

AGRUPAMIENTO DE FECHADOS RADIOCARBÓNICOS. PROCEDIMIENTO ESTADÍSTICO

ANÍBAL FIGINI, JORGE CARBONARI y ROBERTO HUARTE*

Introducción

La datación radiocarbónica es una metodología científica, frecuentemente empleada por los investigadores del Cuaternario (arqueólogos; antropólogos; geólogos; paleontólogos; etc.), para fechar materiales ubicados en los sitios bajo estudio. Usualmente varios materiales son extraídos en cada sitio o grupos de sitios dentro de una secuencia bien estratificada para realizar determinaciones C-14. Las mismas estiman la edad de muerte (en años C-14) de los materiales y por medio de esta se infiere la edad de las capas ocupacionales o la cronología de eventos culturales o naturales. Pueden realizarse además inferencias estadísticas para conocer si una serie de datos C-14 son o no significativamente diferentes entre sí; agrupar edades C-14 indistinguibles y expresarla como un valor medio con su error; estimar si los cambios culturales fueron lentos o rápidos; o los lapsos del desarrollo de algún fenómeno arqueológico; etc.

La metodología estadística llega a cumplir un papel muchas veces decisivo en la evaluación de los resultados experimentales y en la elaboración de sus conclusiones finales. Para estudiar algunos de los problemas asociados con una serie de determinaciones radiocarbónicas independientes, seguiremos los lineamientos estadísticos dados por Ward and Wilson (1978) y Wilson and Ward (1981).

Realizamos consideraciones sobre la “edad C-14 verdadera” y su determinación experimental; una valoración de las fuentes de error en la determinación C-14; formulamos la hipótesis estadística y recomendamos la técnica para aplicarla a la resolución de ciertos problemas arqueológicos; y efectuamos valoraciones en la diferencia de muestreo y los errores a considerar, así como la dependencia de varios factores sobre el modelo. Se dan ejemplos del uso de estas técnicas estadísticas aplicándolas a diferentes casos prácticos.

Consideraciones para comparar y combinar determinaciones radiocarbónicas

A. Edad Radiocarbónica “verdadera” y su estimación.

La datación radiocarbónica es un método que implica un procedimiento analítico que emplea técnicas químicas y físicas para la medición de la concentración C-14 en un material. El resultado de la edad C-14 y su “error de conteo” o desviación estandar asociada, lo informa el laboratorio, por

* Laboratorio de Tritio y Radiocarbono (LATYR, CIG)-Fac.Ciencias Naturales y Museo, UNLP, Paseo del Bosque s/n°, (1900) La Plata, Argentina, e-mail: afigini@museo.fcnym.unlp.edu.ar

convención como $x_i \pm \sigma_i$; por ejemplo 1400 ± 70 años C-14 BP (Stuiver and Polach, 1977). Como en la medición de cualquier magnitud física (peso; longitud; velocidad; etc.) los valores x_i determinados en la misma muestra serán diferentes debidos a la variabilidad estadística normal (distribución de Gauss) de los mismos.

Podemos suponer que un determinado evento natural tiene una única pero desconocida “edad C-14 verdadera”, R , comúnmente la edad de muerte del organismo. Los valores x_i obtenidos por los laboratorios en un mismo material, Caso I, (ejemplo, fracciones de un mismo hueso largo o de madera de anillos similares) estiman la misma “edad C-14 verdadera”, $R = R_1 = R_2 = \dots = R_n$ (n número de determinaciones).

Si en cambio en un sitio extraemos n materiales diferentes o que no podemos suponer que provienen del mismo material, Caso II, determinando en cada muestra una edad : $x_1 \pm \sigma_1$; $x_2 \pm \sigma_2$; $x_3 \pm \sigma_3$; ... ; $x_n \pm \sigma_n$, donde las mismas estarán asociadas con las “edades C-14 verdaderas” desconocidas: R_1 ; R_2 ; R_3 ; ... ; R_n , con valores, x_i , **significativamente diferentes estadísticamente para cada material analizado.**

