



## Two Ways to Date Geologic Events

1) relative dating (fossils, structure, cross-cutting relationships): how old a rock is compared to surrounding rocks

2) absolute dating (isotopic, tree rings, etc.): actual number of years since the rock was formed

## GEOCRONOLOGIA

Reconstrucción Climática

Elaboración de la Cronología

Interpretación del "proxy"

## ¿Para qué datar?

- Para conocer la edad de las rocas y los fósiles que contienen
- Para saber la duración de un episodio o un evento particular del registro geológico con la mayor precisión posible
- Para correlacionar un episodio o evento presente en una unidad con otras unidades de otras áreas

## Métodos de Datación

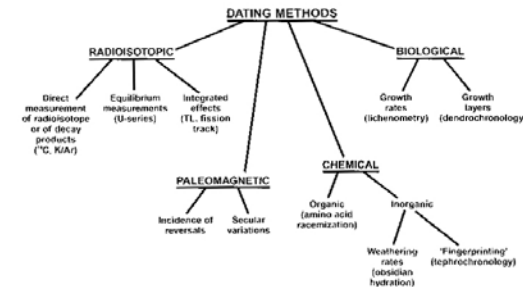
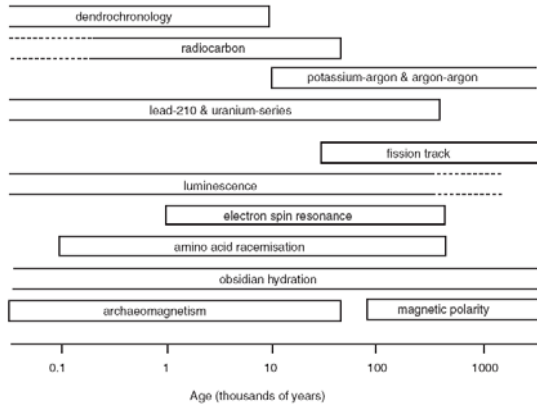


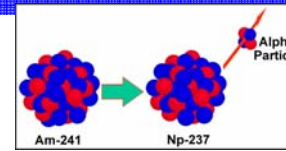
FIGURE 3.1 Principal dating methods used in paleoclimatic research.

Bradley, 1999

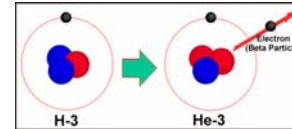
O.B. Lian, R.G. Roberts / Quaternary Science Reviews 25 (2006) 2449-2468



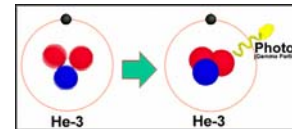
## Tipos Principales de Radioactividad



Radiación  $\alpha$

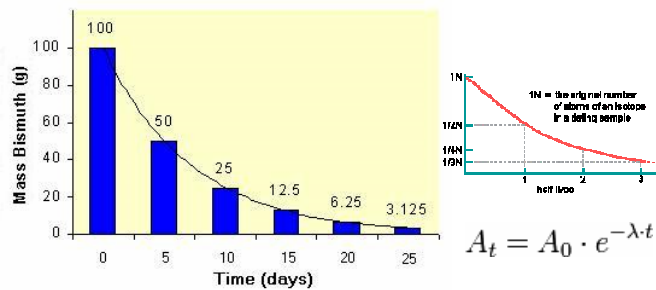


Radiación  $\beta$



Radiación  $\gamma$

## La Vida Media



$$A_t = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

En el caso del  $^{210}\text{Bismuth}$ , en cinco días queda solamente la mitad de los átomos originalmente aislados  $\rightarrow$  vida media son 5 días

\*la otra mitad es ahora  $^{206}\text{Tismuth}$  (isótopo hija)

## Vidas Medias para algunos elementos radioactivos

Radioactive Parent	Stable Daughter	Half life
Potassium 40	Argon 40*	1.25 billion yrs
Rubidium 87	Strontium 87	48.8 billion yrs
Thorium 232	Lead 208	14 billion years
Uranium 235	Lead 207	704 million years
Uranium 238	Lead 206	4.51 billion years
Carbon 14	Nitrogen 14*	5730 years

