

TESTEMUÑO ISOTÓPICO (^{13}C) DO CAMBIO GLOBAL EN GALICIA

A. Cabaneiro e I. Fernández

Instituto de Investigacións Agrobiolóxicas de Galicia (CSIC)
Av. Vigo s/n, Campus Universitario Sur. 15705 Santiago de Compostela.
Correo_e: acabaneiro@iiag.csic.es, ifernandez@iiag.csic.es

RESUMO

Paralelamente ao aumento das emisións globais de CO_2 , a concentración do isótopo estable ^{13}C na atmosfera diminuíu a nivel mundial 1,5‰ nos últimos 200 anos e mesmo durante a segunda metade do século XX tanto as medidas directas como as procedentes de rexistros dendrocronolóxicos mostraron unha aceleración desta tendencia, cunha diminución anual do ^{13}C atmosférico de 0,02‰, debido principalmente a un aumento das emisións de gases orixinados pola queima de combustíbles fósiles empobrecidos neste isótopo. Nos ecosistemas forestais, o CO_2 ambiental fixado durante a fotosíntese e finalmente retido na madeira das árbores proporciona unha axeitada pegada isotópica da composición atmosférica do momento de formación dos aneis de crecemento arbóreo, polo que os valores da relación $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ das series dendrolóxicas poden ser considerados como unha ferramenta idónea para desvelar a composición atmosférica de tempos pasados. A discriminación do isótopo estable ^{13}C , que ten lugar durante o proceso fotosintético, vén determinada en certa medida polas distintas velocidades de difusión do $^{13}\text{C}\text{-CO}_2$ e do $^{12}\text{C}\text{-CO}_2$ a través dos estomas, pero principalmente polas diferenzas na cinética das reaccións enzimáticas implicadas na súa fixación bioquímica, determinando a combinación destes dous factores a marca isotópica característica de cada especie. Non obstante, a variabilidade isotópica natural entre exemplares arbóreos da mesma especie, incluso para árbores que crecen en condicións moi parecidas, frustra a miúdo a correcta interpretación dendrolóxica dos cambios atmosféricos do ^{13}C a escalas de tempo curtas. Co fin de obter evidencias isotópicas rexionais do cambio global, analizáronse aneis de crecemento de coníferas procedentes de diversos e contrastados ecosistemas do noroeste de España para determinar os cambios no $\delta^{13}\text{C}$ acontecidos durante o último cuarto de século. Múltiples estudos diferenciais árbore a árbore e a expresión do contido isotópico como a variación con respecto á composición dos aneis formados 25 anos atrás permitiron a minimización das perturbacións debidas á variabilidade arbórea interindividual, así como a estandarización interespecífica dos datos. Esta forma de abordar as investigacións isotópicas amplía considerablemente a eficacia da dendrocronoloxía en estudos climáticos ao evitar a influencia dos factores locais e ecolóxicos, proporcionando un reflexo máis fiable da evolución do ^{13}C atmosférico. Deste modo, a partir do estudo isotópico dos aneis de crecemento arbóreo en bosques galegos, demostrouse a existencia dunha diminución real na relación $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ atmosférica, o que nos ofrece, en Galicia e a comezos do século XXI, unha clara evidencia do cambio global.

SUMMARY

Parallel to the increase of global CO_2 emissions, the worldwide ^{13}C concentration in the atmosphere has decreased over the last 200 years by 1.5‰ and during the second half of the 20th century, both direct measurements and dendrochronological records showed a sharper ^{13}C decline in the atmosphere of about 0.02‰ per year, mainly ascribed to increased gaseous emissions from the combustion of fossil fuels, usually depleted in this isotope. In forest ecosystems, ambient $\text{CO}_2\text{-C}$ fixed during photosynthesis remains within the growing tree-ring tissues, providing a proper chronological fingerprint of the momentary atmospheric composition and the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio in dendrological series can be considered as a powerful tool for remote atmospheric reconstruction. Discrimination of the stable carbon isotope ^{13}C , that occurs during photosynthetic processes, is associated with differences in $^{13}\text{C}\text{-CO}_2$ and $^{12}\text{C}\text{-CO}_2$ stomatal diffusion and especially with

differences in the enzymatic reaction kinetics involved in their biochemical fixation, determining the combination of both factors the characteristic isotopic fingerprint of each tree species. However, natural isotopic variability among individual trees of the same species, even under very similar growing conditions, often frustrates the accurate dendrological interpretation of ^{13}C atmospheric changes in short time-scales. In order to obtain regional isotopic evidences of the global change we monitored $\delta^{13}\text{C}$ shifts in coniferous growing-rings from diverse contrasting ecosystems of the NW of Spain during the last quarter of century. Multiple tree-by-tree differential studies that expressed $\delta^{13}\text{C}$ shifts as 5-year increments in comparison to the isotopic composition of its own five-year-growing-rings formed 25 years ago were carried out to minimize disturbances caused by interindividual tree variability and to allow for interspecific data standardisation. This particular approach for isotopic data management can considerably improve dendrochronological techniques for climatic studies by avoiding influences of local and ecological factors and by providing indirect but highly trustworthy reflections of the atmospheric ^{13}C evolution. Our isotopic results of growing tree-rings from Galician forests demonstrate the existence of a real decrease in the atmospheric $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio, constituting clear evidence of global change in Galicia at the beginning of the 21st century.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. O ciclo do carbono e o cambio climático

A principal causa do cambio climático global é a crecente concentración de gases de efecto invernadoiro na atmosfera, maioritariamente como consecuencia da utilización de combustibles de orixe fósil. Desde o inicio da era industrial, as emisións antropoxénicas derivadas do uso de enerxías procedentes de fontes fósiles (petróleo, carbón, gas, etc.) incrementaron considerablemente a concentración do aire en CO_2 , gas responsable do 71,5% do efecto invernadoiro (Lashof, 1990), sendo este incremento superior ao 20% nos últimos 50 anos. Numerosas medidas directas e indirectas confirman que a concentración atmosférica de CO_2 aumentou globalmente ao redor de 100 ppm nos últimos 250 anos, pasando das 280 ppm na era preindustrial ás 380 ppm na época actual. Nas últimas décadas o incremento da concentración de CO_2 no aire foi por termo medio de 1,5 ppm/ano (figura 1), o que supón aproximadamente un aumento dun 0,5% anual. Houghton (1996) predí que as emisións de CO_2 á atmosfera poderían aumentar desde 7,4 xigatoneladas de carbono anuais en 1997 a aproximadamente 26 xigatoneladas de carbono anuais en 2100.

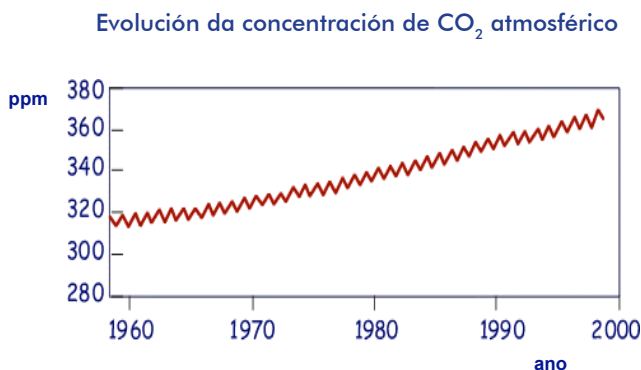


Figura 1. Evolución da concentración do CO_2 atmosférico a partir de medicións realizadas por Charles D. Keeling en Mauna Loa (Hawaii). Fonte: A. Uriarte Cantolla; Historia del clima de la Tierra, 2003.



