en la temperatura media veraniega, lo que se traduce en una disminución de la discriminación isotópica debido al incremento de estrés de las plantas (Fig. 2). Durante los últimos 13 años las condiciones para la plantas han mejorado ligeramente o se han estabilizado. Este efecto puede estar relacionado con un cambio hacia un ambiente de temperaturas veraniegas algo más suaves y al incremento de la pluviometría (Fig. 1 y 2).

Esta tendencia hacia una disminución de la discriminación isotópica ($\Delta^{13}\text{C}\text{‰}$) desde el año 50 hasta 1995 parece estar relacionada con los procesos de Calentamiento Global, que en esta zona se está manifestando con un incremento de las temperaturas durante los meses de julio y agosto. A esto se le suma un ligero cambio en el régimen de las precipitaciones, con lluvias más escasas en primavera y verano que harían sufrir más a la masa arbórea. Otra posible explicación sería el cambio de uso del suelo en el entorno del P.N de Doñana: a partir de los

40 con un incremento de las plantaciones de arroz después de la guerra civil, repoblaciones con eucaliptos en los años 50 o la declaración de interés nacional el Plan de riego Almonte–Marismas en 1972 lo que ha derivado en un incremento en la explotación de las aguas del acuífero.

Resulta interesante destacar que incrementos en la precipitación después de años “normales” no producen un gran incremento en el fraccionamiento isotópico. Por ejemplo, el incremento de la precipitación del inicio de los años 60 apenas queda marcado. Sin embargo, sí se observa un cambio marcado en los años 75 y 76 que estuvieron precedidos de años más secos de lo normal. Un efecto similar se observa en el 1996 que estuvo precedido de los años de sequía de 1992-1995.

Este aumento de temperatura de las últimas décadas unido al aumento de CO₂ atmosférico y a la irregularidad del régimen pluviométrico, parece haber provocado una mayor eficiencia en el uso del agua (WUE) relacionada con unas condiciones que en general están siendo más adversas por lo que las plantas están usando más frecuentemente este mecanismo de defensa.

4. Conclusiones

El estudio isotópico de anillos de crecimiento en especies de pino procedentes del P.N de Doñana nos ha permitido establecer las siguientes conclusiones que son también válidas para otras áreas del Sur de la Península Ibérica :

1. El estudio de los isótopos estables y en particular de $\delta^{13}\text{C}$ ha resultado ser una herramienta válida para estudios paleoclimáticos en ambientes con regímenes pluviométricos irregulares como son los del sur de la Península Ibérica. La mayor ventaja de los isótopos estables en dendroclimatología es la capacidad que tienen estos para integrar con una precisión anual las variables climáticas de una región concreta, lo que se ha confirmado con datos del Parque Nacional de Doñana.
2. En áreas del Sur de la Península el factor limitante es la pluviometría lo que implica una mayor eficiencia del uso del agua (WUE) por parte de las especies estudiadas, lo que se traduce en una buena correlación entre los valores menos negativos de $\delta^{13}\text{C}$ con los años de menor pluviometría y al contrario, en los años más lluviosos los valores de $\delta^{13}\text{C}$ son más negativos.
3. Pluviometría y temperaturas durante el verano explican la mayor parte de los cambios en la discriminación isotópica de las dos individuos
4. Es necesario seleccionar muy bien los individuos a estudiar ya que unos son más sensibles que otros a los cambios ambientales. Posiblemente en relación a la profundidad a que se encuentre el nivel freático y al tipo de suelo. En relación a estos aspectos, puede ocurrir cierta deriva en la señal isotópica uno o dos años lo que puede enmascarar años aislados secos.
5. La comparación de valores isotópicos de diferentes décadas resulta necesario corregir los efectos relacionados con los incrementos en la concentración de CO₂ en la atmósfera y la evolución de su valor isotópico.
6. Desde el año 1950 se observan un incremento en las condiciones de estrés en la cobertura vegetal del P. N. de Doñana lo que se ha traducido en un incremento del WUE. Este incremento en las condiciones adversas está relacionado con incrementos

de las temperaturas de los meses estivales, irregularidad de las precipitaciones con una disminución de las precipitaciones en los meses de primavera y verano.