B. Errores en la determinación radiocarbónica.

La determinación de la concentración radiocarbónica en una muestra, involucra delicados y complicados procesos químicos y físicos en el procedimiento analítico: pretratamiento; síntesis química y medición de la actividad radiocarbónica en equipos especiales. Los laboratorios informan lo que denominan “errores de conteo” o desviación estándar, $\pm 1\sigma$, asociados únicamente al error de medición de la actividad C-14 en la muestra en el equipo especial. Pero no el error total del procedimiento analítico (= error pretratamiento + error síntesis + error medición). Tampoco incluyen otras fuentes de error, algunos sistemáticos y otros azarosos, en sus mediciones como se han comprobado en los estudios internacionales de comparación de resultados radiocarbónicos que se realizan aproximadamente cada cuatro años a partir de la década de 1980 (ICS, 1982; Scott et al., 1990; 1997; Gulliksen and Scott, 1995; Otlet et al., 1980; Rozanski et al., 1992; Figini et.al, 1999). De acuerdo a la variabilidad de los resultados observados para una misma muestra analizada por diferentes laboratorios, el "error de conteo" ($\pm 1\sigma_i$) informado por los laboratorios con la edad C-14 deberían multiplicarse por un factor entre 2 y 3 (Ashmore et al, 2000). En el análisis estadístico que posteriormente desarrollamos usaremos 2 como factor multiplicador del “error de conteo” donde $2\sigma_i$ contemplará más fehacientemente los errores introducidos fundamentalmente por otras fuentes: errores en el procedimiento analítico total y errores sistemáticos y azarosos en la determinación C-14. Este será el caso para determinaciones en muestras que no pueden suponerse que provienen del mismo objeto o el análisis de muestras de un mismo material pero realizado por dos o más laboratorios. Por el contrario, en los estudios internacionales citados se ha observado que en duplicados de una misma muestra analizadas por un mismo laboratorio la variabilidad de los resultados esta suficientemente reflejada por el “error de conteo” informado por el laboratorio. Únicamente en este caso usaremos el “error de conteo”, ($\pm 1\sigma_i$), sin aplicarle un factor multiplicador para el análisis estadístico que proponemos.

La exactitud de un resultado C-14 puede estar afectado también por otras fuentes de error, que ocasionarían en algunos casos datos fuera del límite estadístico (“outliers”) en la escala radiocarbónica: (a) extraer muestras que no representan el evento que se desea fechar; (b) mala calidad de la muestra elegida para obtener un dato C-14 confiable; (c) el error de muestreo del material utilizado en la datación radiocarbónica (d) el cuidado que se ha tenido en la toma y manejo de la muestra para evitar errores de contaminación con materiales mas “jóvenes” o más “viejos”; (e) el cuidado que haya tenido el laboratorio para realizar el pretratamiento de la muestra para minimizar la contaminación y aislar la fracción de carbono original ; (f) otros factores azarosos no controlables que pueden ocasionarse durante todo el proceso, desde la extracción hasta el momento de la medición de C-14.

Otro factor de error es debido a la variación secular de la concentración de C-14 en el CO₂ atmosférico. Esto implica que años C-14 no son iguales a años calendarios, haciendo necesario la calibración de la escala de tiempo radiocarbónico. Existen actualmente programas de calibración (Stuiver et al., 1993) para muestras del hemisferio norte (University of Whashington, C-14 laboratory, calibration program 3.0.3) que por extensión se usan para el hemisferio sur (Figini, 1999), que permiten transformar años C-14 en años calendarios. El procedimiento de calibración introduce otra fuente de error. Primero se calcula la edad C-14 “media ponderada” de una serie con dos o más datos, con una diferencia indistinguible entre sus valores y posteriormente se calibra. La edad C-14 “media ponderada” calibrada

en años calendarios estima la “verdadera edad de muerte”, θ , en años calendarios BP (desconocida) del material fechado por C-14.

De acuerdo a las consideraciones realizadas respecto a los errores en la determinación radiocarbónica y a un mayor conocimiento de la metodología y sus fuentes de error (Figini et al. 1983) los arqueólogos e investigadores de otras ciencias históricas, han comprendido que una sola determinación C-14 no produce un fechado seguro y confiable. Este análisis sugiere que un dato más seguro puede obtenerse de dos o más determinaciones C-14 (en muestras azarosas) en lugar de dedicarle un mayor tiempo de medición a una misma muestra para lograr disminuir el “error de conteo” y obtener la precisión solicitada. Asimismo, al aumentar el tiempo de uso del equipo de medición implica un arancel adicional que significa un mayor costo para el usuario.

