

mil·lenni i el segle VII abans de la nostra era», AA.VV., *Història, societat i cultura dels Països Catalans*. Fundació Enciclopèdia Catalana, Barcelona.

GILI-LULL-RIHUETE (e.p.)

Gili, S.; Lull, V. y Rihuete, C. (e.p.), «Economia i Societat durant la Prehistòria a les Illes Balears», AA.VV., *Història, societat i cultura dels Països Catalans*. Fundació Enciclopèdia Catalana, Barcelona.

GILLESPIE 1986

Gillespie, R. (1986), *Radiocarbon User's Handbook*. Committee for Archaeology-Monograph, 9. Oxford University, Oxford.

GONZÁLEZ MARCÉN 1991

González Marcén, P. (1991), *Cronología del Grupo Argárico. Ensayo de faseificación radiométrica a partir de la curva de calibración de Alta Precisión*, Servei de Publicacions de la Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra, tesis doctorals-microfitxa.

GONZÁLEZ MARCÉN (e.p.)

González Marcén, P. (e.p.), «Cronología del grupo argárico», *Revista d'Arqueologia de Ponent*. e.p.

GONZÁLEZ MARCÉN-LULL-RISCH 1992

González Marcén, P.; Lull, V. y Risch, R. (1992), *Arqueología de Europa, 2250-1200 A.C. Una introducción a la 'edad del bronce'*. Síntesis, Madrid.

JAMES-THORPE-KOKKINOS-MORKOT-FRANKISH 1991

James, P. J.; Thorpe, I. J.; Kokkinos, N.; Morkot, R. y Frankish, J. A. (1991), *Centuries of Darkness. A challenge to the conventional chronology of Old World Archaeology*, Jonathan Cape, Londres (trad. cast. (1992) *Siglos de oscuridad. Desafío a la cronología convencional de la arqueología del Viejo Mundo*. Crítica, Barcelona).

MONTÓN 1993

Montón, S. (1993), *Cerámica de las comunidades griegas (c. 2600-1650 cal ANE)*, Servei de Publicacions de la Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra, tesis doctorals-microfitxa.

RENFREW 1973

Renfrew, C. (1973), *Before Civilisation*. Jonathan Cape, Londres (trad. cast. (1986), *El alba de la civilización*. Istmo, Madrid).

STUIVER-REIMER 1993

Stuiver, M. y Reimer, P. J. (1993), «Extended ^{14}C data base and revised Calib 3.0 ^{14}C age calibration program», *Radiocarbon*, 35: 215-230.

La datació per radiocarboni i el calibratge de les dates radiocarbòniques. Objectiu, problemes i aplicacions

Joan S. Mestres

1. Introducció

L'evolució humana només es pot comprendre plenament si s'emmarca dins la dimensió temporal i, per aquest motiu, la datació de les troballes arqueològiques i del passat prehistòric ha estat sempre un motiu de preocupació per als arqueòlegs i prehistoriadors.

Els esdeveniments poden situar-se en l'escala temporal de dues maneres diferents que originen dos sistemes cronològics distints: de manera relativa, quan els esdeveniments s'ordenen uns amb relació als altres segons l'ordre d'ocurrència; i de manera absoluta, quan s'expressa en anys el temps transcorregut entre l'ocurrència de l'esdeveniment i el present. Evidentment, la cronologia més desitjable és l'absoluta, perquè permet quantificar la dimensió temporal i permet establir relacions de sincronia o diacronia entre esdeveniments geogràficament distants.

En arqueologia, l'eina fonamental per a l'establiment de la cronologia ha estat l'estratigrafia: si no hi ha hagut pertorbació en la formació de dipòsits, pot establir-se una seqüència cronològica dels objectes i dels contextos basada en la superposició dels estrats més joves sobre els més antics; d'aquesta manera, pot obtenir-se una satisfactòria escala temporal relativa. Quan l'estratigrafia no és possible, pot establir-se l'escala cronològica recurrent a la seriació: una vegada establerta la variació tipològica d'una classe d'objectes, la classificació tipològica d'un objecte trobat permet la seva adscripció cronològica dins l'escala relativa corresponent.

Una altra aproximació a l'establiment de la cronologia és la datació físico-química, basada en la determinació de l'edat d'un material o artefacte a través de la mesura de la seva composició química o isotòpica. Poden distingir-se quatre grups de mètodes de datació físico-química:

1. Mètodes basats en el contingut d'elements o compostos estables: datació d'ossos basada en el contingut de fluor o nitrogen o bé en la racemització d'aminoàcids.

2. Mètodes basats en el contingut d'un isòtop inestable: datació per radiocarboni.

3. Mètodes basats en la relació isòtop radioactiu progenitor/isòtop fill estable: datació per potassi-argó.

4. Mètodes basats en l'efecte causat per la radiació radioactiva natural sobre els materials que hi són

exposats: datació per termoluminiscència i per traces de fissió.

Cadascun d'aquests mètodes de datació pot aplicar-se només a un nombre limitat de materials i alguns proporcionen datacions absolutes.

De tots els mètodes de datació físico-química, la datació per radiocarboni és, sens dubte, el més difós i el que ha estat objecte de més esforços per al seu perfeccionament. La voluntat de perfeccionament ha estat present en el mètode de datació per radiocarboni des del seu adveniment i els pilars en què se sosté la seva evolució són els següents: concepció del mètode i la seva verificació mitjançant l'ús del comptador de carboni sòlid (ARNOLD I LIBBY, 1949), introducció dels comptadors proporcionals per a la mesura del contingut de radiocarboni (DE VRIES, BARENDSEN, 1954), introducció dels comptadors de centelleig líquid per a la mesura del contingut de radiocarboni (NOAKES et al. 1965), calibratge dendrocronològic de les dates radiocarbòniques (Suess, 1967) i introducció de l'espectrometria de masses amb accelerador de partícules (MULLER, 1977).

La datació per radiocarboni proporciona una escala cronològica d'abast universal i, consegüentment, un marc comú de referència temporal per al plistocè tardà i l'holocè i això ha fet possible una prehistòria d'abast mundial ja que ha permès als prehistoriadors establir la sincronia o diacronia de fenòmens arqueològics d'arreu del món. L'aplicació de la datació per radiocarboni a l'arqueologia va bastir una nova estructura cronològica de la prehistòria i, en revelar per al neolític d'Europa i l'Orient Mitjà una cronologia molt més antiga que la suposada, va causar un fort impacte que s'ha anomenat la «primera revolució del radiocarboni» (RENFREW, 1973), en trastornar l'esquema cronològic vigent fins al moment del seu adveniment.

Dels pilars que marquen el desenvolupament del mètode de datació per radiocarboni, tots llevat d'un fan referència a la mesura del contingut de radiocarboni i els seus efectes sobre l'arqueologia i la prehistòria han estat indirectes i no tan decisius; l'altre, tanmateix, fa referència al calibratge de les dates radiocarbòniques i els seus efectes sobre la prehistòria, en permetre accedir a una cronologia expressada en el calendari solar, han estat més trasbalsadors encara perquè han enderrocat el sòlid esquema cronològic vigent a Europa, basat en el difusionisme cultural des de l'Egea. A aquest fet se l'ha anomenat «la segona revolució del radiocarboni» (RENFREW, 1973).

En aquesta exposició s'expliquen els fonaments de la datació per radiocarboni, els motius pels quals l'escala cronològica radiocarbònica no és equivalent a l'escala cronològica solar, la qual cosa ha originat la necessitat del calibratge per transformar les dates radiocarbòniques en dates expressades en aquell sistema cronològic, els problemes que comporta el calibratge i les aplicacions que troba el calibratge.

2. Fonaments del mètode de datació per radiocarboni

La datació per radiocarboni és possible gràcies a les característiques químiques específiques de l'element

carboni que el fan l'element clau de la bioquímica i també un element geoquímicament i geodinàmicament particular a causa de la seva ubiqüitat. El carboni a la terra està constituït bàsicament per dos isòtops estables en les següents proporcions:

$${}^{12}_6\text{C} \quad 98,9\%$$

$${}^{13}_6\text{C} \quad 1,1\%$$

A nivell planetari, aquest element es troba en dos possibles estats: en un estat d'equilibri estàtic i en un estat d'equilibri dinàmic. El carboni que es troba en equilibri estàtic està reclòs en compartiments aïllats tals com els dipòsits de petroli, de carbons minerals i de roques sedimentàries. El carboni que es troba en equilibri estàtic no està involucrat en la datació per radiocarboni, però hi té algunes implicacions importants.

El carboni que es troba en estat d'equilibri dinàmic forma l'anomenat dipòsit de bescanvi del carboni (DBC), el qual està constituït per un conjunt de compartiments no aïllats, sinó que estan en equilibri dinàmic entre si respecte al bescanvi de carboni. En cadascun d'aquests compartiments el carboni adopta una forma química característica. Els compartiments que integren el DBC són els següents:

- * L'atmosfera, on el carboni es troba en estat de diòxid de carboni.

- * La biosfera, on el carboni adopta la forma de matèria orgànica vivent.

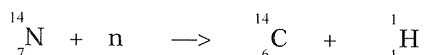
- * L'humus, on el carboni es troba en forma de matèria orgànica en descomposició.

- * La hidrosfera, on el carboni adopta la forma de diòxid de carboni i bicarbonat dissolt.

Que aquests compartiments es trobin en equilibri dinàmic entre si respecte al bescanvi del carboni significa que aquest element contínuament transita dels uns als altres i que la quantitat total de carboni continguda a cadascun es manté sensiblement constant al llarg del temps. El trànsit continu del carboni entre els diferents compartiments comporta l'existència d'unes vies de transferència que el fan possible. Així, el bescanvi de carboni entre l'atmosfera i la biosfera s'esdevé a través de la fotosíntesi i de la respiració: els vegetals, organismes autòtrofs, incorporen el carboni a llurs teixits mitjançant la fotosíntesi; dels vegetals el carboni passa als animals, organismes heteròtrofs, per ingestió. Una part del carboni assimilat pels éssers vivents és restituida a l'atmosfera com a diòxid de carboni per la respiració. Les excrecions dels organismes vivents i llur descomposició, un cop morts, porten el carboni a l'humus i d'aquest, per mitjà d'una contínua degradació, torna a l'atmosfera com a diòxid de carboni. El bescanvi de carboni entre la hidrosfera i l'atmosfera s'esdevé per dissolució del diòxid de carboni atmosfèric en l'aigua, bescanvi de carboni entre aquest i els bicarbonats dissolts i retorn a l'atmosfera com a diòxid de carboni. Cadascun dels compartiments que integren el DBC està caracteritzat per un temps de residència del carboni en el seu si; aquest paràmetre representa el temps necessari perquè hi entri o en surti una quantitat de carboni igual a la que conté i pot interpretar-se com el temps necessari

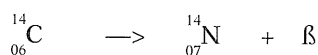
per a la renovació de tot el carboni contingut en el compartiment. El temps de residència del carboni en un compartiment depèn de dos factors: la quantitat total de carboni que conté i la velocitat de transferència entre els altres compartiments. La figura 1 mostra esquemàticament els diferents compartiments que integren el DBC, les vies de transferència del carboni entre els compartiments, la fracció de carboni de tot el DBC continguda en cada compartiment, expressada percentualment, i el temps de residència del carboni en cada compartiment, expressat en anys. Com es pot observar, la major reserva de carboni del DBC es troba a la hidrosfera i, consegüentment, el temps de residència és també notablement més gran. Això, com es veurà més endavant, té implicacions importants en la datació per radiocarboni.