5. Agradecimientos

El equipo de seguimiento y en general todo el personal de la Reserva Biológica de Doñana nos ha facilitado siempre la labor en los diferentes muestreos realizados en el PN de Doñana. Estamos especialmente agradecidos a Fernando Hiraldo (Director de la Estación Biológica de Doñana, CSIC) y a David Paz (equipo de seguimiento de la RBD) por sus orientaciones a la hora de seleccionar diferentes ambientes de muestreo y a localizar discos de las diferentes labores de aclareo que se han desarrollado en el parque. Este estudio ha sido financiado por los proyectos “Huellas isotópicas del cambio global en Andalucía” proyecto de excelencia de la Junta de Andalucía Ref: P06-RNM-02362 y “Biogeoquímica de isótopos estables (D/H, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$) en el P.N. de Doñana” financiado por el M.M. Ambiente, convocatoria Parques Nacionales. Ref: 107/2003.

6. Referencias

- Anderson, W.T., et al., Bernasconi, S. M., McKenzie, J.A., Saurer, M., 1998. Journal of Geophysical Research Atmospheres. 625-636
- Brendel, O., Ianneta, P.P.M., Steward, D., 2000. Phytochemical Analysis 11. 7-10
- Craig, H., 1953. Geochimica et Cosmochimica Acta 3, 53-92.
- Custodio, E., Dolz, J. Manzano, M., 2005. Fund. Doñana 21. 190pp
- Edwards, Thomas W.D.y Fritz, P., 1986. Applied Geochemistry 103. 715-723
- Enting, I.G., 1987. Journal of Geophysical Research Atmospheres 92. 10,977-10,984
- Equipo de Seguimiento del P.N. de Doñana. (<http://www-rbd.ebd.csic.es/Seguimiento/mediofisico.htm>)
- Farquhar, G.D., O’Leary, M.H.,Berry, J.A., 1982. Australian Journal of Plant Phisyology 9. 121-137.
- Farquhar G.D., Ehleringer, J.R., Hubick, K.T., 1989. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology 40. 503-537.
- Fischer, Hubertus; Wahlen, Martin; Smith, Jesse; Mastroianni, Derek; Deck, Bruce 1999. Science 1712-1714
- Francey, R.J., Manning, M.R., Allison, C.E., Coram, S.A., Etheridge, D.M., Langenfelds, R.L., Lowe, D.C.y Steele, L.P. 1999. Journal of Geophysical Research Atmospheres 104. 23,631-23,643.
- Friedli, H., Lotscher, H., Oeschger, H., Siegenthaler, U. y Stauffer, B., 1986. Nature 324. 237-238
- Holmes, R.L., 1983. Tree ring bulletin 43. 69-78
- KNMI (Royal Netherlands Meteorological Institute)2009, Monthly precipitation and monthly temperature Gibraltar station. <http://climexp.knmi.nl/getstations.cgi> <http://climexp.knmi.nl/getstations.cgi>
- Leuenberger, Markus; Siegenthaler, Ulrich; Langway, Chester 1992. Nature 357. 488-490
- Loader NJ, Switsur VR. 1995. Botanical Journal of Scotland 48(1):65–78
- Smith, H.J., Wahlen, M., Mastroianni, D.,Taylor, K.C., 1997. Geophysical Research Letter. 1-4
- Stokes, M. y Smiley, T., 1968. The University of Chicago Press. 1-120
- Treydte, Kerstin S., 2006. Nature 440. 1179-1182
- Urey, Harold Clayton, 1947. Journal of the Chemical Society. 562-581.
- Yamaguchi, David K., 1991. Canadian Journal of Forest Research 21. 414-416.