C. Hipótesis estadística.

En la práctica se tienen que tomar decisiones sobre poblaciones, partiendo de la información muestral de las mismas. Tales estudios se denominan decisiones estadísticas. Por ejemplo, se puede desear establecer a partir de datos C-14, provenientes de muestras de un sitio arqueológico o geológico o paleontológico, si estiman o no la misma “edad C-14 verdadera”. Si con la hipótesis se plantea que no hay diferencias entre los datos C-14 en una serie de determinaciones, entonces aquella recibe el nombre de hipótesis nula (H_0). En contraste, si se rechaza H_0 , la hipótesis alternativa, H_1 , plantea que en una serie de determinaciones radiocarbónicas pueden subdividirse en dos o más grupos (con al menos un dato C-14) donde los resultados C-14 que integran cada grupo no son significativamente diferentes entre sí.

Con el análisis estadístico la hipótesis planteada puede ser aceptada o rechazada. Si se rechaza la hipótesis cuando debe ser aceptada, se dice que se comete un error del tipo I. Si, por el contrario, se acepta una hipótesis que debiera ser rechazada, se dice que se comete un error del tipo II. La probabilidad máxima con la que en el ensayo de una hipótesis se puede cometer un error del tipo I se llama nivel de significación del ensayo. Esta probabilidad se denota frecuentemente por α (letra griega alfa), que en la práctica es de 0,05. Esto significa que existe un 5% de probabilidad de rechazarse la hipótesis cuando debiera ser aceptada, es decir se está con un 95% de confianza de que se toma la decisión adecuada.

Para chequear la hipótesis que la serie de n determinaciones C-14 (con una magnitud en los “errores de conteo”, σ_i , aproximadamente similares) estiman todas la misma “edad C-14 verdadera”, R , desconocida, determinamos el estadístico $T_{(1,n)}$. Ver en el apéndice el desarrollo matemático de las fórmulas (1), (2) y (4), para el estadístico $T_{(1,n)}$, la “media ponderada”, x_m , de los n resultados y la desviación estándar, σ_{x_m} , de la “media ponderada”, respectivamente. El estadístico $T_{(1,n)}$ tiene una distribución chi-cuadrado, χ^2 , con $(n-1)$ grados de libertad bajo la hipótesis nula H_0 . Si se acepta la hipótesis nula, H_0 , ($H_0: R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_n = R$) la teoría estadística establece que estos n resultados pueden combinarse en una edad C-14 “media ponderada”, x_m , que estima una misma “edad verdadera”, R , desconocida y tiene una desviación estándar, σ_{x_m} .

Si por el contrario las determinaciones C-14 son juzgadas que son significativamente diferentes (la probabilidad de que no existan diferencias es igual o menor al 5%), se rechaza la hipótesis nula H_0 , entonces las determinaciones C-14 en muestras de un mismo nivel estratigráfico no pueden ser combinadas y promediadas (estiman diferentes “edades C-14 verdaderas”, R_i), sino que necesitan una reconsideración cuidadosa. En algunos casos puede requerir una reinterpretación del contexto geológico y arqueológico y posiblemente adicionales fechados C-14 sobre materiales que presumiblemente están más directamente asociadas al evento cultural en estudio. El empleo de un método estadístico permite en una serie de n determinaciones detectar la presencia de un dato C-14 sustancialmente corrido (“outliers”) a lo esperado, en la distribución del mismo, debido a errores que pudieron cometerse desde la extracción hasta la medición de la muestra. Con una valoración de la información arqueológica el dato C-14 puede eliminarse de la serie. Detectarlos nos permite realizar inferencias más confiables.

Si se rechaza la hipótesis nula, H_0 , podemos agrupar determinaciones que estiman diferentes “edades C-14 verdaderas”, R_i , desconocidas. Primero, uno debe hacer una tabla con las n determinaciones en un orden creciente con respecto a las edades C-14 informadas por el laboratorio: $x_1 \pm \sigma_1 \leq x_2 \pm \sigma_2 \leq \dots \leq x_n \pm \sigma_n$. La hipótesis alternativa, H_1 , donde por ejemplo x_{m1} y x_{m2} representan las edades C-14 “medias ponderadas” de los dos grupos que estiman diferentes “edades C-14 verdaderas”, R_1 y R_2 . Es equivalente a la prueba que rechaza la hipótesis nula H_0 si el estadístico, Λ_k (Λ : letra griega lambda), da valores demasiados grandes. Cuando uno investiga el valor de k que permita obtener un valor de Λ_k máximo [$k = 1, \dots, (n-1)$] obtenemos la división de los resultados C-14 en dos grupos. También necesitamos la distribución $\Lambda = \Lambda_k$ máximo bajo la hipótesis nula H_0 , para determinar si existe evidencia suficiente para