El carboni que es troba al DBC conté, a més dels dos isòtops citats anteriorment, ^{12}C i ^{13}C , encara que en proporcions ínfimes, un altre isòtop del C, el ^{14}C . L'origen d'aquest isòtop és el següent: la terra es troba immersa en un camp de radiació còsmica i els protons procedents d'aquesta radiació reaccionen a l'alta atmosfera amb el nitrogen i l'oxigen de l'aire per produir neutrons. Aquests neutrons dissipen llur energia a través de successives col·lisions amb els elements de l'aire fins arribar a un nivell d'energia adequat i aleshores reaccionen amb el nitrogen atmosfèric per produir ^{14}C segons la següent reacció nuclear:



Com que el ^{14}C es comporta químicament igual que els seus dos isòtops ^{12}C y ^{13}C , immediatament després de la seva formació, s'oxida amb l'oxigen de l'aire a diòxid de carboni, com a tal es difon per l'atmosfera i des d'aquesta, participant de la mateixa manera que els seus isòtops en totes les vies de transferència del carboni, es dispersa homogèniament en tot el DBC. La velocitat de producció de radiocarboni depèn de la intensitat de la radiació còsmica incident sobre la terra que al seu torn depèn de les variacions del camp geomagnètic, de les variacions de l'activitat solar i dels cicles de les taques solars. Tots aquests factors poden fer variar la intensitat de la radiació còsmica incident sobre la terra i, per tant, influeixen sobre la taxa de producció de radiocarboni.

El ^{14}C , a diferència dels seus altres dos isòtops, és un nucli inestable que es transforma en nitrogen per emissió d'una partícula β (per aquest motiu rep el nom de *radiocarboni*) d'acord amb la següent reacció nuclear:



amb un període de semidesintegració¹ de 5.730 anys.

La inestabilitat del radiocarboni fa que la quantitat d'aquest continguda en el DBC no augmenti indefinidament malgrat la seva contínua formació, ja que

aquesta es troba compensada per la seva contínua descomposició. En efecte, la velocitat de descomposició del radiocarboni és proporcional a la quantitat de radiocarboni present al DBC i tendeix a compensar exactament la seva producció de manera que la quantitat total de radiocarboni continguda en el DBC segueix les fluctuacions de la velocitat de formació del radiocarboni. *En resum, pot dir-se doncs, que la quantitat de radiocarboni present en el DBC segueix les fluctuacions de la intensitat de la radiació còsmica incident sobre la terra.*

Un corol·lari de tot el que s'ha exposat fins ara és que qualsevol material pertanyent al DBC, és a dir, que contínuament bescanviï carboni amb el medi circumdant, conté radiocarboni en la proporció pròpia del compartiment i del moment en què es trobi. Si per qualsevol circumstància, per exemple, mort d'un organisme vivent, un material abandona el DBC, és a dir, deixa d'incorporar carboni procedent del seu medi exterior, aleshores també s'atura l'aportació de radiocarboni procedent del medi exterior i en aquest moment s'inicia la disminució del seu contingut de radiocarboni d'acord amb la llei del decaïment radioactiu, l'expressió matemàtica de la qual és la següent:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

En aquesta equació N_0 representa el nombre d'àtoms de radiocarboni continguts en el material quan aquest formava part del DBC i N^2 representa el nombre residual d'àtoms de radiocarboni que encara es troben en el material després d'haver transcorregut un temps t d'ençà de l'abandó del DBC; λ és la constant de desintegració del ^{14}C , relacionada amb el seu període de semidesintegració $T_{1/2}$ per $\lambda = T_{1/2}/\ln 2$.

L'equació anterior mostra que si es coneix el contingut actual N de radiocarboni d'un material i el seu contingut quan formava part del DBC, és a dir, el seu contingut inicial N_0 , el càlcul del temps transcorregut des que el material va abandonar el DBC és immediat i respon a l'equació

$$t = (T_{1/2}/\ln 2) \times \ln (N_0/N) \quad (2)$$

obtinguda en aïllar la variable t en l'equació (1). Aquesta equació i la mesura de les seves variables constitueixen la peça clau de la datació per radiocarboni.

2. El nombre d'àtoms de radiocarboni, N i N_0 , s'expressa en relació a un sistema de referència que és un gram de carboni. Per aquest motiu, a partir d'ara, el nombre d'àtoms de radiocarboni es referirà com a «contingut de radiocarboni».

3. El valor admès actualment per al període de semidesintegració del ^{14}C és 5.730 anys, però el valor utilitzat per al càlcul de la data radiocarbònica és 5.568 anys, que és el valor adoptat durant els primers temps de la datació per radiocarboni. Per tal d'evitar alterar el valor de les dates antigues, s'ha acordat mantenir aquest valor malgrat la seva incorrecció; tanmateix, l'error del període de semidesintegració no té cap importància perquè si les dates radiocarbòniques es calibren, aquest error es corregeix amb el procés de calibratge; si les dates no es calibren, l'error introduït per la incorrecció del període de semidesintegració és una contribució més al caràcter convencional de les dates radiocarbòniques.

1. El període de semidesintegració $T_{1/2}$ d'un isòtop radioactiu és el temps que ha de transcorrer perquè una població d'àtoms es redueixi a la meitat.

3. Hipòtesis fonamentals

S'acaba de veure que la datació per radiocarboni es basa en el càlcul del temps transcorregut entre l'abandonament d'un material del DBC, generalment la mort d'un organisme vivent, i el present, a través de la llei del decaïment radioactiu expressada en la forma indicada per l'equació (2). L'aplicació pràctica del mètode exigeix, doncs, dos requisits experimentals: la mesura del contingut residual N de radiocarboni y la mesura del contingut inicial de radiocarboni N_0 . El primer requisit no suposa altra dificultat que la purament analítica, és a dir, mesurar amb la màxima exactitud i precisió aquesta variable química. El segon requisit, tanmateix, ultra els mateixos requeriments analítics, comporta seriosos problemes teòrics, ja que, com s'ha vist, el contingut inicial de radiocarboni depèn precisament del temps, que és allò que justament es vol determinar. Amb la finalitat d'obviar aquest problema i fer el mètode practicable, la datació per radiocarboni recorre a dues hipòtesis fonamentals:

* El contingut de radiocarboni és el mateix en tot el DBC, és a dir, no depèn del compartiment ni del material.

* El contingut de radiocarboni en tot el DBC s'ha mantingut constant al llarg del temps.

El compliment d'aquestes dues hipòtesis és molt important perquè permet considerar un únic valor independent del temps i del compartiment com a contingut inicial de radiocarboni N_0 . Com a tal s'ha considerat el corresponent a la biosfera l'any 1950 representada per la cel·lulosa d'origen vegetal (per aquest motiu, aquest any s'ha pres com origen de l'escala cronològica radiocarbònica). La mesura del contingut inicial de radiocarboni la realitza independentment cada laboratori de datació i es duu a terme sobre una substància sintètica, àcid oxàlic preparat pel National Institute of Standards and Technology (EUA), que cada laboratori tracta de la mateixa manera que les mostres i mesura paral·lelament amb elles.

Plantejat d'aquesta manera, la datació per radiocarboni només proporcionarà resultats exactes en la mesura en què les hipòtesis fonamentals en què es basa la seva aplicació siguin certes. Tanmateix, cap de les dues hipòtesis fonamentals és rigorosament exacta sinó que estan subjectes a desviacions que a continuació s'exposaran breument per determinar quines són corregibles i quines no.

3.1. Compliment de les hipòtesis fonamentals

Al compliment de la primera hipòtesi s'oposen dos fets: el fraccionament isotòpic i l'efecte dipòsit. El fraccionament isotòpic consisteix en el fet que en tot canvi químic que experimenti el carboni es produeix un enriquiment o empobriment en els isòtops que el componen. Així per exemple, la fotosíntesi es realitza preferentment sobre els isòtops més lleugers del C i per aquest motiu el contingut de ^{14}C dels vegetals és lleugerament més baix que el de l'atmosfera d'on procedeix. Si aquest efecte no es corregís, es donaria

la paradoxa que materials contemporanis presentarien edats radiocarbòniques diferents. Afortunadament, aquest efecte es pot corregir mesurant per espectrometria de masses l'abundància isotòpica del ^{13}C en el material objecte de datació.⁴

Un altre motiu d'incompliment de la primera hipòtesi és l'efecte dipòsit: a causa de la seva enorme grandària, el temps de residència del carboni en els oceans és del mateix ordre de magnitud que el període de desintegració del ^{14}C (fig. 1) i això fa que el nivell de radiocarboni dels oceans, perquè té temps de decaure, sigui deficitari respecte als altres compartiments que integren el DBC. Aquest fet pot interpretar-se com un envelliment de la hidrosfera respecte als altres compartiments i es manifesta com una edat aparent en els materials d'origen marí que s'afegeix a la seva edat real. Es pot presentar també un efecte dipòsit d'àmbit local en els llacs que es troben en regions calcàries: les aigües de pluja que els alimenten contenen diòxid de carboni atmosfèric i exerceixen una acció dissolvent sobre la roca calcària antiga, i per tant exempta ja de ^{14}C . El carboni d'aquestes aigües, en forma de bicarbonat i de diòxid de carboni està, doncs, empobrit en ^{14}C i, consegüentment, també la matèria orgànica que hi viu i que formarà els sediments després de la seva mort, està afectada d'una edat aparent (GARCÍA et al., 1992). L'efecte dipòsit origina, doncs, una indeterminació en el contingut inicial de radiocarboni i pot corregir-se determinant experimentalment l'edat aparent, però això no sempre és possible. Per aquest motiu, materials d'origen marí o lacustre, tals com les closques, no són gaire fiables per a la datació per radiocarboni, ja que poden mostrar edats radiocarbòniques més altes que les reals.

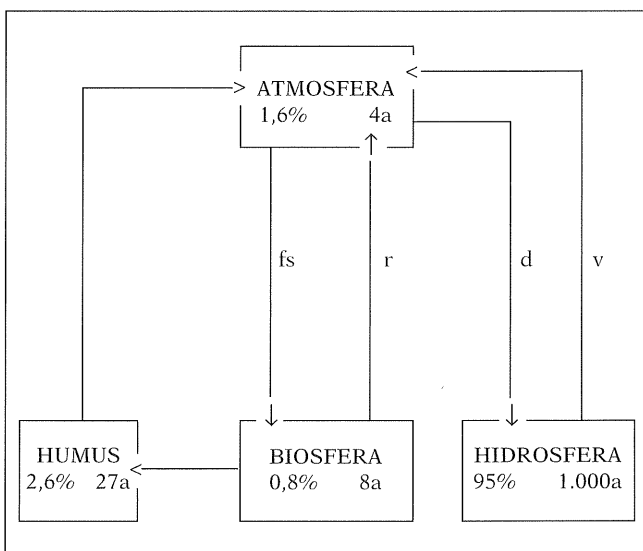


Figura 1. - El dipòsit de bescanvi del carboni i les vies de transferència del carboni entre els diversos compartiments. Sota del nom de cada compartiment s'indica la fracció del total de carboni del DBC continguda en el compartiment i el temps de residència expressat en anys. Abreviatures: fs=fotosíntesi, r=respiració, d=dissolució, v=volatilització.

4. És important que els usuaris dels laboratoris de datació per radiocarboni sàpiguen si les seves dates han estat calculades practicant la correcció per fraccionament isotòpic.

Respecte al compliment de la segona hipòtesi, s'han trobat evidències experimentals que hi ha hagut fluctuacions del contingut inicial de radiocarboni. Tals evidències les ha proporcionades la dendrocronologia: els arbres que viuen en regions temperades experimenten cada primavera un procés de creixement i produeixen una nova capa de cel·lulosa que es manifesta en forma d'un anell concèntric als anells produïts els anys anteriors; per aquest motiu, el contingut de radiocarboni de cadascun d'aquests anells és un reflex fidel del contingut de radiocarboni atmosfèric en aquell any i per tant de la biosfera. L'estudi minuciós de successions d'anells d'arbres vius y fòssils proporciona un llarg registre cronològic de fusta d'edat exactament coneguda, l'anàlisi de la qual ha permès comprovar que el contingut inicial de radiocarboni no és constant en el temps.

S'acaba de veure que la pràctica de la datació per radiocarboni comporta l'adopció d'unes hipòtesis fonamentals que estan afectades d'unes desviacions que no sempre són corregibles, per consegüent, les edats determinades mitjançant aquest mètode també estan afectades de desviacions respecte a les edats reals expressades en cronologia solar. L'única d'aquestes desviacions que és corregible en tota la seva extensió és el fraccionament isotòpic. A causa d'aquesta situació, *la utilització del mètode de datació per radiocarboni, aplicant la correcció per fraccionament isotòpic, origina una escala cronològica convencional anomenada escala cronològica radiocarbònica que no es correspon exactament amb l'escala cronològica real, expressada mitjançant el calendari solar.* L'adopció d'aquesta escala cronològica convencional resol el problema de l'incompliment de les hipòtesis fonamentals, però planteja una qüestió nova: com transformar les dates expressades en la escala cronològica radiocarbònica en dates expressades en l'escala cronològica solar. Aquest problema el resol el calibratge de les dates radiocarbòniques.