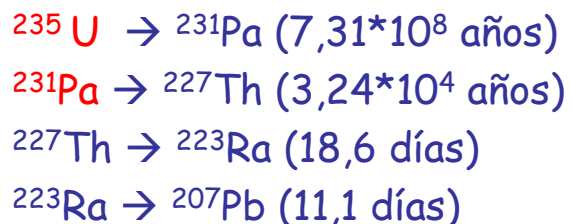
## Las series de Uranio Principios básicos

- 1) Las series de U involucran la descomposición por radiación  $\alpha$  y  $\beta$  de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$  en muchos isótopos "hijos" de muchos elementos diferentes
- 2) Estos isótopos "hijos" son separados de sus "padres" mediante procesos geológicos comunes como erosión química, ppt de minerales en solución mediante procesos químicos y biológicos, adsorción a minerales de arcilla, etc.
- 3) Por lo tanto, las fechas con series de U se aprovechan de las propiedades geoquímicas particulares de cada isótopo "hija"

## La serie $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$

URANIUM 238 (U238) RADIOACTIVE DECAY		
type of radiation	nuclide	half-life
$\alpha$	uranium—238	$4.5 \times 10^9$ years
$\alpha$	thorium—234	24.5 days
$\beta$	protactinium—234	1.14 minutes
$\beta$	uranium—234	$2.33 \times 10^5$ years
$\alpha$	thorium—230	$8.3 \times 10^4$ years
$\alpha$	radium—226	1590 years
$\alpha$	radon—222	3.825 days
$\alpha$	polonium—218	3.05 minutes
$\alpha$	lead—214	26.8 minutes
$\beta$	bismuth—214	19.7 minutes
$\beta$	polonium—214	$1.5 \times 10^{-4}$ seconds
$\alpha$	lead—210	22 years
$\beta$	bismuth—210	5 days
$\beta$	polonium—210	140 days
$\alpha$	lead—206	stable

## La serie $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$



## ¿Cómo funciona?

- a) Se consideran las razones de actividad entre  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$  (0-350.000 años) y entre  $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$  (5.000-150.000 años)
- b) Cuando las series de U se perturban, la razón entre los productos hijos ya no están en equilibrio y si se consideran el grado de equilibrio nuevo alcanzado se puede estimar el tiempo transcurrido
- c) La aparición de TIMS en los mid-80's revolucionó la industria al permitir la medición de masas atómicas en muestras muy pequeñas  $\rightarrow$  últimamente se está usando MC-ICPMS que son extremadamente sensibles

## Daughter Excess

- a) Perturbación del equilibrio ocurre al cambiar las propiedades fisicoquímicas de los productos intermedios
- b) Por ejemplo,  $^{230}\text{Th}$  y  $^{231}\text{Pa}$  son prácticamente insolubles en  $\text{H}_2\text{O}$  y precipitan cuando son producidos a partir de sus padres solubles. Al quedar aislados de su "fuente" siguen decayendo pero ahora sin "soporte" → *daughter excess*
- c) Así, al quedar enterrados, su actividad cae con la profundidad del sedimento de manera lineal y se puede estimar el tiempo transcurrido
- d) Esto tb' se aprovecha en las fechas con  $^{210}\text{Pb}$  al escapar sus "padres" (Ra y Rn) de la superficie de la tierra

## Daughter Deficiency

- a) Otro método → crecimiento de un isótopo que inicialmente se encontraba ausente y que luego crece buscando el equilibrio con su progenitor. En carbonatos que precipitan están recién formados y libres de "hijas"
- b) Suponiendo que el  $\text{CaCO}_3$  permanece como un sistema cerrado → la creciente concentración de  $^{230}\text{Th}$  nos permite estimar el tiempo transcurrido desde su formación.
- c) Ha sido usado con éxito para datar con alta resolución corales, tufas y espeleoformas