Na actualidade, considerando as emisións das diversas fontes de CO_2 e as absorcións polos sumidoiros naturais (ecosistemas terrestres e oceánicos), o balance neto de emisións á atmosfera alcanza as 3 xigatoneladas de carbono anuais. Isto incrementou o efecto invernadoiro, provocando que desde o inicio da era industrial a temperatura media da atmosfera terrestre aumentase da orde de $0,7^\circ\text{C}$ e, aínda que os efectos do incremento de CO_2 no funcionamento dos ecosistemas é incerto, moitos científicos afirman que dobrar as concentracións atmosféricas de CO_2 podería ter serias consecuencias ambientais (Barnett, 1987; Lindzen, 1994; Santer, 1995; Adams, 1999), con efectos negativos, tanto biolóxicos como económicos e sociais.

Os ecosistemas terrestres representan un papel importante e dinámico no ciclo global do carbono, contribuíndo en boa medida á absorción do CO_2 atmosférico. Desde o punto de vista forestal, o secuestro de carbono pode ser considerado como un mecanismo de captura e almacenamento seguro do carbono da atmosfera, actuando como unha contraparte potencial, natural e axeitada para o balance do carbono na natureza. Para coñecer e cuantificar a contribución dos bosques á mitigación do cambio climático, é necesario expresar a súa achega en termos de fixación de carbono en relación coa composición atmosférica e co papel que o CO_2 representa no efecto invernadoiro. Algunhas evidencias sinalan que os bosques mundiais son capaces de secuestrar polo menos o 25% das emisións de dióxido de carbono procedentes da utilización de combustibles fósiles, mentres que a deforestación é responsable da emisión de arredor de 1,8 xigatoneladas de carbono anuais. Polo tanto, o adecuado manexo das reservas de carbono terrestre a grande escala pode ser unha compoñente esencial na estratexia internacional contra o cambio climático. Así, o protocolo de Kyoto, ademais de recomendar a diminución das dúas principais fontes de emisión, a queima de combustibles fósiles e os cambios de uso de terras boscosas en agrícolas, aconsella a busca de políticas e actuacións ambientais encamiñadas a incrementar os niveis de captura e fixación, a curto e medio prazo, de gases con efecto invernadoiro, fundamentalmente CO_2 (Montero, 2002).

Dentro dos ecosistemas terrestres, tanto a vexetación como a edafosfera inflúen significativamente no ciclo global do carbono, contribuíndo en gran medida á absorción do CO_2 atmosférico. Aínda que na actualidade os bosques non poden fixar todo o CO_2 emitido á atmosfera, estímase que, combinando estratexias selvícolas de apoio á xestión sustentable con programas de conservación de sistemas forestais e repoboación, os bosques poderían resultar un sumidoiro de carbono importante durante os próximos 100 anos, permitindo reducir as emisións netas de CO_2 á atmosfera nun 50% (IPCC 1995).

1.2. Isótopos do carbono no estudo dos ecosistemas terrestres

Existen tres isótopos naturais do carbono, un radioactivo e dous estables, que se presentan en moi diferente proporción na natureza (figura 2) e todos eles foron amplamente utilizados en investigacións relacionadas co ciclo do carbono en ecosistemas terrestres.

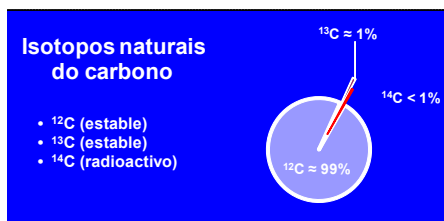


Figura 2. Proporción dos distintos isótopos do carbono na natureza.

O ^{14}C , radioactivo e cunha vida media de 5.730 anos, empregase non só para a datación de diferentes espécimes debido á súa presenza en todos os materiais orgánicos senón tamén para estudos bioxeoquímicos en distintas disciplinas medioambientais (Cabaneiro, 1987; Magid, 2002).

Os isótopos estables do carbono proporcionan en distintos campos da investigación unha visión integrada e cuantitativa das transformacións químicas, biolóxicas e ecolóxicas (Boutton, 1998; Fernández, 2006a, Griffiths, 1999) e é coñecido que durante cada transformación química a concentración de ^{13}C sofre certas variacións (Fernández, 2003a, 2003b), polo que a posibilidade de utilizar a espectrometría de masas isotópica para a análise deste isótopo estable pesado (figura 3) permite, en estudos de materia orgánica, trazar e cuantificar os fluxos de carbono nunha gran variedade de ecosistemas (Bernoux, 1998; Bird, 1997; Ehleringer, 2000; Fernández, 2006b; Mary, 1992).



Figura 3. Espectrómetro de masas isotópico Finnigan MAT Delta-C con analizador elemental automático CN integrado.

Na actualidade, dada a precisión das técnicas isotópicas, a utilización do ^{13}C a niveis de abundancia natural proporciona unha ferramenta de grande eficacia en investigacións ambientais e o estudo das variacións da relación $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ é cada vez máis utilizado para o seguimento de distintos procesos e transformacións que teñen lugar nos ecosistemas forestais, como son a fixación por fotosíntese do CO_2 atmosférico, a descomposición de restos vexetais complexos, a formación de solo, etc. (Araujo, 2007; Fernández, 2003, 2005, 2006a, 2006b; Schleser, 1999), permitindo así a pronta detección de cambios ecolóxicos.

Como consecuencia das grandes cantidades de CO_2 antropoxénico que están sendo liberadas á atmosfera desde a Revolución Industrial, procedentes da combustión de derivados do petróleo (cun baixo contido en ^{13}C), a riqueza isotópica da atmosfera en ^{13}C está a descender de maneira progresiva, moi especialmente durante as últimas décadas (figura 4).



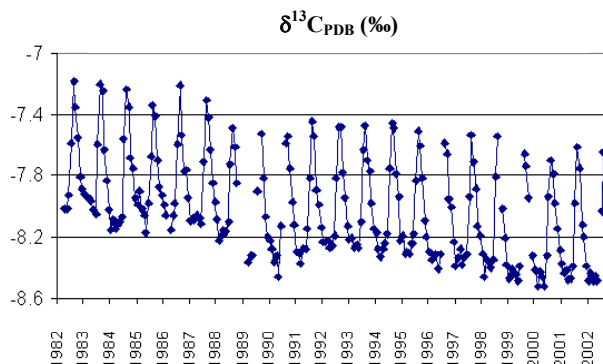


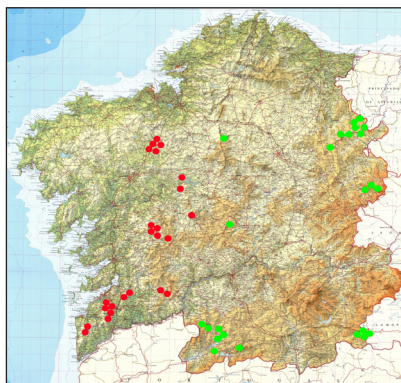
Figura 4. Datos da relación isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ do CO_2 atmosférico procedentes da estación SIO (*Scripps Institution of Oceanography*) de Point Barrow, Alaska.