dividir las n determinaciones C-14 en grupos o no. Se conoce que, para la división fijada en el punto k, Λ_k tiene una distribución chi-cuadrado, χ^2 , con un grado de libertad (grados de libertad = n° de grupos - 1 = 2 - 1 = 1). Los dos grupos iniciales pueden a su vez subdividirse mientras $\Lambda \geq 3,84$ (probabilidad menor o igual al 5%) hasta que los grupos resultantes sean juzgados homogéneos, con una probabilidad mayor al 5%, aplicando el criterio Λ . En el apéndice se desarrollan las fórmulas matemáticas (5), (6) y (7) correspondientes a los cálculos de Λ_k , x_{m1} y x_{m2} respectivamente.

Aplicación de los procedimientos parados radiocarbónicos reales

Ejemplo 1: En Rom et al. (1999) existe una serie de datos C-14 de un sitio denominado “The Iceman” ubicado en los Alpes en un paso cercano entre Italia-Austria. Existen, entre otros, tres análisis realizados en fracciones de 0,05 g de una misma madera. Las tres mediciones independientes fueron realizadas aplicando la técnica AMS (Accelerator Mass Spectrometry) en el mismo laboratorio Gif (Gif-sur-Yvette, Francia). Se refiere a lo que hemos definido como Caso I y en la aplicación estadística usaremos el “error de conteo” ($\pm 1\sigma$) sin aplicar ningún factor de multiplicación, como lo especificamos anteriormente.

Nº Orden	Laboratorio Nº	xi (años C-14 BP)	± 1 sigma ($\pm 1 \sigma$)
1	Gif-93035	4430	60
2	Gif-94368	4500	80
3	Gif-93036	4680	60

- determinamos la media ponderada (ecuaciones 2 y 4) para los tres datos, $x_m = 4543 \pm 40$ años C-14 BP.
- determinamos (ecuación 1) el estadístico T(1,n) que tiene una distribución χ^2 con n-1 grados de libertad (gl). Tenemos 3 datos, así n = 3 y gl = 3 - 1 = 2. El calculo dió para T(1,3) = 9,05. De tablas (Merodio, 1985: 224) para 2 gl y 0.05 (5%) de probabilidad tenemos que $\chi^2_{2;0.05} = 5,99$. Entonces T(1,3) = 9,05 es mayor que $\chi^2_{2;0.05} = 5,99$, por consiguiente se rechaza la hipótesis nula, H_0 , dado que existen diferencias estadísticamente significativas entre los datos; están estimando diferentes “edades C-14 verdaderas”, R_i .
- dado el rechazo a H_0 , para obtener la división de los resultados C-14 en dos grupos, cada uno con datos que no rechazan la hipótesis nula, determinamos el valor de Λ_k máximo [$k = 1, \dots, (n-1)$]. El valor máximo determinado (ecuación 5) es para $k = 2$: $\Lambda = \max \Lambda_k = \Lambda_2 = 8,56$. Esto significa que el Grupo 1 esta integrado por dos ($k = 2$) datos C-14 (nº orden 1 y 2): 4430 ± 60 años C-14 BP y 4500 ± 80 años C-14 BP con una media ponderada $x_m = 4455 \pm 50$ años C-14 BP (ecuaciones 2 y 4), que estima una “edad C-14 verdadera”, R_1 , desconocida. El Grupo 2 lo forma el tercer (nº orden 3) resultado: 4680 ± 60 años C-14 BP, que estima otra “edad C-14 verdadera”, R_2 , desconocida.

La diferencia significativa en los resultados podría deberse, entre otros, a la contaminación, dado que las muestras para analizar por AMS son muy pequeñas en peso, del orden de unos pocos miligramos. Por tanto, aún micro niveles de contaminante son de un alto porcentaje para muestras del orden del miligramo. Los laboratorios tienen por tanto un diseño muy especial (“ultra-clean laboratory”) para el procesamiento de las muestras. Deben reducir prácticamente a cero la posibilidad de errores por contaminación. Los arqueólogos e investigadores del Cuaternario que utilizan AMS porque sus materiales son de pocos miligramos, deben ser aún más críticos para decidir usar esta tecnología de tan alto costo y prestar una más rigurosa atención para evaluar el contexto geológico, geoquímico y arqueológico de la muestra para enviarla a AMS y poder obtener resultados confiables. Por ejemplo, si se tiene un hueso con una muy pobre conservación de su colágeno no debería fecharse por C-14. Como se dispone de unos pocos miligramos de colágeno se envía el resto óseo para su análisis a un laboratorio AMS. La determinación puede adolecer de un error de contaminación y por tanto obtenemos una edad C-14 que no será confiable.