4. Mesura del contingut de radiocarboni

S'ha vist que la datació per radiocarboni es basa en l'ús de l'equació

$$t = (T_{1/2}/\ln 2) \times \ln (N_0/N)$$

on N_0 representa el contingut inicial de ^{14}C i N representa el contingut residual de ^{14}C corregit per l'efecte del fraccionament isotòpic. Tota datació per radiocarboni requereix, doncs, la mesura d'aquestes magnituds que són extraordinàriament petites i exigeixen, en conseqüència, mètodes de mesura extremadament sensibles i l'aplicació d'un zel exquisit.

El nombre d'àtoms de ^{14}C és difícil de mesurar i fins recentment no s'ha disposat de la tecnologia adequada per dur a terme tal mesura. Tanmateix, és més fàcil mesurar el nombre de partícules β emeses en el procés de desintegració del ^{14}C . El nombre de partícules β emeses per unitat de temps s'anomena activitat i és proporcional al contingut de radiocarboni. Aquestes consideracions permeten classificar els mètodes de mesura del contingut de radiocarboni en mètodes

directes, basats en la mesura del nombre d'àtoms de ^{14}C , i en mètodes indirectes o radiomètrics, basats en la mesura de la radioactivitat.

4.1. Mètodes indirectes

Actualment hom disposa de dos mètodes radiomètrics eficaços per mesurar l'activitat del radiocarboni: els mètodes basats en l'ús de comptadors proporcionals i els mètodes basats en l'ús del centelleig líquid. Els primers treballen en fase gasosa i els segons en fase líquida. La mesura de l'activitat del radiocarboni present en qualsevol material requereix, doncs, l'aïllament del carboni en forma de un compost químicament definit d'una puresa química i radioquímica tan elevada com sigui possible. Tenint en compte la proporcionalitat entre l'activitat del radiocarboni i el seu contingut, l'equació que permet calcular l'edat radiocarbònica s'expressa de la manera següent:

$$t = (T_{1/2}/\ln 2) \times \ln (A_0/A_c)$$

on A_0 y A representen respectivament l'activitat inicial i residual corregida pel fraccionament isotòpic del ^{14}C .

La mesura del contingut de radiocarboni per mètodes radiomètrics suposa, doncs, la mesura de l'activitat del radiocarboni contingut al carboni i la mesura d'aquesta magnitud amb suficient precisió exigeix esperar el temps necessari perquè es produeixi un nombre de desintegracions prou gran per assolir la precisió adequada. Com que la probabilitat de desintegració del nucli de ^{14}C és extremadament petita ($2,3 \times 10^{-10}$ per minut), això significa que per comptar un nombre de desintegracions suficientment gran per tal d'assolir una bona precisió en la mesura, cal un llarg temps de mesura i una quantitat notable de mostra (l'equivalent a 0,5 a 6 g de carboni en forma apta per a la mesura).

4.2. Mètodes directes

Les circumstàncies desfavorables de la mesura radiomètrica milloren ostensiblement si en lloc de comptar els àtoms de ^{14}C que es desintegren es poden comptar els àtoms de ^{14}C presents en el material objecte de datació (la quantitat d'aquests per gram de carboni modern és $4,6 \times 10^{10}$). Per dur a terme aquest compte calen distintes etapes:

1. Ionització del carboni present en el material objecte de datació, prèviament transformat en grafit.
2. Acceleració dels àtoms ionitzats a elevades velocitats mitjançant un accelerador de partícules.
3. Separació dels àtoms de ^{14}C de la resta dels isòtops de carboni mitjançant l'aplicació d'un camp magnètic que desvia els diferents isòtops de llur trajectòria en un grau més gran com més petita és la massa dels àtoms (etapa d'espectrometria de masses).
4. Compte del nombre d'àtoms de ^{14}C .

Aquest mètode de mesura del contingut de ^{14}C basat en l'espectrometria de masses combinada amb l'ús d'acceleradors de partícules se'l designa amb la sigla AMS (Accelerator Mass Spectrometry).

Els avantatges més notoris de la datació per radiocarboni mitjançant AMS són que el temps de mesura necessari és molt més curt (només hores, davant de dies per als mètodes indirectes de mesura) i que la quantitat de mostra requerida per a l'anàlisi és de l'ordre de 1.000 vegades més petita que per als mètodes radiomètrics. Tanmateix, cal ser prudent davant d'aquesta qualitat engrescadora ja que pot ser il·lusòria; en efecte, l'ús de mètodes directes de mesura fa el mètode virtualment no destructiu permetent la datació directa (no per associació) d'artefactes i possibilita datar quantitats de material tan petites com un granet de carbó aïllat o una única llavor carbonitzada, però aleshores cal qüestionar-se la representativitat o associació del material, ja que aquestes quantitats tan petites de material poden haver arribat accidentalment al nivell arqueològic objecte de datació, mentre que quan la quantitat de material és notable, la probabilitat d'associació entre el material i l'esdeveniment arqueològic que hom pretén datar és molt més alta.

5. Expressió dels resultats de les datacions per radiocarboni

El resultat primari d'una datació per radiocarboni és una magnitud cronomètrica anomenada *data radiocarbònica*. La unitat amb què s'expressen les dates radiocarbòniques és l'«any BP» i l'origen de l'escala cronològica radiocarbònica, és a dir, l'any 0 BP, és, per definició, l'any 1950 dC. Tota datació per radiocarboni es basa en la mesura del contingut inicial i el contingut residual de radiocarboni en el material objecte de la datació i com que la desintegració radioactiva és un fenomen aleatori, tota mesura del contingut de radiocarboni està afectada d'una incertesa que es transmet també a la data radiocarbònica calculada a partir dels seus valors. Així, una llarga sèrie de datacions replicades d'una mateixa mostra produiria un conjunt de resultats que es repartirien segons una distribució de probabilitat de Gauss al voltant del veritable valor (fig. 2A). Pel mateix motiu, tota data radiocarbònica experimental és una aproximació al valor veritable i està associada a una incertesa expressada també mitjançant una distribució de probabilitat de Gauss centrada en el valor experimental. El sentit que té la distribució de probabilitat és que delimita un interval de temps en què per a qualsevol petit segment de temps inclòs en el seu interior hi ha una probabilitat no nul·la i calculable que contingui la veritable data radiocarbònica (fig. 2B). D'aquí es desprèn que una data radiocarbònica no és un valor puntual sinó un interval continu de valors associat a una distribució de probabilitat de Gauss. L'expressió completa d'una data radiocarbònica requereix, doncs, a més de la indicació del valor experimental, l'expressió de la seva incertesa que s'indica mitjançant la desviació típica (s) corresponent a la distribució de probabilitat de Gauss associada, en forma d'addició i subtracció ($\pm s$). D'acord amb aquests conceptes, el significat d'una expressió típica d'una data radiocarbònica, per exemple 5000 ± 100 BP és

el següent: amb una probabilitat del 68,3% (corresponent a $\pm$ una desviació típica), la veritable data radiocarbònica es troba a l'interval 4900-5100 BP (fig. 2C); o bé, amb una probabilitat del 95,4% (corresponent a $\pm$ dues desviacions típiques), la veritable data radiocarbònica es troba a l'interval 4800-5200 BP.

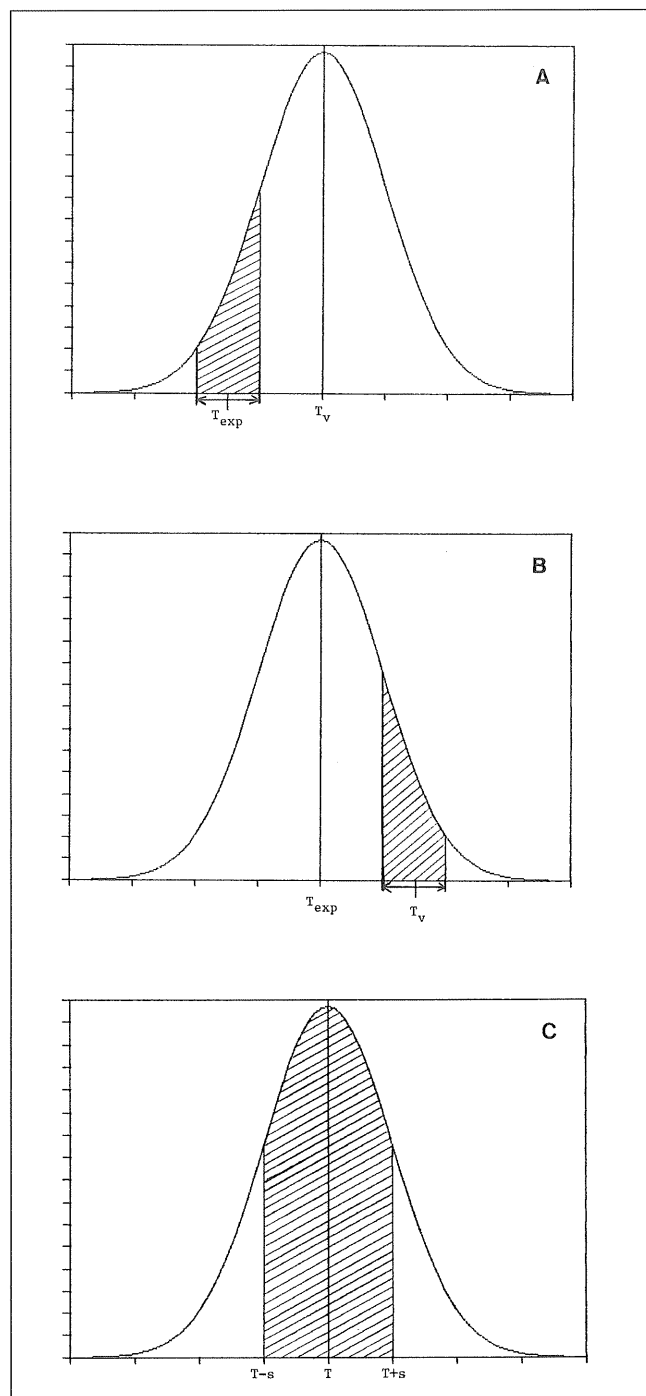


Figura 2. - A) Distribució de probabilitat d'un nombre infinit de dates radiocarbòniques experimentals T_{exp} al voltant de la veritable data radiocarbònica T_v . L'àrea ombrada indica la probabilitat que una data experimental caigui dins l'interval senyalat.

B) Distribució de probabilitat de la veritable data radiocarbònica al voltant de la data radiocarbònica experimental T_{exp} . L'àrea ombrada indica la probabilitat que la veritable data radiocarbònica T_v caigui dins el segment marcat.

C) Probabilitat (àrea ombrada) que la veritable data radiocarbònica T_v corresponent a la data experimental T caigui dins l'interval $T \pm s$.

6. Aplicacions arqueològiques de la datació per radiocarboni

La cronologia no és un objectiu per ella mateixa sinó un mitjà d'adquirir informació i una comprensió global del passat humà i la datació per radiocarboni compleix diverses funcions dintre del raonament arqueològic (WATERBOLK, 1983):

1. És un instrument per establir la cronologia relativa quan la tipologia i l'estratigrafia fallen.
2. Permet establir correlacions entre seqüències arqueològiques associades a processos culturals massa allunyats geogràficament per poder aplicar l'estratigrafia o la tipologia.

3. Proporciona una escala de temps absoluta d'abast universal que permet situar-hi els fenòmens arqueològics i permet estimar-ne la durada. Així, per exemple, permetria avaluar el desfasament entre el començament del cultiu de cereals i de la ramaderia a les costes de la mar del Nord i de la Mediterrània.