Fonte: C. D. Keeling, A. F. Bollenbacher e T. P. Whorf en <http://cdiac.ornl.gov/trends/co2/iso-sio/iso-sio.html>

Como consecuencia das reaccións químicas e enzimáticas que teñen lugar durante a fotosíntese nas que se converte CO_2 atmosférico e H_2O en materia orgánica por medio da radiación solar, as plantas seleccionan preferentemente o isótopo lixeiro do carbono (^{12}C vs. ^{13}C) dando lugar a unha discriminación isotópica do ^{13}C no material vexetal formado (Körner, 1991; Conte, 2002; Lai, 2004; Suits, 2005). No caso das árbores, parte do CO_2 atmosférico atrapado durante a actividade fotosintética queda depositado nos aneis de crecemento, proporcionando unha instantánea da composición atmosférica do momento en que se formaron. Así, se a relación $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ no CO_2 atmosférico aumenta ou diminúe, o mesmo acontecerá coa relación $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ nos aneis da árbore. Esta capacidade das árbores para rexistrar as variacións isotópicas da atmosfera permite utilizar os seus aneis non só para a reconstrución de series isotópicas de ^{13}C que reflectan as flutuacións e variacións atmosféricas locais (Dongarra, 2002), senón tamén como un indicador de alta sensibilidade do cambio global (Leavitt, 1994; February, 1999; Zhao, 2006; Zhang, 2007; Pazdur, 2007).

2. DISTRIBUCIÓN ISOTÓPICA $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ EN BOSQUES GALEGOS DE *PINUS PINASTER* AIT. E *PINUS SYLVESTRIS* L.

En estudos levados a cabo en Galicia sobre bosques de coníferas de dúas especies diferentes (*P. pinaster* Ait. e *P. sylvestris* L.), o uso de técnicas isotópicas a niveis de abundancia natural en distintos compartimentos do ecosistema permitiu comparar detalladamente os mecanismos implicados na captura do CO_2 atmosférico e puxo de manifesto a existencia dun patrón similar de distribución isotópica nestes ecosistemas forestais, a pesar das diferenzas atopadas na riqueza isotópica de ambas as dúas especies.



P. pinaster *P. sylvestris*

Figura 5. Localización xeográfica dos bosques de *P. pinaster* e *P. sylvestris* estudados en Galicia.

Dado que existen evidencias de que a selectividade isotópica dunha árbore durante a fixación fotosintética do CO_2 atmosférico pode verse influída por factores fisiolóxicos e/ou edafolóxicos (Freyer, 1979; Leavitt, 1987) como a idade da plantación ou o tipo de rocha madre, para estes estudos utilizouse un elevado número de bosques elixidos de forma que a axeitada representación dos distintos factores locais permitise a xeneralización dos resultados a escala rexional. En toda Galicia un total de 48 piñeirais (figura 5) foron seleccionados co fin de determinar a abundancia natural do isótopo ^{13}C nos distintos compartimentos do ecosistema (vexetación e edafosfera) seguindo os criterios descritos a continuación (figura 6):

- Especie arbórea
- Rocha madre
- Idade da plantación forestal
- Calidade da masa arbórea determinada polo índice de sitio (I.S.)

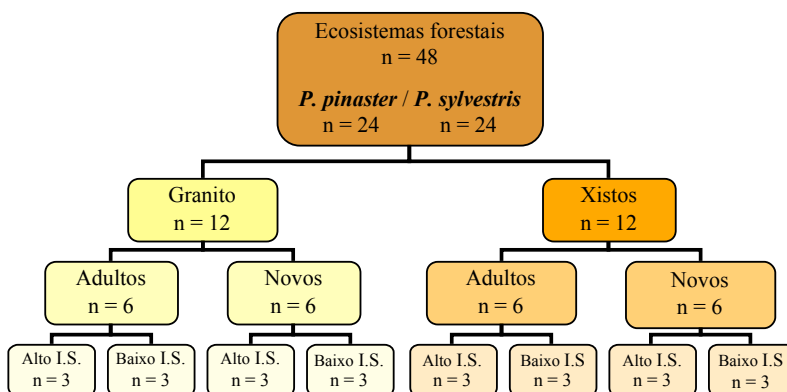


Figura 6. Diagrama do deseño experimental e criterios utilizados na selección das parcelas: rocha madre, idade da plantación e índice de sitio (I.S.) da masa forestal.

As análises estatísticas das diferenzas atopadas na composición isotópica ^{13}C da madeira entre as 2 especies estudadas (figura 7) indican que os valores medios de $\delta^{13}\text{C}$ para *P. pinaster* son significativamente menores que os observados para *P. sylvestris* (ANOVA, $P < 0,001$, $n = 24$). A



maior riqueza en ^{13}C dos bosques de *P. sylvestris*, especie restrinxida en Galicia a altitudes superiores aos 800 m sobre o nivel do mar, concorda co feito recoñecido de que plantas desenvolvidas a maior altitude exhiben unha menor discriminación isotópica do ^{13}C atmosférico en comparación con plantas desenvolvidas a unha altitude menor (Hultine, 2000; Sparks, 1997). Isto pode ser debido a pequenas diferenzas entre procesos anabólicos e catabólicos (relación fotosíntese/respiración) xeradas pola combinación de parámetros climáticos e edáficos fortemente determinados pola altitude.

A figura 7 mostra que a diferenciación isotópica entre ambas as dúas especies arbóreas é máis evidente nos espécimes procedentes de parcelas cun alto índice de sitio, é dicir, cunha maior calidade da masa arbórea, que nas árbores de menor calidade, probablemente debido a que as parcelas de *P. pinaster* cun baixo índice de sitio se localizan xeralmente a maior altitude, onde, tal como sinalamos anteriormente, a vexetación adoita realizar unha menor discriminación isotópica, mentres que as de maior calidade da mesma especie se atopan máis próximas ao nivel do mar.

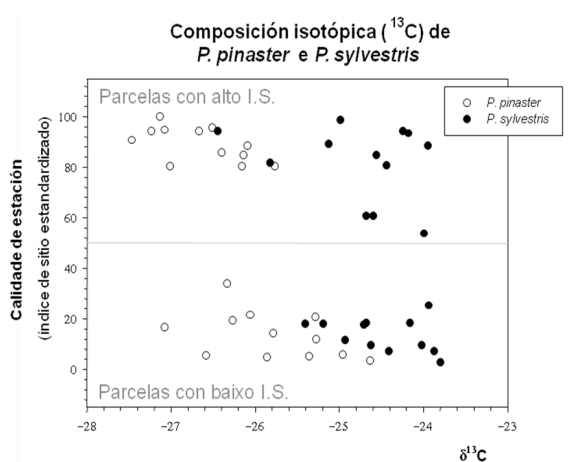


Figura 7. Distribución dos valores medios da composición isotópica da madeira de *P. pinaster* e *P. sylvestris*.

Diferenzas na composición isotópica entre ambas as dúas especies aparecen tamén analogamente reflectidas no contido en ^{13}C da materia orgánica do solo, tal como se deduce da forte correlación existente entre os valores isotópicos presentados pola árbore e o solo subxacente (figura 8).