Ejemplo 2: En Pazdur and Krazanowski (1991) se dan a conocer 13 datos radiocarbónicos analizados por el laboratorio Gd (Gliwice, Polonia) que mide C-14 en fase gaseosa con un contador proporcional (GPC). Son distintas muestras de carbón extraídas en sitios de la Cultura Chancay, Perú. Se refiere a lo que hemos definido como Caso II, dado que no podemos suponer que las muestras provienen de un

mismo objeto. En este caso el “error de conteo”, σ_i , informado por el laboratorio, lo multiplicaremos por un factor de 2 para posteriormente realizar el análisis estadístico.

Nº Orden	Laboratorio Nº	xi (años C-14 BP)	± 1 sigma (± 1 σ)
1	Gif-5312	390	90
2	Gif-3396	430	60
3	Gif-5304	460	100
4	Gif-2819	520	120
5	Gif-5823	670	80
6	Gif-6196	810	140
7	Gif-5672	830	100
8	Gif-6197	900	140
9	Gif-5309	910	70
10	Gif-5307	970	100
11	Gif-5310	1000	100
12	Gif-6189	1070	60
13	Gif-5824	1140	100

- a) determinamos la media ponderada (ecuaciones 2 y 4) para los trece datos, $x_m = 771 \pm 24$ años C-14 BP.
- b) determinamos (ecuación 1) el estadístico $T(1,n)$ que tiene una distribución χ^2 con $n-1$ grados de libertad (gl). Tenemos 13 datos, así $n = 13$ y $gl = 13 - 1 = 12$. El calculo dió para $T(1,13) = 118,73$. De tablas (Merodio, 1985: 224) para 12 gl y 0.05 (5%) de probabilidad tenemos que $\chi^2_{12;0,05} = 21,03$. Entonces $T(1,13) = 118,73$ es mayor que $\chi^2_{12;0,05} = 21,03$, por consiguiente se rechaza la hipótesis nula, H_0 , dado que existen diferencias estadísticamente significativas entre los datos; están estimando diferentes “edades C-14 verdaderas”, R_i .
- c) dado el rechazo a H_0 , para obtener la división de los resultados C-14 en dos grupos, cada uno con datos que no rechazan la hipótesis nula, determinamos el valor de Λ_k máximo [$k = 1, \dots, (n-1)$]. El valor máximo determinado (ecuación 5) es para $k = 5$: $\Lambda = \max \Lambda_k = \Lambda_5 = 101,37$. Esto significa que el Grupo 1 esta integrado por los cinco ($k = 5$) primeros datos C-14. Con una media ponderada $x_{m1} = 488 \pm 40$ años C-14 BP (ecuaciones 2 y 4), que estima una “edad C-14 verdadera”, R_1 , desconocida. El Grupo 2 lo forman los ocho resultados restantes (n° de orden: 6 a 13). Con una media ponderada $x_{m2} = 980 \pm 30$ años C-14 BP, que estima otra “edad C-14 verdadera”, R_2 , desconocida.
- La edad media del Grupo 1, $x_{m1} = 488 \pm 40$ años C-14 BP, calibrada esta en el rango de 1415-1444 años cal AD (506-535 años cal BP).
- La edad media del Grupo 2, $x_{m2} = 980 \pm 30$ años C-14 BP, calibrada esta en el rango de 1019-1150 años cal AD (800-931 años cal BP).
- Pazdur and Krazanowski (1991) realizan una estimación no-radiocarbónica para la Cultura Chancay en el rango 900-1479 años AD, el cual concuerda con el lapso representado por las edades C-14 calibradas de las muestras, cuyos valores (Grupo 1 y 2) obtenidos estadísticamente están en el rango : desde 1019-1150 años AD hasta 1415-1444 años AD.