4. Permet establir correlacions entre seqüències arqueològiques i seqüències ambientals, geològiques o climàtiques.

La datació per radiocarboni pot utilitzar-se amb dues finalitats diferents: deductiva i inductiva. La primera es refereix a la determinació de l'edat d'un objecte o context particular, la qual podrà utilitzar-se posteriorment per relacionar-lo amb el registre arqueològic; la segona, potser la més valuosa i pròpia de la naturalesa probabilística de les dates radiocarbòniques, es refereix a l'ús de conjunts de dates per a l'establiment de la cronologia i de la duració de fenòmens arqueològics tals com cultures o manifestacions culturals, la qual cosa facilita l'estudi de la sincronia o diacronia d'expressions d'aquest fenomen, veïnes tant en sentit geogràfic com cronològic. Sovint els arqueòlegs presenten al laboratori una mostra amb el propòsit de tenir una comprovació independent sobre la seva identificació de ceràmica, de sepultura, de tipus d'habitatge o sobre la seva posició estratigràfica. En totes aquestes situacions la data radiocarbònica és de gran ajuda per verificar les conclusions arqueològiques derivades de la tipologia i l'estratigrafia i és una mostra de la utilització deductiva de les dates radiocarbòniques.

7. Interpretació dels resultats de les datacions per radiocarboni

La validesa d'una data radiocarbònica depèn de molts factors. Alguns d'aquests factors depenen exclusivament del laboratori, tals com la qualitat del tractament aplicat per eliminar la contaminació i la qualitat de les mesures; altres factors són de naturalesa arqueològica, tals com el grau d'associació del material datat amb l'esdeveniment arqueològic o la possibilitat de mescla. En tots els casos és imprescindible un elevat nivell de diàleg i un intercanvi d'informació entre l'arqueòleg i el laboratori de datació per tal de poder extreure la informació més exacta del material objecte de datació i interpretar-ne correctament la informació extreta. Una o unes poques dates radiocarbòniques

discrepants amb les evidències arqueològiques no són suficients per enderrocar una concepció cronològica consolidada per mitjans purament arqueològics, però tampoc no han de ser menyspreades immediatament si no confirmen els resultats esperats: una altra vegada s'imposa el diàleg entre l'arqueòleg i el laboratori per dissenyar una nova estratègia basada en materials alternatius, si és possible, i en un altre plantejament arqueològic per confirmar o desmentir els resultats anòmals. A continuació es revisen breument alguns factors arqueològics que cal considerar a l'hora d'estimar la validesa d'una data radiocarbònica.

7.1. Certesa de l'associació

Allò que hom pretén amb l'aplicació de la datació per radiocarboni és que el material objecte de datació dati l'activitat humana documentada per un nivell arqueològic. La majoria de les vegades no es data un material per ell mateix sinó que la data que proporciona s'atribueix a un fet arqueològic rellevant i perquè aquesta atribució sigui vàlida el material i el fet arqueològic han de ser contemporanis. *Per la seva pròpia naturalesa, la datació per radiocarboni data la formació dels materials arqueològics i no els fets arqueològics en què participen aquests materials, ni la seva deposició en el nivell arqueològic en què es troben.* Hi ha una gran variació en el grau de certesa amb què les mostres datades estan associades amb el veritable material o fet arqueològic que hom pretén datar.

A. Certesa plena. Hom data el mateix objecte arqueològic: artefacte, biga d'una construcció, fusta d'una embarcació, etc.

B. Alta probabilitat d'associació. Hi ha una relació funcional directa entre el material datat i l'objecte o nivell que hom pretén datar: taüt carbonitzat en un clot sepulcral amb artefactes, llavors carbonitzades en un clot de deixalles amb presència de fragments ceràmics, llar de foc en el terra d'una casa, etc.

C. Probabilitat raonable. No hi ha una relació funcional demostrable entre el material datat i l'objecte o nivell que hom pretén datar, però la quantitat del material i la grandària dels fragments són una prova a favor de la relació: acumulació de carbó en un clot de deixalles o en una capa d'ocupació.

D. Possibilitat baixa. Com el cas anterior, però, els fragments són petits i dispersos: terra carbonosa en una capa d'ocupació, partícules de carbó en una sepultura.

7.2. Edat abans de la utilització humana

El material datat té una edat més antiga que el moment en què es va dipositar i va esdevenir associat amb d'altres objectes en el nivell arqueològic que hom pretén datar. El temps transcorregut entre aquests dos moments creix en el sentit següent:

- llavors
- branquetes
- ossos

- anells exteriors d'arbres de vida curta
- fusta d'arbres de vida llarga i carbó procedent d'aquesta fusta
- material susceptible de reutilització
- material de naturalesa desconeguda.

7.3. Contaminació i mescla

Els materials susceptibles de datació, a causa de la seva estada en el sòl, adquireixen per infiltració o penetració altres substàncies carbonades de formació anterior o posterior al material d'interès, i de naturalesa diferent. Aquest fet és una constant en els materials datables i s'anomena contaminació; la contaminació ha de ser eliminada perquè en cas contrari falsejaria el resultat de la datació. L'eliminació de la contaminació és generalment possible per mètodes químics gràcies a la diferent naturalesa química del material datable i els contaminants; els laboratoris apliquen sempre mètodes per eliminar la contaminació.

Un problema similar però de resolució impossible és la mescla de materials datables d'identica naturalesa química però d'edats diferents, produïda per pertorbació dels estrats o en el moment de la presa de mostra. En aquest cas, només l'arqueòleg pot avaluar la probabilitat d'aquesta contingència. La possibilitat de mescla és més gran com més petita és la certesa de l'associació.

Hom pot formar-se un judici assenyat de la fiabilitat d'una data si es disposa de determinacions de les diferents fraccions químiques de la mostra o bé dates de materials associats de naturalesa química diversa o també dates de sèries de mostres del mateix perfil vertical.

8. Calibratge de les dates radiocarbòniques

La dendrocronologia és capaç de proporcionar llargs registres de fusta d'edat exactament coneguda i la datació per radiocarboni d'aquest material ha permès la confecció d'unes corbes que correlacionen les dates radiocarbòniques amb les dates solars corresponents. Aquestes corbes, que avui dia arriben fins als últims 11.390 anys, permeten la transformació de les dates radiocarbòniques, obtingudes mitjançant la datació de materials adequats, en dates del calendari solar. Aquesta transformació rep el nom de calibratge de les dates radiocarbòniques i les corbes que permeten tal transformació s'anomenen corbes de calibratge. Cal tenir present que el calibratge momés és aplicable als materials d'origen terrestre i que és limitada en el temps.

Les corbes de calibratge de què hom disposa actualment són d'alta precisió fins a 7890 BC en el sentit que la incertesa que afecta als punts que les componen és molt petita ja que la data radiocarbònica s'ha obtingut a partir de mostres de grans dimensions en laboratoris d'alta precisió. Les corbes són també d'alta exactitud en el sentit que cada punt és el resultat de mesures contrastades dutes a terme per laboratoris diferents per tècniques de mesura

diferents⁵ (comptadors proporcionals i de centelleig líquid) sobre mostres de fusta de la mateixa edat però d'origen geogràfic diferent (STUIVER, REIMER, 1993), la qual cosa garanteix l'aplicabilitat a tot l'hemisferi nord.⁶ Entre 7890 i 9400 BC la corba de calibratge és el resultat de les mesures d'un sol laboratori (KROMER, BECKER, 1993) realitzades sobre arbres alemanys datats dendrocronològicament.

Quan la dendrocronologia és incapaç de proporcionar materials d'edat coneguda susceptibles de datació per radiocarboni, hom recorre a la datació de coralls, la datació mitjançant U/Th dels quals subministra la data en cronologia solar (BARD et al., 1993). D'aquesta manera les corbes de calibratge poden estendre's fins a 20.000 BC, però amb una resolució i una precisió més petita que la corresponent al tram dendrocronològic.

Les corbes de calibratge poden observar-se a dos nivells: a nivell global, és a dir per a llargs períodes de temps, i a nivell restringit, per a curts períodes de temps. L'observació a nivell global revela les tendències generals de la corba de calibratge i les relacions entre l'escala cronològica radiocarbònica i l'escala cronològica solar. La fig. 3 mostra a nivell global la corba de calibratge per als últims 10.000 anys; en ordenades es representa l'escala cronològica radiocarbònica i en absisses l'escala cronològica solar en sentit retrògrad i amb origen a l'any 1950 dC. Com a tret més característic pot observar-se que ambdues escales cronològiques no són equivalents, ja que si ho fossin, la correlació entre elles vindria donada per la línia recta. S'indica a més el nombre d'anys solars que correspon a cadascun dels deu primers mil·lennis de l'escala radiocarbònica. De l'observació d'aquesta gràfica pot concloure's, *a més, que ambdues escales cronològiques no són equivalents, que la unitat cronomètrica radiocarbònica, l'any BP, no és equivalent a l'any solar i, a més, que l'any BP no es manté constant al llarg del temps.* Pot observar-se, així mateix, que des del cinquè mil·lenni BP les edats expressades en l'escala radiocarbònica són més de 500 anys més petites que quan són expressades en l'escala solar.

L'observació a nivell restringit de la corba de calibratge (fig. 4) mostra que està fortament estructurada ja que presenta cims i valls la qual cosa estableix una relació no unívoca entre l'escala radiocarbònica i l'escala solar en el sentit que a una data radiocarbònica pot correspondre més d'una data solar. Així, per exemple, a la data radiocarbònica experimental 4500 BP (Fig. 4) corresponen 5 dates solars.

5. A l'interval comprès entre 5180 i 5500 aC hi ha una diferència sistemàtica d'uns 27 anys entre els resultats de dos laboratoris (STUIVER, PEARSON, 1993) que possiblement es corregirà en una pròxima revisió. Tanmateix, aquesta revisió no afectarà la forma general de les corbes de calibratge.

6. A causa de la major superfície oceànica en l'hemisferi sud, el bescanvi de diòxid de carboni entre l'atmosfera i la hidrosfera és més gran, per la qual cosa la biosfera d'aquest hemisferi és lleugerament deficitària en ^{14}C i les dates radiocarbòniques estan envellides uns 40 anys BP. Per aquest motiu, abans de calibrar les dates radiocarbòniques procedents d'aquest hemisferi, cal corregir aquest efecte restant-hi 40 anys BP.

ESCALA RADIOCARBONICA. UNITAT: "ANY BP"

ORIGEN DE L'ESCALA: 1950 DC (0 BP)

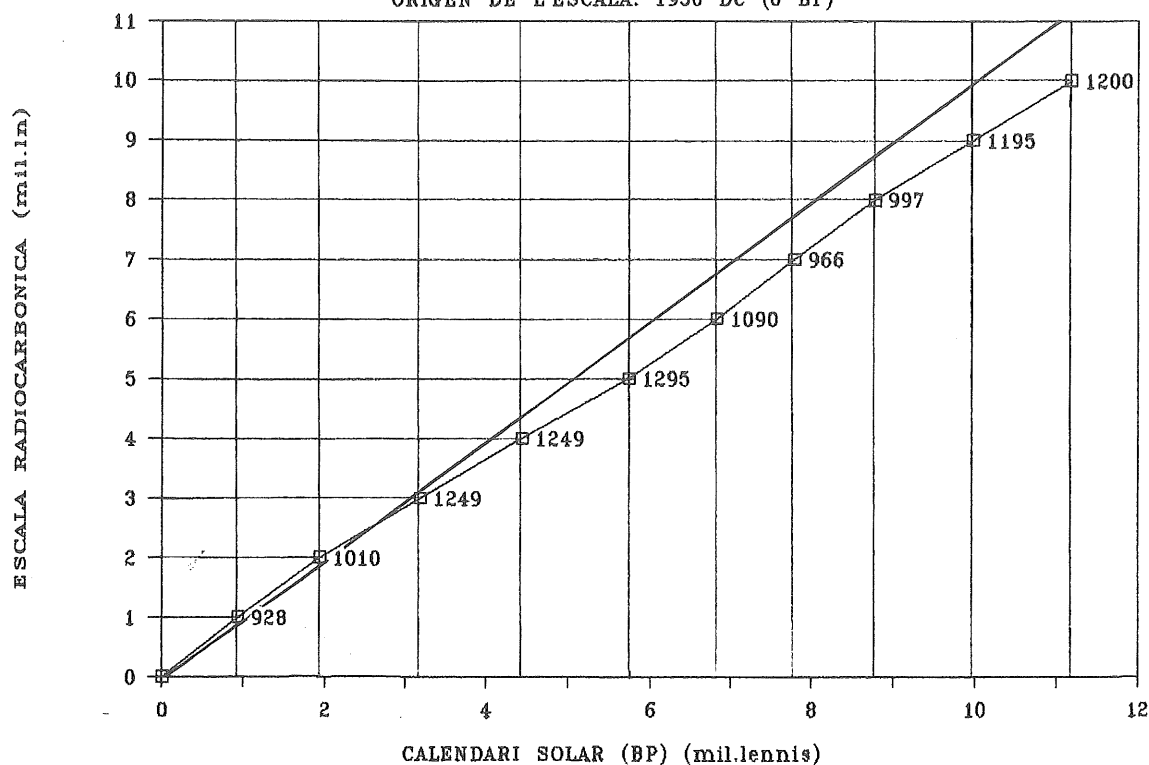


Figura 3. - Forma general de la corba de calibratge per als últims 10.000 anys. Sobre l'eix d'abscisses es representa l'escala cronològica solar en sentit retrògrad i amb origen a l'any 1950 dC (anys solars BP). Sobre la corba s'indiquen el nombre d'anys solars corresponents a cadascun dels 10 primers mil·lennis radiocarbònics.