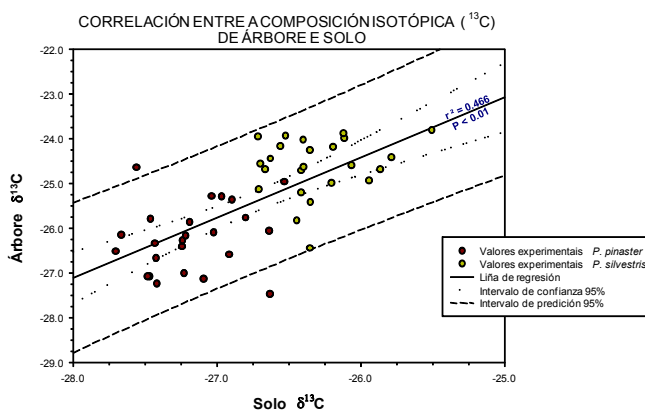


Figura 8. Relación entre os valores de $\delta^{13}\text{C}$ do solo e da árbore en bosques de *P. pinaster* e *P. sylvestris*.

Ao considerar de forma global as distintas compoñentes de cada un dos ecosistemas estudados, póñense claramente de manifesto as diversas interaccións existentes no sistema solo-árbore, tal como pode observarse no esquema incluído a continuación (figura 9).

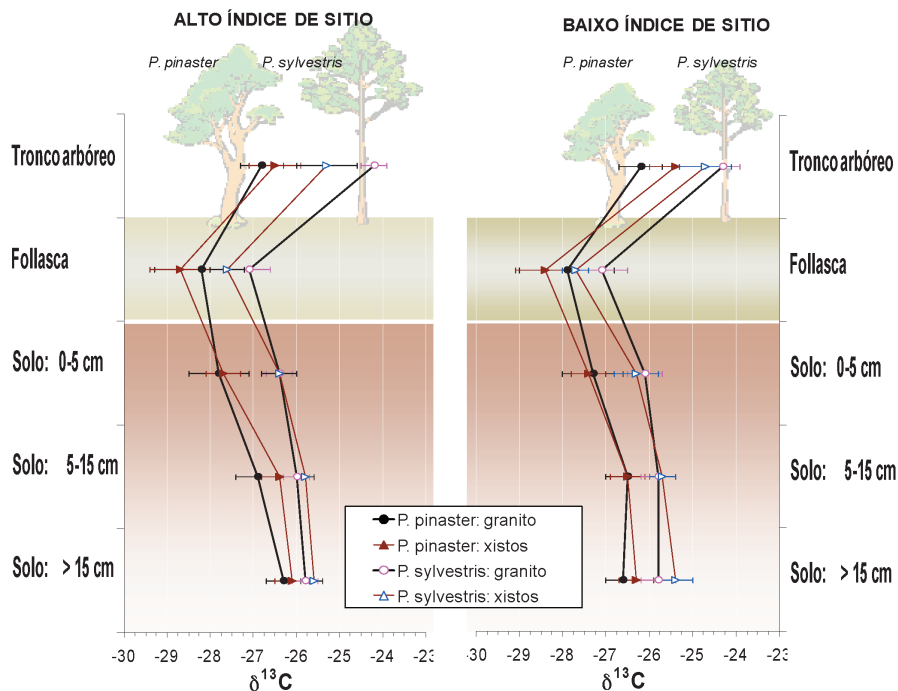


Figura 9. Composición isotópica (^{13}C) en ecosistemas forestais galegos de *P. pinaster* e *P. sylvestris* con alto e baixo índice de sitio.

En canto á distribución do ^{13}C ao longo do perfil edáfico, a follasca está normalmente empobrecida en algo máis dun 2‰ con respecto á árbore (2,1‰ para *P. pinaster* e 2,8‰ para *P. sylvestris*), presentando a composición isotópica da follasca de ambas as dúas especies unha maior semellanza entre si que a exhibida pola madeira das árbores vivas. Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ presentados polo solo, nestes ecosistemas, atópanse dentro dos rangos habitualmente publicados para solos desenvolvidos baixo unha vexetación de tipo C_3 (Spaccini, 2000; Yoneyama, 2006). Observouse, ademais, nos dous ecosistemas un notable enriquecemento en ^{13}C da materia orgánica do solo en comparación coa follasca, que se acrecenta coa profundidade ao longo do perfil (figura 9), en concordancia con achados publicados por outros autores que sinalan, para distintos ecosistemas naturais, a existencia de certo enriquecemento en ^{13}C como consecuencia da transformación gradual da follasca en materia orgánica edáfica (Van Dam, 1997). Este menor contido en ^{13}C das capas máis superficiais do solo pode estar relacionado tanto coas alteracións isotópicas propias dos procesos microbiolóxicos implicados na biodegradación da materia orgánica como cos cambios na composición isotópica das achegas vexetais incorporadas ao chan, cada vez máis pobres en ^{13}C a consecuencia do progresivo empobrecemento antropoxénico do CO_2 atmosférico neste isótopo.

Esta última hipótese concorda cos valores de $\delta^{13}\text{C}$ das series isotópicas obtidas utilizando os aneis de crecemento arbóreo extraídos mediante unha barrena Pressler da base do tronco de espécimes desenvolvidos en bosques galegos (figura 10).





Figura 10. Extracción das mostras diamétricas de madeira con barrena Pressler para a obtención dos aneis de crecemento arbóreo.

Nos bosques de *P. pinaster*, con curtos períodos de rotación, as idades das plantacións novas elixidas oscilaron entre os 10 e 19 anos e para as plantacións adultas entre os 20 e 24 anos. No caso de *P. sylvestris*, cuns períodos de rotación máis longos, as idades para as plantacións novas oscilaron entre os 19 e 35 anos e para as adultas entre os 42 e 52 anos.

Para ambas as dúas especies, dos valores medios do $\delta^{13}\text{C}$ obtidos a partir das mostras diamétricas de madeira analizadas en intervalos de 5 en 5 aneis (figura 11), dedúcese a influencia do tipo de rocha subxacente, da idade da árbore ou do índice de sitio na composición isotópica, e tamén parece inferirse certa tendencia ao empobrecemento en ^{13}C cara á parte externa do tronco arbóreo onde se atopan os aneis de crecemento de máis recente formación.

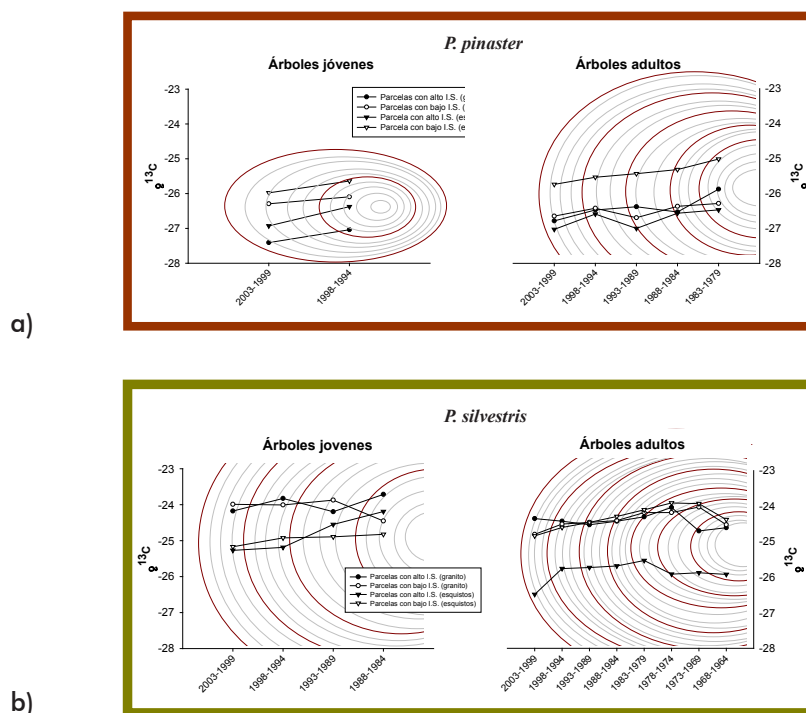


Figura 11. Valores medios de $\delta^{13}\text{C}$ de mostras diamétricas de madeira analizadas a intervalos de 5 aneis de crecemento para árbores novas e adultas de *P. pinaster* (a) e *P. sylvestris* (b).