Ejemplo 3: Damon et al. (1989) se refieren al análisis de autenticidad del Santo Sudario de Turín. Se sacó una muy pequeña porción de la tela (unos 13 centímetros cuadrados) que pesó unos 478 mg. De ella se cortaron tres fragmentos iguales de la sabana de lino del Santo Sudario. Cada fragmento de tela fue analizado por tres laboratorios de AMS distintos, AA (Arizona, USA), ETH (Suiza) y OxA (Oxford, Inglaterra). Cada laboratorio a su vez subdivide su fragmento de lienzo para obtener: el lab AA cuatro submuestras (A1.1; A1.2; A1.3 y A1.4), el lab. ETH cinco submuestras (Z1.1; Z1.2; Z1.3; Z1.4 y Z1.5) y el lab OxA tres submuestras (O1.1; O1.2 y O1.3). Todas fueron analizadas, obteniéndose doce resultados C-14 independientes. Como el material analizado es el mismo, tenemos el Caso I que anteriormente definimos. Como han participado distintos laboratorios, el “error de conteo”, σ_i , informado por cada laboratorio, lo multiplicaremos por un factor de 2 para posteriormente realizar el análisis estadístico.

Nº Orden	Laboratorio Nº	xi (años C-14 BP)	± 1 sigma (± 1 σ)
1	AA-3367 - A 1.1	591	60
2	AA-3367 - A1.3	606	82
3	ETH-3883 -Z 1.3	635	114
4	ETH-3883 - Z 1.4	639	90
5	ETH-3883 - Z 1.5	679	102
6	AA-3367 - A 1.2	690	70
7	AA-3367 - A 1.4	701	66
8	ETH-3883 - Z1.2	722	112
9	OxA-2575 - O 1.2	730	90
10	ETH-3883 - Z 1.1	733	122
11	OxA-2575 - O 1.3	745	110
12	OxA-2575 -O 1.1	795	130

a) determinamos la media ponderada (ecuaciones 2 y 4) para los doce datos, $x_m = 669 \pm 25$ años C-14 BP.

b) determinamos (ecuación 1) el estadístico T(1,n) que tiene una distribución χ^2 con n-1 grados de libertad (gl). Tenemos 12 datos, así n = 12 y gl = 12 - 1 = 11. El calculo dió para T(1,12) = 5,19. De tablas (Merodio, 1985: 224) para 11 gl y 0.05 (5%) de probabilidad tenemos que $\chi^2_{11;0.05} = 19,68$.

Entonces T(1,12) = 5,19 es menor que $\chi^2_{11;0.05} = 19,68$, por consiguiente se acepta la hipótesis nula, Ho, dado que estadísticamente no existen diferencias significativas entre los datos C-14 (las 12 determinaciones integran un solo Grupo). Los fechados C-14 del Grupo estiman la misma y única “edad C-14 verdadera”, R, desconocida.

La edad media ponderada, $x_m = 669 \pm 25$ años C-14 BP, calibrada esta en el rango de 1294-1377 años cal AD (573-656 años cal BP).

El material orgánico (lino) contenido en el Santo Sudario de Turín murió entre los años 1294-1377 AD (573-656 años cal BP). De acuerdo a Damon et al. (1989) el Santo Sudario de Turín fue exhibido por primera vez aproximadamente en los años 1350 AD. La edad C-14 media ponderada calibrada indicaría que se habría confeccionado muy próximo a su primera exhibición. Es decir, la elaboración del Santo Sudario y su primera exhibición han ocurrido muy próximos a la muerte del material orgánico utilizado, como concluyen Damon et al. (1989). La antigüedad de la sábana Santa corresponde a la Edad Media, de acuerdo al análisis C-14.

Ejemplo 4: Tripathi, V. 1990 presenta cuatro edades C-14, entre otras, de la Cultura Black and Red Ware (BRW). Sitio Chirand (Bihar), India. Las muestras han sido analizadas por el laboratorio TF, Tata Institute de la India. Son distintas muestras que no podemos suponer que provienen del mismo objeto, Caso II. En este caso el “error de conteo”, σ_i , informado por el laboratorio, lo multiplicaremos por un factor de 2 para posteriormente realizar el análisis estadístico

Nº Orden	Laboratorio Nº	xi (años C-14 BP)	± 1 sigma (± 1 σ)
1	TF-444	2590	210
2	TF-1029	2915	170
3	TF-1028	3390	180
4	TF-445	3500	200

a) determinamos la media ponderada (ecuaciones 2 y 4) para los cuatro datos, $x_m = 3109 \pm 94$ años C-14 BP.

b) determinamos (ecuación 1) el estadístico T(1,n) que tiene una distribución χ^2 con n-1 grados de libertad (gl). Tenemos 4 datos, así n = 4 y gl = 4 - 1 = 3. El calculo dió para T(1,4) = 13,67. De tablas (Merodio, 1985: 224) para 3 gl y 0.05 (5%) de probabilidad tenemos que $\chi^2_{3;0.05} = 7,81$.