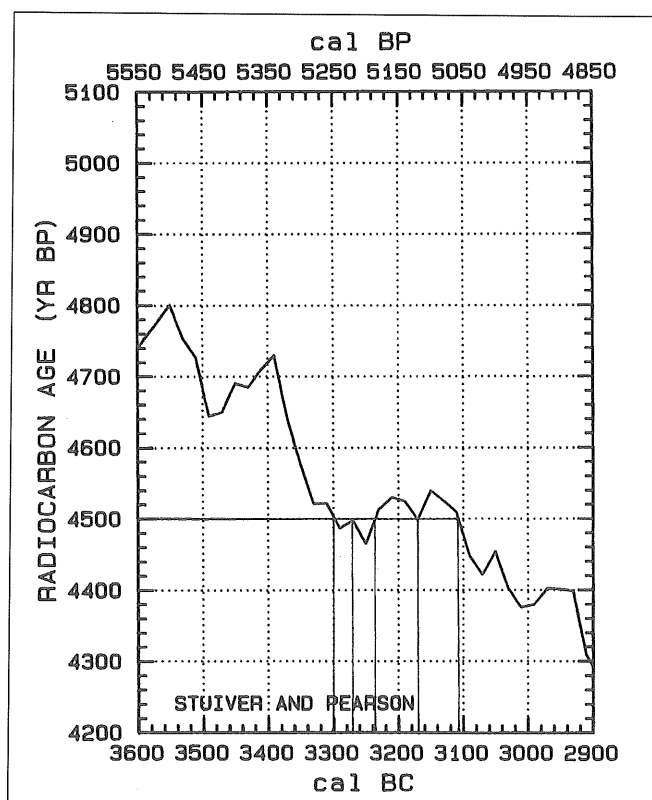


Figura 4. - Tram de la corba de calibratge amb indicació de les dates calibrades corresponents a les interseccions de la data radiocarbònica 4500 BP amb la corba de calibratge.

Per indicar que una data expressada en cronologia solar procedeix del calibratge d'una data radiocarbònica s'utilitza la notació «cal BC» o «cal AD» per al període de temps anterior o posterior al naixement de Crist, respectivament. *També pel fet de ser ambdues escales cronològiques diferents, és vivament desaconsellable la pràctica habitual de subtraure 1950 anys a les dates radiocarbòniques amb la finalitat de expressar-les en cronologia solar cristiana.* L'únic recurs vàlid per transformar una data radiocarbònica en una data solar és el seu calibratge.

El calibratge d'una data radiocarbònica és un procés complicat per dues causes: pel caràcter no puntual sinó probabilístic de la data radiocarbònica, motiu pel qual *la data calibrada tampoc no és puntual sinó que també està associada a una distribució de probabilitat*, i per la forma complexa de la mateixa corba de calibratge. Aquesta es manifesta, tal com ja s'ha vist, pel fet de no ser lineal i a més no establir una correspondència unívoca entre les dates radiocarbòniques i les dates solars. Per aquests dos motius la distribució de probabilitat de la data calibrada no respon a una simple distribució de probabilitat de Gauss, com és el cas de la data radiocarbònica, sinó que és una distribució de probabilitat complexa no associada a cap expressió matemàtica simple coneguda, és una distribució de probabilitat no simètrica i la distribució és diferent i particular per a cada data radiocarbònica.

La fig. 5 mostra, com a exemple, un tram de la corba de calibratge, la data radiocarbònica 5300 ± 50 BP i la distribució de la probabilitat de la data calibrada corresponent. Pot observar-se el caràcter complex d'aquesta distribució i la seva falta de simetria. Cal destacar que la distribució de probabilitat de la data calibrada pot ser multimodal, ja que exhibeix màxims absoluts sobre les dates calibrades corresponents a la data radiocarbònica experimental perquè aquelles són les més probables.

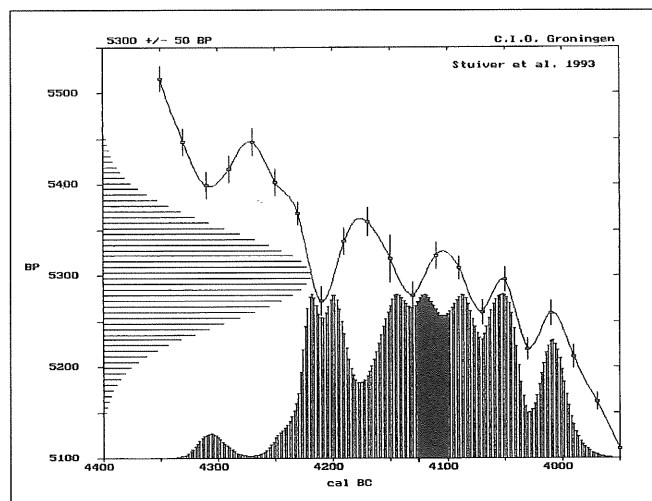


Figura 5. - Tram de la corba de calibratge amb indicació sobre l'eix d'ordenades de la distribució gaussiana de probabilitat corresponent data radiocarbònica 5300 ± 50 BP i sobre l'eix d'abscisses, la distribució de probabilitat de la corresponent veritable data calibrada. L'àrea més fosca indica la probabilitat que la veritable data calibrada caigui dins l'interval cal BC 4100-4150.

Anàlogament a la distribució de probabilitat de la data radiocarbònica, la distribució de probabilitat de la data calibrada delimita un interval de temps en què hi ha una probabilitat no nul·la i calculable que la veritable o veritables dates calibrades es trobin dintre de qualsevol segment de temps inclòs a l'interior de la distribució (fig. 5). La manca de simetria de la distribució de probabilitat de la data calibrada impedeix una expressió tan simple com la de la data radiocarbònica en forma d'un interval definit pel seu valor experimental i la seva desviació típica. Establint un paral·lelisme amb les dates radiocarbòniques, les dates calibrades es representen com intervals al voltant dels màxims de la distribució per a una probabilitat total de 68,3% y 95,4% (VAN DER PLICHT, MOOK, 1989; fig. 6).

Una altra forma útil de representar la distribució de probabilitat de les dates calibrades és la corba de probabilitat integral, perquè permet calcular la probabilitat associada a qualsevol interval de la data calibrada. La fig. 7 mostra la corba de probabilitat integral de la mateixa data calibrada i il·lustra la seva utilització: la probabilitat que la veritable data calibrada estigui continguda en un interval de temps és igual a la diferència de les ordenades corresponents als seus extrems segons la corba de probabilitat. Així per exemple, la probabilitat que la veritable data calibrada caigui en l'interval 4150-4100 cal BC és $60 - 36 = 24\%$.

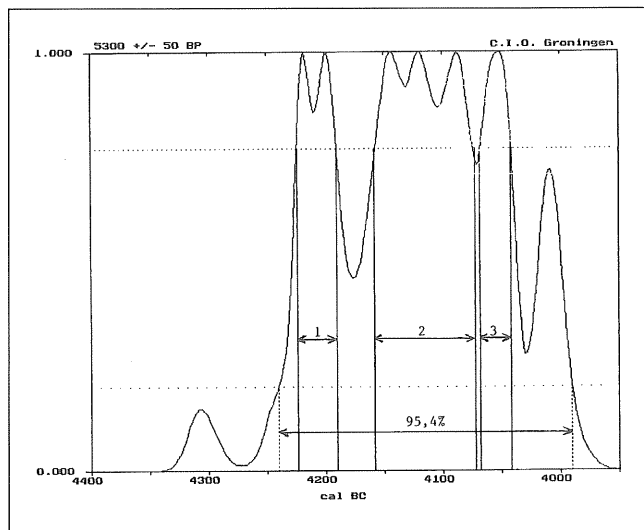


Figura 6. - Distribució de probabilitat de la veritable data calibrada corresponent a la data radiocarbònica 5300 ± 50 BP. Es mostren els intervals centrats en els màxims de la distribució de probabilitat corresponents a un 68,3% de probabilitat (indicats per 1, 2 i 3) i el corresponent a una probabilitat del 95,4%.

8. Aplicacions del calibratge

El calibratge de les dates radiocarbòniques adquireix la seva màxima rellevància en el cas de la utilització de la datació per radiocarboni amb finalitats inductives. De l'estudi d'un conjunt de dates radiocarbòniques relacionades entre si per pertànyer a un mateix fenomen arqueològic de llarga durada pot extreure-se'n conclusions sobre la seva cronologia i sobre la seva durada i aquests resultats poden utilitzar-se posteriorment per correlacionar la cronologia d'aquests fenòmens amb la cronologia d'altres fenòmens relacionats esdevinguts en regions geogràfiques distintes o en la mateixa regió geogràfica. L'estudi pot realitzar-se sobre les dates radiocarbòniques o sobre les dates calibrades generades pel conjunt de les dates radiocarbòniques inicial; tanmateix, la disponibilitat de les actuals corbes de calibratge d'alta precisió aconsella l'ús de les dates calibrades, ja que sense pèrdua de rigor estadístic s'obtenen els resultats expressats en l'escala cronològica solar. Com a exemple, a continuació s'exposen els mètodes per a l'establiment del període de vigència d'una entitat arqueològica i per a l'establiment del període d'ocupació d'un assentament arqueològic.