Esta tendencia á diminución do contido en ^{13}C que se percibe ao longo das últimas décadas nos valores medios da composición isotópica do material vexetal leva a considerar, a pesar das distorsións propias da variabilidade interindividual, a posibilidade de utilizar as árbores como parámetros de avaliación rápidos e sensibles cando se trata de evidenciar o cambio global.

3. EVIDENCIAS ISOTÓPICAS DO CAMBIO GLOBAL EN GALICIA A COMEZOS DO SÉCULO XXI

Series isotópicas completas da relación $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ procedentes de árbores adultas pertencentes a bosques galegos de *P. pinaster* e *P. sylvestris* (figura 12) posibilitaron a obtención de evidencias isotópicas do cambio global en Galicia para o último cuarto de século.

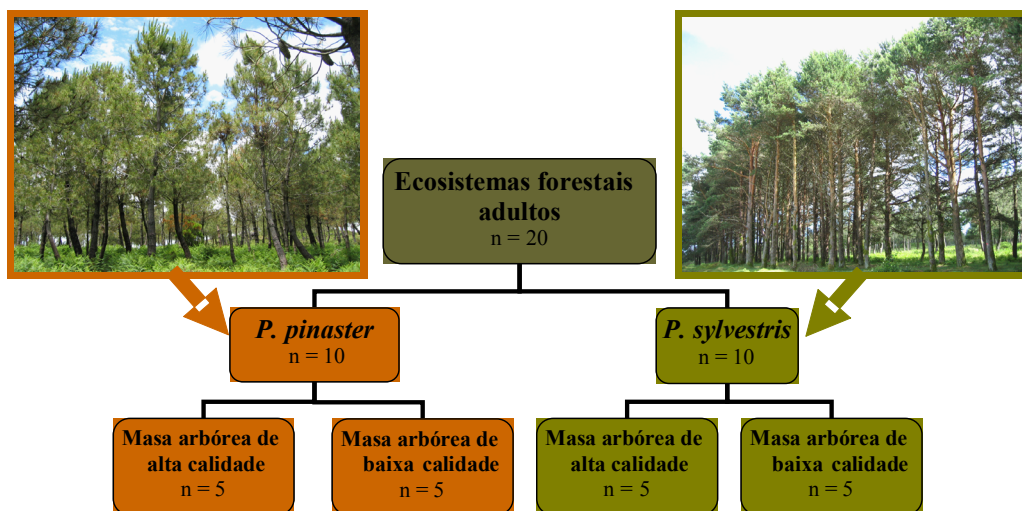


Figura 12. Diagrama cos criterios de selección das masas arbóreas utilizadas para a obtención de series isotópicas temporais da relación $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ en Galicia.

Condições básicas establecidas para a elección das árbores a estudar foron:

- i) que a idade da plantación superase os 25 anos
- ii) que en cada unha das especies estivesen representados un número equivalente de árbores de alta e baixa calidade

Na táboa 1 móstrase a idade e a calidade da plantación forestal seleccionada, o valor medio da concentración isotópica en ^{13}C da serie dendrocronolóxica completa de cada árbore e o dos aneis de crecemento agrupados en intervalos quinquenais desde o ano 1979 a 2003.



Táboa 1. Características das plantacións forestais e composición isotópica ^{13}C dos aneis de crecemento correspondentes aos últimos 25 anos de vida das árbores.

Intervalos quinquenais de aneis de crecemento										
Parcela	idade arbórea (anos)	I.S.	I.S. %	$\delta^{13}\text{C}$ árbore	$\delta^{13}\text{C}$ árbore 1979-1983	$\delta^{13}\text{C}$ árbore 1984-1988	$\delta^{13}\text{C}$ árbore 1989-1993	$\delta^{13}\text{C}$ árbore 1994-1998	$\delta^{13}\text{C}$ árbore 1999-2003	
<i>P. pinaster</i>										
Alta calidade	ORD-5	42	18.7	88.7	-26.10	-26.12	-26.02	-26.93	-26.40	-26.63
	MON-6	30	18.1	85.8	-26.40	-25.73	-26.68	-26.64	-26.99	-27.18
	VIG-1	30	17.9	84.7	-26.14	-25.87	-26.20	-26.09	-26.15	-26.59
	ORD-6	32	17.5	80.5	-27.01	-27.01	-26.88	-27.37	-27.26	-27.99
	ORD-1	42	17.4	80.4	-26.16	-26.28	-26.80	-27.71	-26.12	-26.47
Baixa calidade	MON-5	28	12.4	21.6	-26.06	-25.81	-26.05	-26.09	-26.05	-26.59
	MOU-1	25	11.6	16.9	-27.07	-26.91	-26.64	-27.26	-27.18	-27.38
	FOR-6	45	11.3	14.4	-25.79	-25.63	-26.00	-26.11	-26.21	-26.49
	FOR-4	45	10.4	12.0	-25.28	-24.89	-25.22	-25.62	-25.62	-25.76
	ARZ-2	30	9.5	3.5	-24.64	-24.53	-24.74	-24.58	-24.78	-24.98
<i>P. sylvestris</i>										
Alta calidade	FON-1	51	17.0	98.7	-25.00	-25.11	-24.75	-24.43	-24.60	-25.07
	GUD-5	49	15.8	94.3	-26.44	-26.48	-26.60	-27.01	-26.55	-26.71
	MOT-1	52	15.8	94.3	-24.25	-23.97	-24.02	-24.50	-24.30	-24.19
	FON-2	46	14.2	81.7	-25.82	-25.04	-25.38	-25.61	-25.78	-26.29
	GUD-3	43	12.9	60.8	-24.68	-24.57	-24.59	-24.57	-24.54	-24.89
Baixa calidade	FON-21	45	9.8	25.3	-23.94	-23.55	-23.99	-24.12	-24.39	-24.85
	OUT-1	44	8.9	18.4	-24.17	-24.07	-24.43	-24.39	-24.62	-25.04
	FON-29	44	8.7	18.0	-25.41	-25.23	-25.13	-25.38	-25.48	-25.64
	MUI-1	43	8.6	17.7	-24.71	-24.44	-24.42	-25.28	-24.99	-25.01
	FON-16	44	6.8	7.2	-23.87	-23.53	-23.75	-23.87	-23.93	-24.02

I.S.: Índice de sitio

I.S. %: Índice de sitio estandarizado

Estes datos mostran a existencia dunha considerable variabilidade isotópica entre exemplares individuais, mesmo dentro de cada un dos distintos grupos de parcelas establecidos tras aplicar os criterios de selección, a pesar do cal a diferenza no contido isotópico medio entre ambas as dúas especies arbóreas segue sendo estatisticamente significativa (ANOVA, $P < 0,005$, $n = 10$), aparecendo novamente os espécimes de *P. sylvestris* ($\delta^{13}\text{C} = -24,83 \pm 0,85$) enriquecidos en ^{13}C en comparación cos de *P. pinaster* ($\delta^{13}\text{C} = -26,10 \pm 0,70$).