Entonces T(1,4) = 13,67 es mayor que $\chi^2_{3;0.05} = 7,81$, por consiguiente se rechaza la hipótesis nula,

Ho, dado que existen diferencias estadísticamente significativas entre los datos; están estimando diferentes “edades C-14 verdaderas”, R_i .

- c) dado el rechazo a H_0 , para obtener la división de los resultados C-14 en dos grupos, cada uno con datos que no rechazan la hipótesis nula, determinamos el valor de Λ_k máximo [$k = 1, \dots, (n-1)$]. El valor máximo determinado (ecuación 5) es para $k = 2$: $\Lambda = \max \Lambda_k = \Lambda_2 = 12,05$. Esto significa que el Grupo 1 esta integrado por los dos ($k = 2$) primeros datos C-14 (orden 1 a 2). Con una media ponderada $x_{m1} = 2786 \pm 130$ años C-14 BP (ecuaciones 2 y 4), que estima una “edad C-14 verdadera”, R_1 , desconocida. El Grupo 2 lo forman los otros dos resultados restantes (n° de orden: 3 a 4). Con una media ponderada $x_{m2} = 3439 \pm 130$ años C-14 BP, que estima otra “edad C-14 verdadera”, R_2 , desconocida.

La edad media del Grupo 1, $x_{m1} = 2786 \pm 130$ años C-14 BP, calibrada esta en el rango de 1115-809 años cal BC (2759-3065 años cal BP).

La edad media del Grupo 2, $x_{m2} = 3439 \pm 130$ años C-14 BP, calibrada esta en el rango de 1891-1529 años cal BC (3479-3841 años cal BP).

En Trpathi, V.(1990) se realiza una estimación aproximada basada en datos arqueológicos para la Cultura Black and Red Ware (BRW) en el rango 1100-600 años BC, el cual es más “jóven” que el lapso representado por las edades C-14 calibradas de las muestras, cuyos valores (Grupo 1 y 2) obtenidos estadísticamente están en el rango : desde 1821-1529 años BC hasta 1115-809 años BC.

Conclusiones

Se presentó una técnica que puede ser de gran beneficio en el análisis estadístico de una serie de fechados radiocarbónicos, de sitios donde existe una buena información acerca de la relación entre los eventos que han sido datados por C-14. Es apropiada para determinar estadísticamente si son o no significantes las diferencias entre las edades C-14 de una serie de determinaciones. Basado en la evidencia arqueológica y aplicando el procedimiento científico propuesto, podemos conocer y eliminar un fechado radiocarbónico que está fuera del límite estadístico (“outliers”) en la escala radiocarbónica.

Con una buena información arqueológica, es una técnica objetiva para agrupar edades C-14 en situaciones donde ha sido demostrado estadísticamente que los fechados radiocarbónicos de una serie no son diferentes uno del otro y por consiguiente estiman la edad de un mismo evento cultural o natural.

Para el análisis estadístico se plantean dos casos diferenciados. El Caso I, donde las determinaciones C-14 se obtuvieron de un mismo objeto y el Caso II, donde los resultados C-14 fueron realizados sobre muestras donde no se puede asumir que provengan de un mismo objeto.

Las inferencias estadísticas planteadas son útiles y beneficiosas cuando el arqueólogo tiene claramente definido el problema arqueológico y el laboratorista que realiza la determinación radiocarbónica conoce el contexto de donde proviene la muestra, las razones que dieron lugar a las dataciones y lo que se esperaba de ellas . Es por tanto necesaria la cooperación entre estos investigadores de diferentes disciplinas para interpretar los resultados y realizar el análisis estadístico.

En la sección final se aplicó el procedimiento sobre algunos ejemplos citados en la literatura.

Agradecimientos

Los autores agradecen a las instituciones patrocinantes del LATYR (CIG): CONICET y Facultad de Ciencias Naturales y Museo-UNLP. Al apoyo económico brindado por la Universidad Nacional de La Plata (proyecto N322), el CONICET (PIP 4697/96) y la CIC-PBA.