8.1. Establiment de períodes de vigència

Des del punt de vista arqueològic s'entén per període de vigència d'una entitat arqueològica el període de temps associat al seu registre arqueològic. Si aquest és susceptible de datació per radiocarboni, pot obtenir-se un conjunt de dates radiocarbòniques relacionades entre si pel fet d'estar associades a tal entitat arqueològica i aleshores l'anàlisi del conjunt de les dates pot subministrar informació sobre el període de

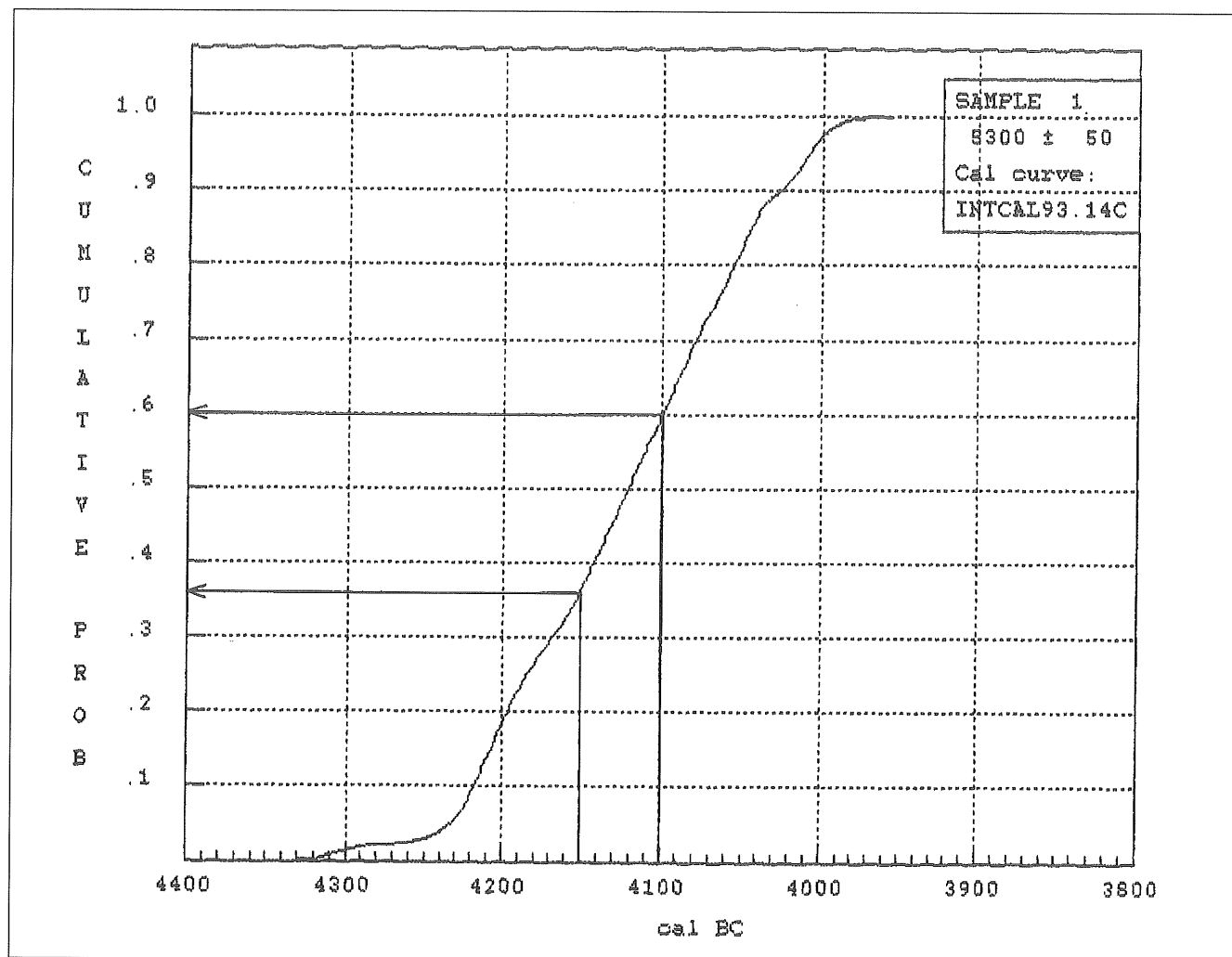


Figura 7. - Corba de probabilitat integral de la data calibrada corresponent a la data radiocarbònica 5300 ± 50 BP i il·lustració de la seva utilització: la probabilitat que la veritable data calibrada caigui en l'interval cal BC 4150-4100 és $60-36 = 24\%$.

vigència de l'entitat arqueològica en qüestió. En primer lloc, és necessari definir des del punt de vista estadístic el període de vigència d'una entitat arqueològica; aquest es defineix com aquell període cronològic en què per a cada petit segment temporal inclòs en el seu interior, hi ha una probabilitat no nul·la que contingui qualsevol de les veritables dates calibrades procedents del conjunt inicial de dates radiocarbòniques.

8.1.1. Càlcul del període de vigència

La manera d'actuar per establir el període de vigència és avaluar la probabilitat que un segment temporal qualsevol contingui qualsevol de les dates calibrades procedents del conjunt de dates radiocarbòniques inicial i procedir d'aquesta manera sistemàticament per a tots els segments adjacents. El càlcul d'aquesta probabilitat es realitza per addició de les probabilitats que cada una de les dates calibrades veritables caigui en el segment considerat i posterior divisió pel nombre de dates radiocarbòniques del

conjunt per normalitzar la probabilitat a la unitat. Així, si P representa la probabilitat que un petit segment determinat contingui qualsevol de les dates calibrades procedents del conjunt de n dates radiocarbòniques i p_i representa la probabilitat que aquest segment contingui la data i , es compleix

$$P = \sum_{i=1}^n p_i$$

L'avaluació de la probabilitat que una data calibrada concreta caigui en un segment temporal determinat es pot realitzar recorrent a la corba de probabilitat integral mitjançant el mètode exposat a l'apartat 7 (fig. 7). Aquest mètode de càlcul és molt laboriós per dur-lo a terme manualment quan hom maneja gran quantitat de dates; afortunadament hi ha programes informàtics que faciliten el càlcul (STUIVER, REIMER, 1993).

El conjunt de segments adjacents amb una probabilitat no nul·la de contenir qualsevol de les dates calibrades procedents del conjunt inicial de dates radiocarbòniques associades a l'entitat arqueològica en qüestió genera una distribució de probabilitat que defineix el seu període de vigència. Com a exemple, la fig. 8A mostra la distribució de probabilitat cor-

7. Com més petit sigui el segment, més precís serà el resultat.

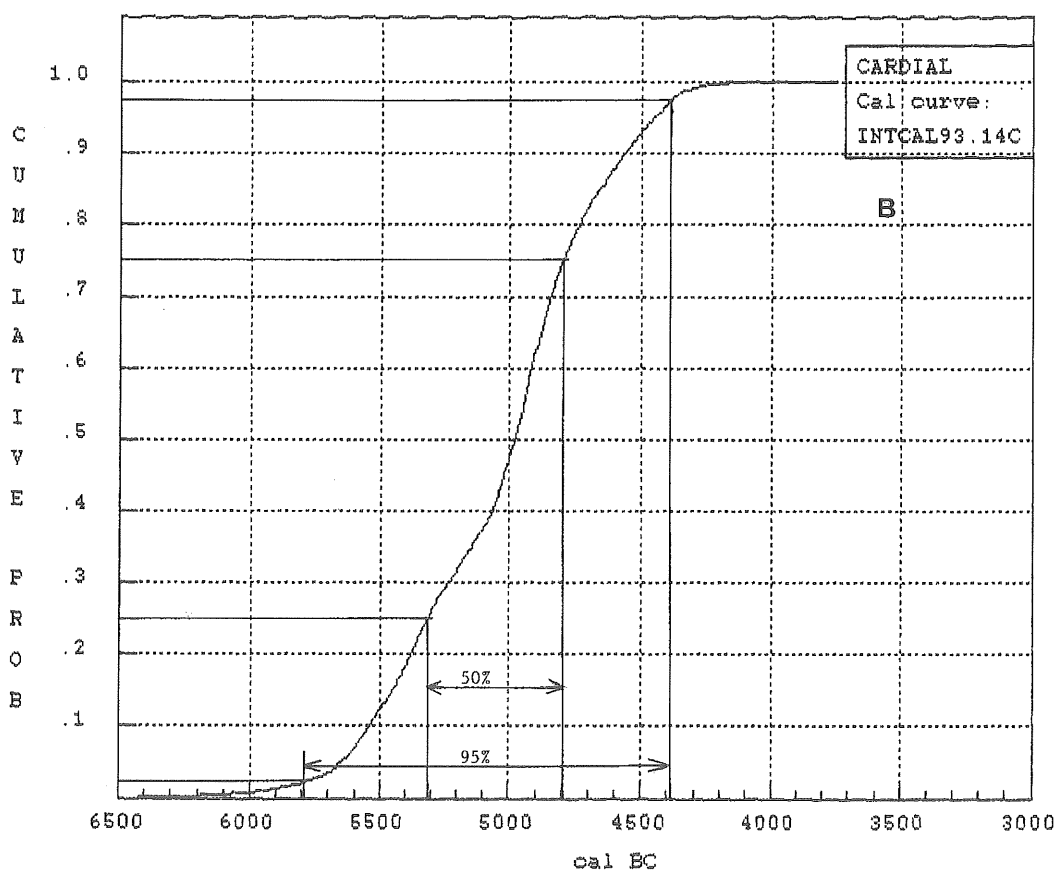
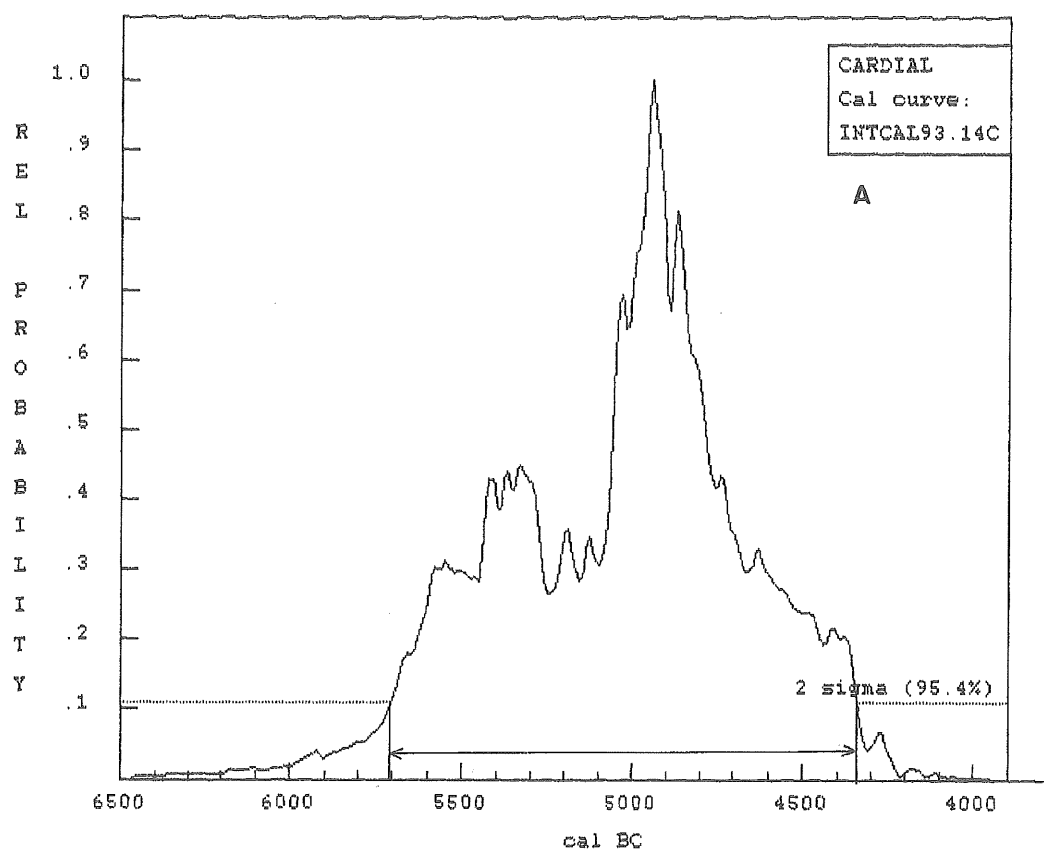


Figura 8. - A) Distribució de probabilitat corresponent al període de vigència de l'estil ceràmic cardial a Catalunya amb indicació del límit del període corresponent a un interval amb una probabilitat del 95,4% centrat al màxim de la distribució.

B) Corba de probabilitat integral corresponent al període de vigència de l'estil ceràmic cardial a Catalunya amb indicació del càlcul dels límits del període corresponents a intervals amb una probabilitat del 95% i 50% centrats a la mediana de la distribució.

responent al període de vigència de l'estil ceràmic cardial a Catalunya.