Co fin de poñer de manifesto a tendencia real da variación temporal da composición isotópica dos aneis de crecemento, resulta necesario minimizar as distorsións debidas á variabilidade interindividual, para o cal convén avaliar cada árbore de forma illada e expresar as variacións isotópicas como incrementos con respecto a un valor de referencia prefixado. Dado que, neste caso, o principal obxectivo é evidenciar os cambios na relación $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ do CO_2 atmosférico durante o último cuarto de século, tomouse como base para o cálculo dos incrementos isotópicos en cada árbore o valor $\delta^{13}\text{C}$ medio dos 5 aneis correspondentes ao primeiro quinquenio estudado (quinquenio 1979-1983), que aparecerá, polo tanto, cun valor igual a cero en todas as gráficas

nas que se atopan representadas estas diferenzas. Por outra banda, a utilización destes incrementos relativos, en lugar dos contidos absolutos en ^{13}C , permite o tratamento estatístico conxunto de ambas as dúas especies de coníferas a pesar da súa distinta riqueza isotópica.

Na representación gráfica da evolución temporal do valor medio dos incrementos da relación $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, calculados de forma individual para cada un dos 20 espécimes arbóreos seleccionados (dos cales 10 corresponden a *P. pinaster* e os outros 10 a *P. sylvestris*), obsérvase claramente a tendencia á diminución progresiva da riqueza en ^{13}C da madeira formada a medida que nos achegamos á época actual, cun breve episodio de estancamento isotópico na década dos noventa (figura 13).

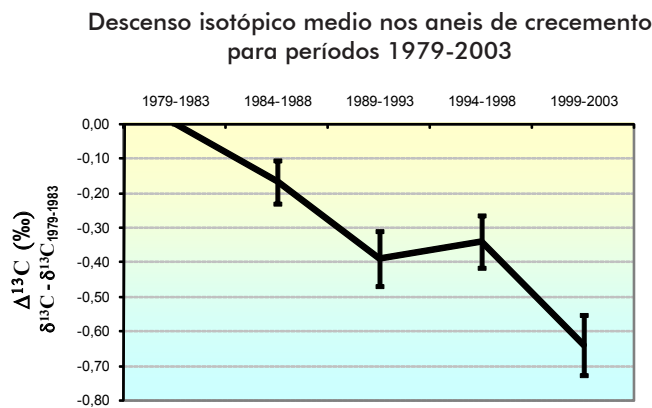


Figura 13. Evolución temporal da variación na composición isotópica quinquenal (^{13}C) dos aneis de crecemento, mostrada pola totalidade dos espécimes analizados de *P. pinaster* e *P. sylvestris*.

As análises de varianza aplicadas aos incrementos quinquenais ($\Delta^{13}\text{C}$) do último cuarto de século para as dúas especies arbóreas estudadas (*P. pinaster* e *P. sylvestris*) consideradas conxuntamente mostraron que os cambios isotópicos foron estatisticamente significativos non só entre os quinquenios 1979-1983 e 1999-2003 (táboa 2), senón tamén entre este último e todos os restantes quinquenios intermedios ($P < 0,005$ co inmediatamente anterior; $P < 0,05$ e $P < 0,001$ cos dous quinquenios anteriores, respectivamente).

Táboa 2. Niveis de significación (P) obtidos ao aplicar unha análise de varianza aos valores de $\Delta^{13}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C}_{1999-2003} - \delta^{13}\text{C}_{1979-1983}$) nas series isotópicas correspondentes aos rexistros dendrocronolóxicos do último cuarto de século para exemplares de *P. pinaster* e *P. sylvestris*.

Especies arbóreas	N.º de casos	$\Delta^{13}\text{C}$ medio	Erro típico	P
<i>P. pinaster</i> + <i>P. sylvestris</i>	20	-0,64	0,09	0,000
<i>P. pinaster</i>	10	-0,71	0,10	0,000
<i>P. sylvestris</i>	10	-0,57	0,14	0,001

O episodio de estabilización isotópica dos aneis arbóreos entre o quinquenio 1989-1993 e o 1994-1998 anteriormente sinalado (figura 2) parece corresponderse no tempo cun descenso das emisións globais de CO_2 á atmosfera (figura 14, liña negra), que algúns autores asocian aos cambios na industria da ex-Unión Soviética producidos pola crise que tivo lugar nese período (Uriarte, 2003). Paralelamente, nesas mesmas datas, a relación $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ atmosférica (figura 14, liña azul) mostrou un máximo parcial (Keeling, 2005) que xustificaría o comportamento anómalo atopado para ese quinquenio nos rexistros dendrocronolóxicos obtidos a partir da composición isotópica dos aneis de crecemento en piñeirais galegos.

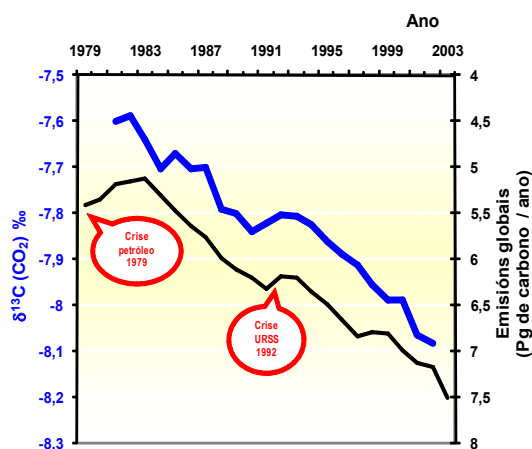


Figura 14. Media anual da relación $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ do CO_2 atmosférico rexistrada en Mauna Loa (en azul) e emisións globais de CO_2 á atmosfera (en negro) procedentes da queima de combustibles fósiles e da industria cementeira, cuxa escala foi invertida para facer visible o paralelismo entre estes dous parámetros.

Ao considerar por separado as dúas especies de piñeiro estudadas (figura 15), confirmouse para cada unha delas a tendencia descendente do contido en ^{13}C dos aneis arbóreos a medida que a súa formación foi máis recente. Aínda que os valores medios dos descensos isotópicos presentados por *P. sylvestris* e *P. pinaster* non foron moi diferentes, esta tendencia parece ser máis acusada no caso deste último.

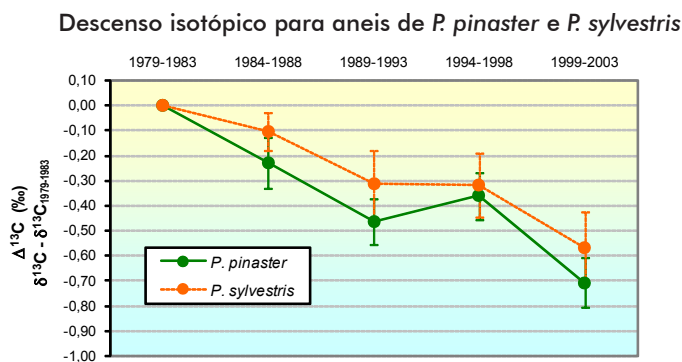


Figura 15. Evolución temporal da variación media na composición isotópica quinquenal (^{13}C) dos aneis de crecemento para *P. pinaster* e *P. sylvestris*.