Bibliografía

- ASHMORE, P.J., and Cook, G.T., Harkness, D.D. 2000. A Radiocarbon Database for Scottish Archaeological Samples. *Radiocarbon* 42 (1): 41-48.
- DAMON, P.E.; D.J. DONAHUE, B.H. GORE, A.L. HATHEWAY, A.J.T. JULL, T.W. LINICK, P.J. SERCEL, L.J. TOOLIN, C.R. BRONK, E.T. HALL, R.E.M. HEDGES, R. HOUSLEY, I.A. LAW, C. PERRY, G. BONANI, S. TRUMBORE, J.C. AMBERS, S.G.E. BOWMAN, M.N. LEESE, and M.S. TITE. 1989. Radiocarbon dating of the Shroud of Turin. *Nature* 337 (6208): 611-615.
- FIGINI, A.J.; R.A. HUARTE, G.J. GOMEZ, J.E. CARBONARI y A.C. ZUBIAGA. 1983. Método de Datación Radiocarbónica y sus Fuentes de Error. *LATYR Publicaciones. Museo de La Plata*, 66 p.

- FIGINI, A.J.; J.E. CARBONARI y R.A. HUARTE. 1999. Intercomparación Radiocarbónica Internacional (TIRI). Calidad Analítica de las Mediciones C-14 en el LATYR. *XII Congreso Nacional de Arqueología Argentina* (1997). *Actas. Tomo II*: 357-361.
- FIGINI, A.J. 1999. Análisis de la Calibración en Años Calendarios de las Edades C-14. Corrección para el Hemisferio Sur. *XII Congreso Nacional de Arqueología Argentina* (1997). *Actas. Tomo II*: 349-352.
- GULLIKSEN, S., and E.M. SCOTT. 1995. TIRI report. *Radiocarbon* 37 (2): 820-821.
- INTERNATIONAL STUDY GROUP. 1982. An inter-laboratory comparison of radiocarbon measurements in tree ring. *Nature* 198: 619-623.
- MERODIO, J.C. 1985. Métodos Estadísticos en Geología. *Asociación Geológica Argentina, editor. Serie B. Didáctica y Complementaria N° 13*.
- OTLET, R.L., Walker, A.J., Hewson, A.D., and Burleigh, R. 1980. C-14 interlaboratory comparison in the UK: Experiment design, preparation and preliminary results. *Radiocarbon* 22 (3): 936-946.
- PAZDUR, M.F., and A. KRAZANOWSKI. 1991. Fechados radiocarbónicos para los sitios de la cultura Chancay. In: Krazanowski A., editor, Universidad Jaguelona, Kraków, Poland. *Estudios sobre la cultura Chancay, Perú* : 115-132.
- ROM, W., R. GOLSER, W. KUTSCHERA, A. PRILLER, P. STEIER and E. M. WILD. 1999. AMS C-14 dating of equipment from the Iceman and of spruce logs from the prehistoric salt mines of Hallstatt. *Radiocarbon* 41 (2): 183-197.
- ROZANSKI, K.; W. STICHLER, R. GONFIANTINI, E.M. SCOTT, R.P. BEUKENS, B. KROMER, and VAN DER PLICHT. 1992. The IAEA C-14 intercomparison exercise, 1990. *Radiocarbon* 34 (3): 506-519.
- SCOTT, E.M., T.C. AITCHISON, D.D. HARKNESS, G.T. COOK and M.S. BAXTER. 1990. An overview of all three stages of the international radiocarbon intercomparison. *Radiocarbon* 32 (3): 309-319.
- SCOTT, E.M., D.D. HARKNESS, and G.T. COOK. 1997. Analytical protocol and quality assurance for C-14 analyses: proposal for a further intercomparison. *Radiocarbon* 39 (3): 347-351.
- STUIVER, M., and H. POLACH. 1977. Discussion: reporting of C-14 data. *Radiocarbon* 19 (3): 355-363.
- STUIVER, M., A. LONG and R. KRA editors. 1993. Calibration 1993. *Radiocarbon* 35 (1).
- TRIPATHI, V. 1990. Early historic archaeology of India and radiocarbon dating. *Proceedings of the Second International Symposium C-14 and Archaeology*, Groningen, 1987. Mook W. and Waterbolk H.T. editors. *PACT 29 - IV.2*: 289-303.
- WARD, G.K., and WILSON, S.R. 1978. Procedures for comparing and combining radiocarbon age determinations: A critique. *Archaeometry* 20 (1): 19-31.
- WILSON, S.R., and G.K. WARD. 1981. Evaluation and clustering of radiocarbon age determinations: Procedures and paradigms. *Archaeometry* 23 : 19-39.