8.1.2. Representació de períodes de vigència

Encara que el període de vigència així definit és un concepte precís, els seus límits no ho són tant ja que els extrems de la distribució de probabilitat tendeixen a zero molt lentament (fig. 8A) i a més aquesta representació no facilita la visualització de grups de períodes de vigència veïns cronològicament o geogràfica. Per tal de resoldre aquest problema, el període de vigència es representa en forma de bloc horitzontal referit a un eix d'abscisses cronològic i per determinar els seus límits s'han proposat distintes alternatives: a) considerar els límits corresponents al 95,4% de probabilitat de manera anàloga a la del calibratge d'una data única (VAN DER PLICHT, MOOK, 1989; fig. 8A); b) considerar els límits corresponents al període de temps amb un 95% de probabilitat centrat en la mediana de la distribució (PAZDUR, MICHZYNSKA, 1989, fig. 8B); y c) considerar el període de temps cor-

responent al 50% de probabilitat centrat en la mediana de la distribució (OTTAWAY, 1973; AITCHISON et al. 1990, 1991; fig. 8B). La primera alternativa ofereix la possibilitat, quan la distribució de probabilitat del període de vigència presenta màxims relatius prop dels extrems, de presentar «illes de probabilitat» separades de l'interval principal que poden ser poc representatives; la tercera alternativa presenta l'avantatge que l'interval resultant és molt robust (poc afectat pels valors extrems i per la incorporació de noves dates) i a més representa l'interval de temps més prolífic, d'apogeu, plenitud o màxima esplendor (*floruit*) dins del període de vigència, ja que és l'interval de temps on es concentra el major nombre de dates. La fig. 8B mostra la corba de probabilitat integral corresponent al període de vigència de l'estil ceràmic cardial a Catalunya amb indicació del càlcul dels intervals corresponents a una probabilitat del 95% i de l'interval corresponent al *floruit* (50%). Com a exemple de la condensació d'informació produïda per aquests mètodes de representació, la fig. 9 mostra els períodes de vigència dels estils ceràmics corresponents al neolític i calcolític a Catalunya (MESTRES, MARTÍN, 1995).

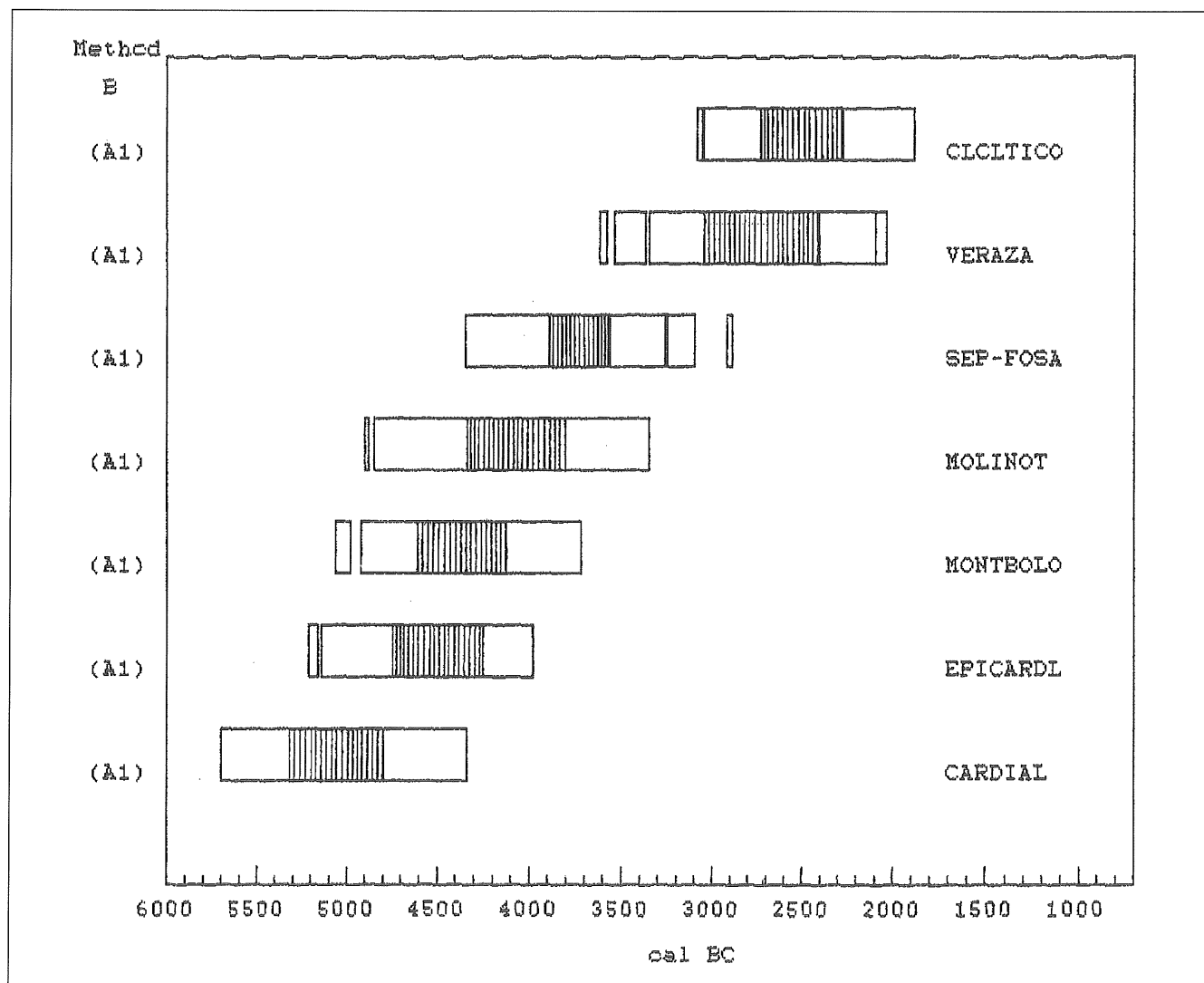


Figura 9. - Períodes de vigència dels estils ceràmics corresponents al neolític i calcolític a Catalunya. Els blocs grans corresponen a intervals amb una probabilitat del 95,4% centrada al màxim de la distribució (poden observar-s'hi les «illes de probabilitat») i la zona ombrejada correspon al *floruit*.

8.2. Establiment de períodes d'ocupació

Anàlogament, si per període d'ocupació d'un jaciment o d'un assentament s'entén el lapse de temps associat al seu registre arqueològic i aquest és susceptible de datació, pot obtenir-se un conjunt de dates radio-carbòniques relacionades entre si pel fet de pertànyer a l'assentament. Aleshores, també pot definir-se el període d'ocupació com aquell període cronològic en què per a cada petit segment temporal inclòs en el seu interior, hi ha una probabilitat no nul·la que contingui qualsevol de les veritables dates calibrades procedents del conjunt inicial de dates radio-carbòniques. La distribució de probabilitat que s'obté (calculada de la mateixa manera que el període de vigència) defineix també el període d'ocupació i de la forma d'aquesta distribució es poden extreure conclusions. Així, si la distribució és inequívocament bimodal o multimodal, hi ha períodes de temps d'alta probabilitat al costat de períodes de baixa probabilitat que poden interpretar-se, sempre que el raonament

arqueològic no ho desmenteixi, com a períodes de baixa activitat o fins i tot d'abandó o desocupació de l'assentament. Com a exemple, la fig. 10 mostra la representació gràfica de 8 dates calibrades procedents del període neolític de la Bòbila Madurell: les quatre inferiors pertanyen a estructures pròpies del neolític mitjà i les quatre superiors a estructures del neolític final (MARTÍN et al.). L'observació visual no indica una clara discontinuïtat en l'ocupació, tanmateix l'estudi del període d'ocupació suggereix una altra interpretació. La fig. 11 mostra la distribució de probabilitat corresponent al període d'ocupació del jaciment on pot observar-se una notable davallada de la probabilitat entre cal BC 2900 i 3300, la qual cosa suggereix un període de temps de desocupació.

En el cas dels períodes d'ocupació, la millor representació en forma de bloc és la corresponent a l'opció a) (apartat 8.1.2; fig. 11) ja que les opcions b) i c) pel fet d'estar centrades a la mediana de la distribució de probabilitat, no poden reflectir els períodes de desocupació (fig. 12).

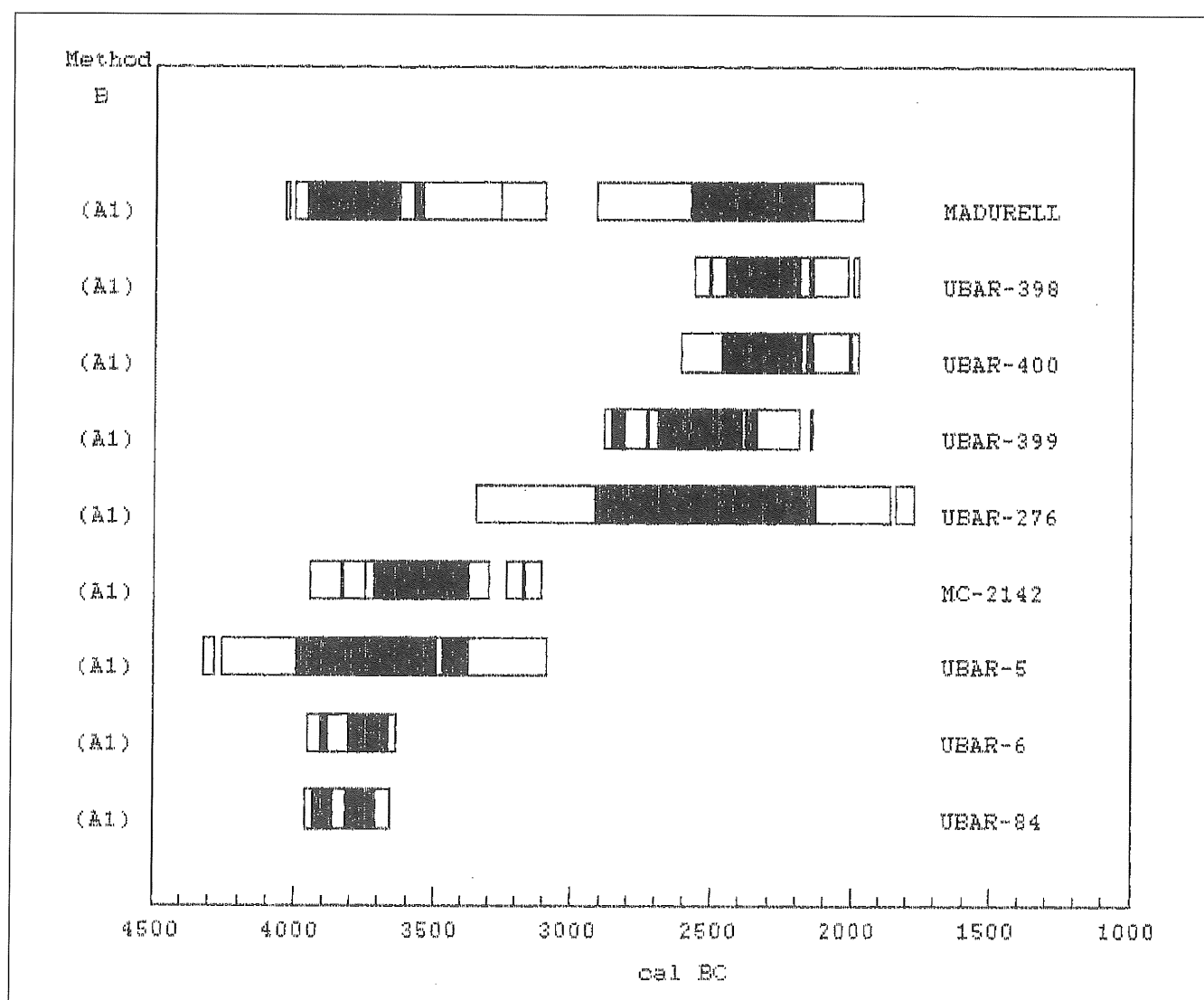


Figura 10. - Dates calibrades de la Bòbila Madurell corresponents al neolític mitjà i final. El blocs grans corresponen a una probabilitat del 95,4% i les zones ombrejades al 68,3%. El bloc superior correspon al període d'ocupació representat mitjançant l'opció a) (vegeu text).