Dado que, tal como xa se sinalou anteriormente, as condicións fisiolóxicas de crecemento vexetativo inflúen sobre a capacidade de discriminación isotópica durante a fixación fotosintética do CO_2 atmosférico, para cada unha das especies consideráronse tamén independentemente as árbores de alto ou baixo índice de sitio (figura 16), co fin de avaliar, en función da súa calidade, a idoneidade ou sensibilidade dos distintos espécimes como indicadores das variacións isotópicas da atmosfera e establecer polo tanto a súa maior ou menor aptitude como testemuño do cambio global en Galicia.

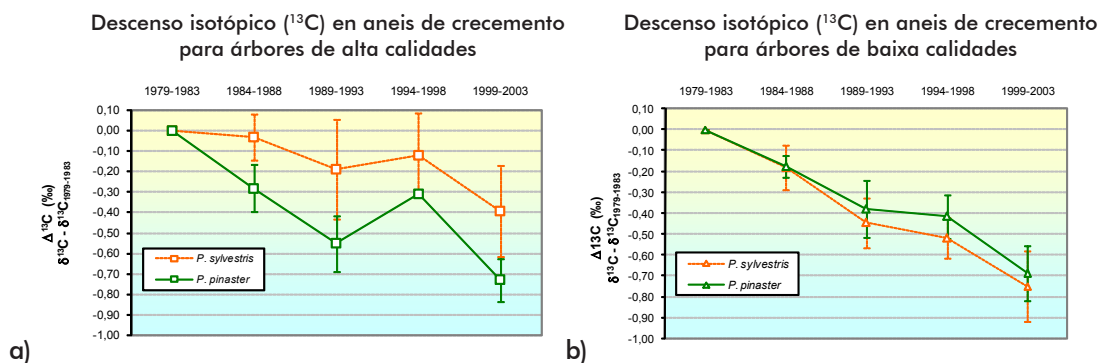


Figura 16. Evolución temporal da variación media na composición isotópica dos aneis de crecemento de árbores de *P. pinaster* e *P. sylvestris* procedentes de parcelas de alta calidade (a) e baixa calidade (b).

Observouse que para *P. sylvestris*, especie restrinxida en Galicia ás zonas de maior altitude, as árbores procedentes de bosques con baixo índice de sitio presentaron un descenso máis acusado no contido en ^{13}C entre os aneis de crecemento formados hai 25 anos e os máis recentes, resultando ser por tanto mellores indicadores dos cambios atmosféricos en comparación cos espécimes correspondentes a rodais de alta calidade, onde os descensos isotópicos encontrados foron menores (figura 16a e 16b, en vermello).

Pola contra, para *P. pinaster*, especie frugal e cunha boa adaptabilidade ás condicións galegas de clima e solo, tanto as árbores procedentes de bosques con alto índice de sitio como as pertencentes a rodais de baixo índice de sitio, resultaron ser bos indicadores deste descenso isotópico na atmosfera, sen apenas diferenzas achacables á calidade da masa arbórea (figura 16a e 16b, en verde).

Estes resultados, que demostran, independentemente da calidade de estación ou a especie de piñeiro considerada, a existencia en Galicia dunha diminución real na relación $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ do CO_2 atmosférico, confirmaron a utilidade das técnicas isotópicas (^{13}C) a niveis de abundancia natural como unha ferramenta de gran precisión para a pronta detección de cambios ecolóxicos e corroboraron as evidencias do cambio global en Galicia durante o último cuarto de século.

Para finalizar, dado que a composición isotópica (^{13}C) dos piñeiros estudados dá claro testemuño de que o cambio global está a afectar xa a Galicia e como as previsións indican que isto persistirá no tempo, a determinación dos seus impactos sobre a capacidade de retención de C propia dos distintos ecosistemas forestais galegos axudaría a evitar no posible actuacións ecoloxicamente inadecuadas e a establecer pautas de xestión forestal dirixidas a paliar o efecto invernadoiro, probablemente un dos retos máis importantes do século XXI.



AGRADECEMENTOS

Estes estudos foron desenvolvidos con financiamento procedente da Xunta de Galicia (PGDIT06PXIB400131PR) e do Ministerio de Ciencia e Innovación (AGL2007-66739-C02-02). Agradecemoslle á Unidade de Xestión Forestal Sustentable (USC) a súa axuda para a selección e determinación da calidade dos bosques e ao Departamento de Bioquímica do Solo (IIAG-CSIC) a súa axuda para a determinación do ^{13}C nun espectrómetro de masas isotópico, parcialmente financiado polo European Regional Development Fund.

BIBLIOGRAFÍA

- Adams R. M., Hurd B. H. and Reilly J. (1999). Agriculture and global climate change: A Review of Impacts to U.S. Agricultural Resources. The Pew Center on Global Climate Change, Arlington, VA.
- Araujo A. C., Ometto J. P. H. B., Dolman A. J., Kruijt B., Waterloo M. J. and Ehleringer J. R. (2007). Implications of CO_2 pooling on $\delta^{13}\text{C}$ of ecosystem respiration and leaves in Amazonian forest. *Biogeosciences Discussions*, **4**, 4459-4503.
- Barnett T. P. and Schlesinger M. E. (1987). Detecting changes in global climate induced by greenhouse gases. *Journal of Geophysical Research* **92**, 14772-14780.
- Bernoux M., Cerri C. C., Neill C. and de Moraes J. F. L. (1998). The use of stable carbon isotopes for estimating soil organic matter turnover rates. *Geoderma*, **82**, 43-58.
- Bird M. I. and Pousai P. (1997). Variations of $\delta^{13}\text{C}$ in the surface soil organic carbon pool. *Global Biogeochemical Cycles*, **11**, 313-322.
- Boutton T. W., Archer S. R., Midwood A. J., Zitzer S. F. and Bol R. (1998). $\delta^{13}\text{C}$ values of soil organic carbon and their use in documenting vegetation change in a subtropical savanna ecosystem. *Geoderma*, **82**, 5-41.
- Cabaneiro A., Choné T. and Andreux F. (1987). The influence of seasonal changes and clay mineral on the biodegradation of ^{14}C - ^{15}N labelled proteinaceous material from *Chlorella pyrenoidosa* in an acidic soil. In: *Current perspectives in environmental biogeochemistry*, G. Giovannozzi-Sermanni and P. Nannipieri (eds.), C.N.R.-I.P.R.A., Roma, pp. 57-74.
- Conte M. H. and Weber J. C. (2002). Plant Biomarkers in aerosols record isotopic discrimination of terrestrial photosynthesis, *Nature* **417**, 639-641.
- Ehleringer J. R., Buchmann N. and Flanagan L. B. (2000). Carbon isotope ratios in belowground carbon cycle processes. *Ecological Applications*, **10**, 412-422.
- February E. C. and Stock W. D. (1999). Declining Trend in the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ Ratio of Atmospheric Carbon Dioxide from Tree Rings of South African *Widdringtonia cedarbergensis*. *Quaternary Research*, **52**, 229-236.
- Fernandez I., Mahieu N. and Cadisch G. (2003a). Carbon isotopic fractionation during decomposition of plant materials of different quality. *Global Biogeochemical Cycles*, **17**, 1075-1085.
- Fernandez I. and Cadisch G. (2003b). Discrimination against ^{13}C during degradation of simple and complex substrates by two white rot fungi. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, **17**, 2614-2620.