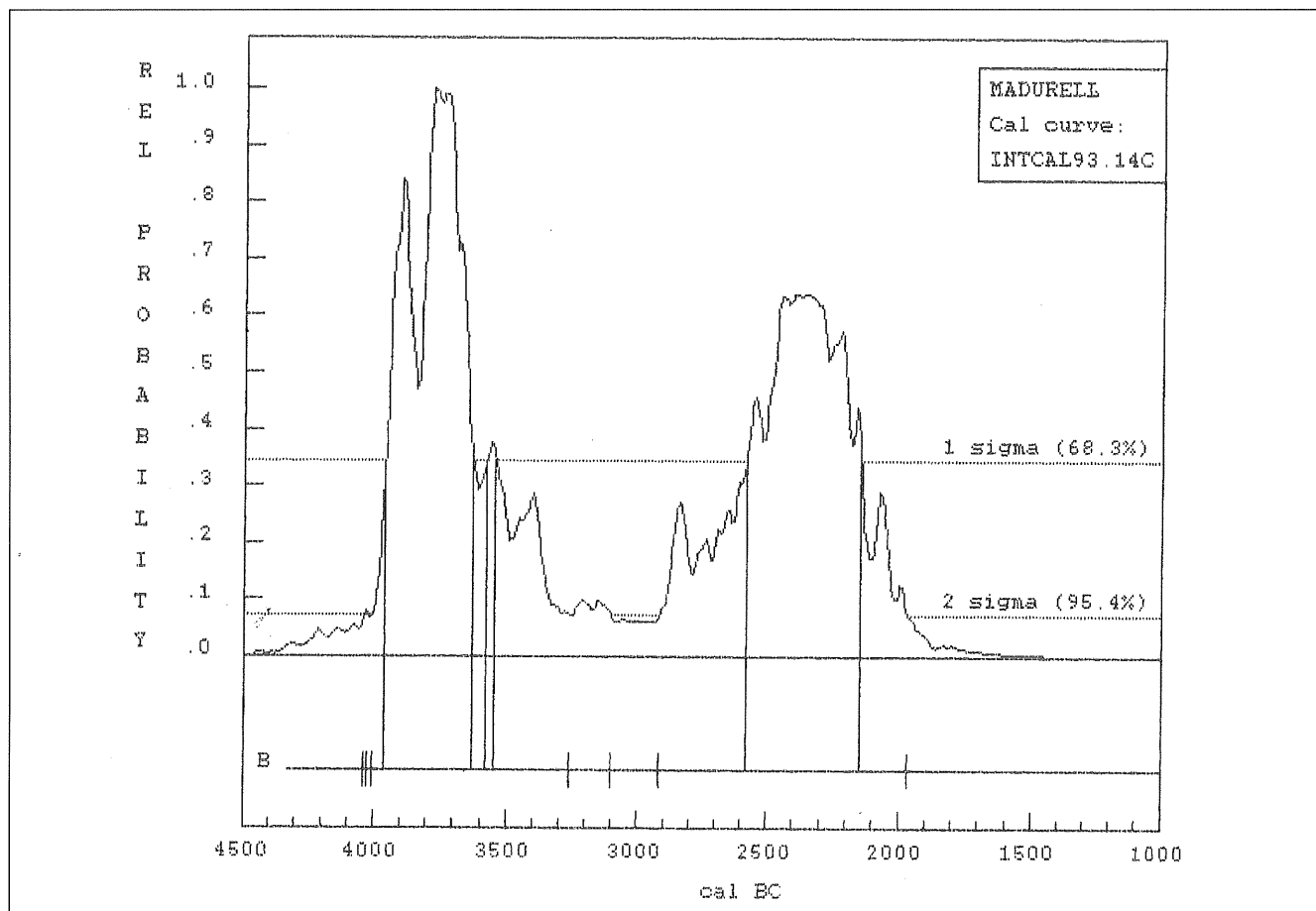


Figura 11. - Període d'ocupació de la Bòbila Madurell corresponent al neolític mitjà i final.

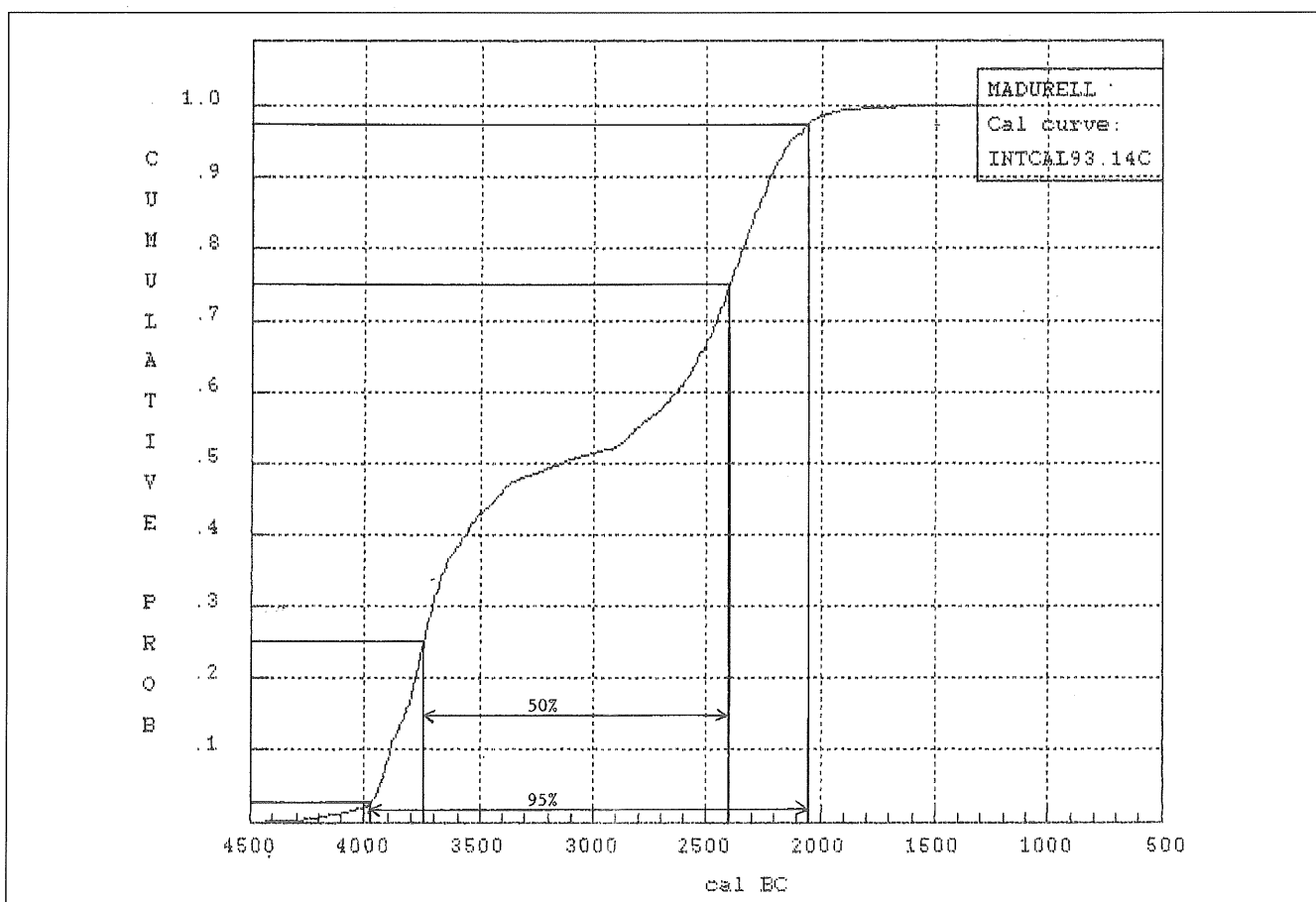


Figura 12. - Corba de probabilitat integral del període d'ocupació de la Bòbila Madurell corresponent al neolític mitjà i final. Pot observar-se que els blocs corresponents als intervals centrats a la mediana de la distribució no reflecteixen el període de desocupació.

Bibliografia

- AITCHISON et al. 1990
Aitchison, T. C., Ottaway, B. S. i Scott, E. M. (1990): «Statistical Treatment of Groups of Related Radiocarbon Ages», *Proceedings of the Second International Symposium ^{14}C and Archaeology. Groningen, 1987*, 95-104. PACT, 29.
- AITCHISON et al. 1991
Aitchison, T. C., Ottaway, B. S. i Al-Ruzaiza, A. S. ^{14}C dates on the historical time scale: with a worked example from the Late Neolithic of Bavaria». *Antiquity* 65, 108-16.
- ARNOLD, LIBBY 1949
Arnold, J. R. i W. F. Libby, 1949: «Age determinations by Radiocarbon content: checks with samples of known age». *Science* 110, 678-680.
- BARD et al. 1993
Bard, E., M. Arnold, R. G. Fairbanks i B. Hamelin, 1993: « ^{230}Th - ^{234}U and ^{14}C Ages Obtained by Mass Spectrometry on Corals». *Radiocarbon* 35(1), 191-200.
- GARCÍA et al. 1992
García, J. F., J. S. Mestres i G. Rauret, 1992: «Comparing Continental Carbonates with Other Materials in Dating a Paleolake». *Radiocarbon* 34(3), 619-625.
- KROMER, BECKER 1993
Kromer, B. i B. Becker, 1993: «German Oak and Pine ^{14}C Calibration, 7200-9400 BC». *Radiocarbon* 35(1), 125-136.
- MARTÍN et al. 1995
Martín, A., A. Bordas i M. Martí, 1995: «Bòbila Madurell (Barcelona). Estratègia econòmica i organització social». Actes del I Congrés del Neolític a la Península Ibèrica, *Rubricatum* 1, en premsa.
- MESTRES, MARTÍN 1995
Mestres, J. S. i A. Martín, 1995: «Calibración de las fechas radiocarbónicas y su contribución al estudio del Neolítico catalán». Actes del I Congrés del Neolític a la Península Ibèrica, *Rubricatum* 1, en premsa.
- MULLER 1977
Muller, R. A., 1977: «Radiocarbon dating with a cyclotron». *Science* 196, 489-494.
- NOAKES et al. 1965
Noakes, J. E., S. M. Kim, i J. J. Stipp, 1965: «Chemical and counting advances in liquid age dating». *Proceedings of the 6th International Conference on Radiocarbon and Tritium Dating*, 68-92. Conf 650652; R. M. Chatters i E. A. Olson.
- OTTAWAY 1973
Ottaway, B. «Dispersion diagrams: A new approach to the display of carbon-14 dates». *Archaeometry* 15, 5-12.
- PAZDUR, MICHCZYNSKA 1989
Pazdur, M. F. i D. J. Michczynska, 1989: «Improvement of the procedure for probabilistic calibration or radiocarbon dates», *Radiocarbon* 31(3), 824-832.
- VAN DER PLICHT, MOOK 1989
Van der Plicht, J. i W. G. Mook, 1989: «Calibration of radiocarbon ages by computer», *Radiocarbon* 31(3), 805-816.
- RENFREW 1973
Renfrew, C. «Before Civilization, the Radiocarbon Revolution and Prehistoric Europe». New York, 1973.
- STUIVER, PEARSON 1993
Stuiver, M. i G. W. Pearson, 1993: «High-Precision Bidecadal Calibration of the Radiocarbon Time Scale, AD 1950-500 BC and 2500-6000 BC», *Radiocarbon* 31(3), 1-24.
- STUIVER, REIMER 1993
Stuiver, M. i P. Reimer, 1993: «Extended ^{14}C Data Base and Revised CALIB 3.0 ^{14}C Age Calibration Program». *Radiocarbon* 35(1), 215-230.
- SUESS 1967
Suess, H. E., 1967: «Bristlecone pine calibration of the radiocarbon time scale from 4100 B.C. to 1500 B.C.» a *Radiocarbon dating and methods of low-level counting*, 143-150. Viena, Agència Internacional de l'Energia Atòmica.
- DE VRIES, BARENDSEN 1954
De Vries, H. i G. W. Barendsen, 1954: «Measurements of age by the carbon-14 technique (Groningen I)». *Nature* 174, 1138-1141.
- WATERBOLK 1983
Waterbolk, H. T., 1983: «The Integration of Radiocarbon Dating in Archaeology». *Radiocarbon* 25(2), 639-644.

Emili Junyent
Joan B. López
Araceli Martín

Universitat de Lleida
Servei d'Arqueologia. Departament de Cultura
Generalitat de Catalunya

Fernán Alonso

Laboratorio de Geocronología
Instituto Rocasolano CSIC Madrid

Pedro V. Castro
Rafael Micó

Universitat Autònoma de Barcelona

Joan S. Mestres

Laboratori de Datació per Radiocarboni
de la Universitat de Barcelona