- Fernandez I., Cabaneiro A. and González-Prieto S. J. (2004). The use of isotopic tracer (^{13}C) to monitor soil organic matter transformations caused by heating. *Rapid communications in Mass Spectrometry*, **18**, 435-442.
- Fernandez I., González-Prieto S. J. and Cabaneiro A. (2005). ^{13}C -isotopic fingerprint of *Pinus pinaster* Ait. and *Pinus sylvestris* L. wood related to the quality of standing tree mass in forests from NW Spain. *Rapid communications in Mass Spectrometry*, **19**, 3199-3206.
- Fernández I., Cabaneiro A. and González-Prieto S. J. (2006a). Partitioning CO_2 Effluxes from an Atlantic Pine Forest Soil between Endogenous Soil Organic Matter and Recently Incorporated ^{13}C -Enriched Plant Material. *Environmental Science & Technology*, **40**, 2552-2558.
- Fernandez I., Pérez-Ventura L., González-Prieto S. J. and Cabaneiro A. (2006b). Soil $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ as a good indicator for predicting the site index of Galician pine forests (*P. pinaster* Ait. and *P. sylvestris* L.). *Investigacion Agraria. Sistemas y recursos forestales*, **15**, 3-13.
- Freyer H. D. (1979). On the ^{13}C record in tree rings. Part. I ^{13}C variations in northern hemispheric trees during the last 150 years. *Tellus*, **31**, 124-137.
- Griffiths H., Borland A., Gillon J., Harwood K., Maxwell K. and Wilson J. (1999). Stable isotopes reveal exchanges between soil, plants and the atmosphere. In: *Physiological Plant Ecology* M. C. Press, J. D. Scholes and M. G. Barker (eds.), Blackwell Science, pp. 415-441.
- Houghton J. T., Meira Filho L. G., Callander B. A., Harris N., Kattenberg A. and Maskell K. (1996). *Climate change 1995: The Science of Climate Change*. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Hultine K. R. and Marshall J. D. (2000). Altitude trends in conifer leaf morphology and stable carbon isotope composition. *Oecologia*, **123**, 32-40.
- IPCC (1995). *Climate Change 1995: the supplementary report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Keeling, C. D, Bollenbacher, A. F. and Whorf, T. P. (2005). Monthly atmospheric $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotopic ratios for 10 SIO stations. In: *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA.
- Körner Ch., Farquhar G. D. and Wong S. C. (1991). Carbon isotope discrimination by plants follows latitudinal and altitudinal trends. *Oecologia*, **88**, 30-40.
- Lai, Ch., Ehleringer J. R., Tans P., Wofsy S. C., Urbanski S. P. and Hollinger D. Y. (2004). Estimating photosynthetic ^{13}C discrimination in terrestrial CO_2 exchange from canopy to regional scales. *Global Biogeochemical Cycles*, **18**, GB1041, doi:10.1029/2003GB002148.
- Lashof, D. A. and Ahuja, D. R. (1990). Relative Contributions of Greenhouse Gas Emissions to Global Warming. *Nature*, **344**(5), 529-531.
- Leavitt S. W. (1987). Stable-carbon isotopes in tree rings as environmental indicators. In: *The Practical Applications of Trace Elements and Isotopes to Environmental Biochemistry and Mineral Resources Evaluation*, R. W. Hurst, T. E. Davis and S. S. Augustithis (eds.), Theophrastus Publications, Athens, pp. 61-73.



- Leavitt S. W. (1994). South American tree rings show declining $\delta^{13}\text{C}$ trend. *Tellus B* **46**, 152-157.
- Lindzen R. S. (1994). On the scientific basis for global warming scenarios. *Environmental Pollution* **83**, 125-134.
- Magid J., Cadish G. and Giller K. E. (2002). Short and medium term plant litter decomposition in a tropical Ultisol elucidated by physical fractionation in a dual ^{13}C and ^{14}C isotope study. *Soil Biology & Biochemistry*, **34**, 1273-1281.
- Mary B., Mariotti A. and Morel J. L. (1992). Use of ^{13}C variations at natural abundance for studying the biodegradation of root mucilage, roots and glucose in soil. *Soil Biology & Biochemistry*, **24**, 1065-1072.
- Montero G., Alonso A. y Ruiz-Peinado R. (2002). Cuantificación del potencial de las principales especies forestales españolas para el almacenamiento de carbono a medio y largo plazo. *Bosques, sociedad y cambio climático*, Universidad Internacional Menéndez Pelayo, Santander.
- Pazdur A., Nakamura T., Pawelczyk S., Patlyta J., Piostrowska N., Rakowski A., Sensula B. and Szczepanek M. (2007). Carbon Isotopes in Tree Rings: Climate and the Suess Effect Interferences in the Last 400 Years. *Radiocarbon*, **49**, 775-788.
- Santer B. D., Taylor K. E., Wigley T. M. L., Penner J. E., Jones P. D. and Cubasch U. (1995). Towards the detection and attribution of an anthropogenic effect on climate. *Climate Dynamics*, **12**, 77-100.
- Schleser G. H., Frielingsdorf J. and Blair A. (1999). Carbon isotope behaviour in wood and cellulose during artificial aging. *Chemical Geology*, **158**, 121-130.
- Spaccini R, Piccolo A, Haberhauer G and Gerzabek M. H. (2000). Transformation of organic matter from maize residues into labile and humic fractions of three European soils as revealed by C-13 distribution and CPMAS-NMR spectra. *European Journal of Soil Science*, **51**, 583-594.
- Sparks J. and Ehleringer J. R. (1997). Leaf carbon isotope discrimination and nitrogen content for riparian trees along elevational transects. *Oecologia*, **109**, 362-367.
- Suits N. S., Denning A. S., Berry J. A., Still C. J., Kaduk J., Miller J. B. and Baker I. T. (2005). Simulation of carbon isotope discrimination of the terrestrial biosphere. *Global Biogeochemical Cycles*, **19**, GB1017, doi: 10.1029/2003GB002141.
- Uriarte Cantolla A. (2003). *Historia del Clima de la Tierra*. Servizo Central de Publicacións do Goberno Vasco. ISBN: 84-457-2079-1.
- Van Dam D., Veldkamp E. and Van Bremen N. (1997). Soil organic carbon dynamics: variability with depth in forested and deforested soils under pasture in Costa Rica. *Biogeochemistry*, **39**, 343-375.
- Yoneyama T., Okada H., Chongpraditnum P., Ando S., Prasertsak P. and Hirai K. (2006). Effects of vegetation and cultivation on $\delta^{13}\text{C}$ values of soil organic carbon and estimation of its turnover in Asian tropics: A case study in Thailand. *Soil Science Plant Nutrition*, **52**, 95-102.
- Zhang Y., Chen T., An L. and Li Y. (2007). The variations of stable-carbon isotope ratios in *Qilian juniper* in northwestern China. *Environmental Geology*, **52**, 131-136.
- Zhao X. L., Qian J. L., Wang J., He Q. Y., Wang Z. L. and Chen C. Z. (2006). Using a tree ring $\delta^{13}\text{C}$ annual series to reconstruct atmospheric CO_2 concentration over the past 300 years. *Pedosphere*, **16**, 371-379.