## Dos suposiciones claves

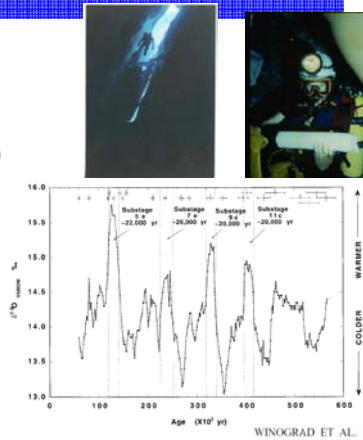
- 1) La actividad inicial de la muestra debe ser conocida → no es un problema en los océanos que tienen una actividad constante de  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 1.14$  pero en lagos y napas es mucho menos robusto
- 2) El sistema tiene que permanecer cerrado a través del tiempo, la recristalización por ejemplo incorpora U nuevamente al sistema y la contaminación por detritos incorpora exceso de Th inicial ( $\neq 0$ )

## Algunos ejemplos destacados

- 1) Cronología del registro de "Devil's Hole" en el SW de Nevada, USA → **aplicación de TIMS**
- 2) Cronología del testigo de sal tomado del Salar de Atacama, II Región, Chile → **series de desequilibrio e isocronos**

## Devil's Hole

- Es un registro obtenido a partir de un testigo subacuático de una pared recubierta con  $\text{CaCO}_3$  (travertina) en una vertiente en el SW de Nevada, EEUU
- Es el único registro continental continuo que cubre los últimos 500 kyr
- Fecha mediante TIMS U/Th



## Salar de Atacama

- Testigo de 104 m de largo de halita tomado cerca del centro del Salar de Atacama por SOQUIMICH
- El testigo cubre de manera continua los últimos 106 kyr y fue fechado mediante U/Th de desequilibrio
- Se usó una corrección mediante isocrona para cuantificar la contaminación por detritos



## Salar de Atacama

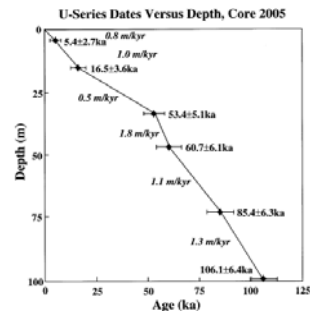
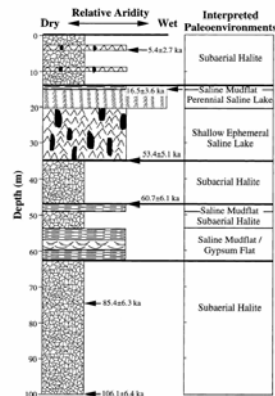
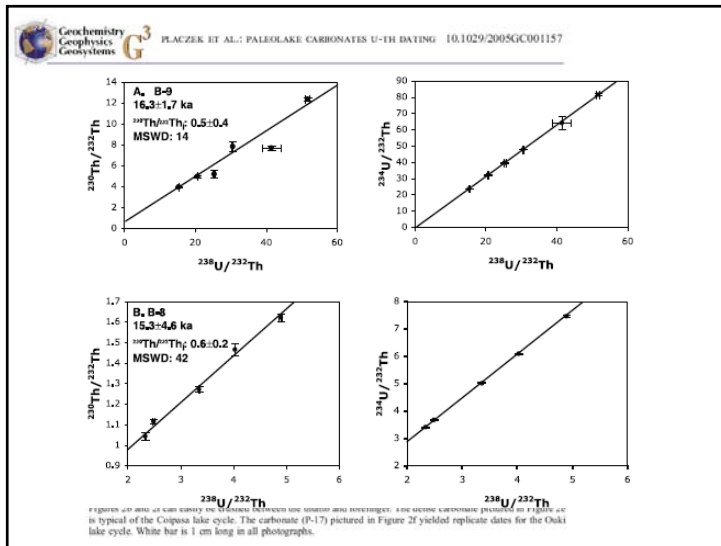
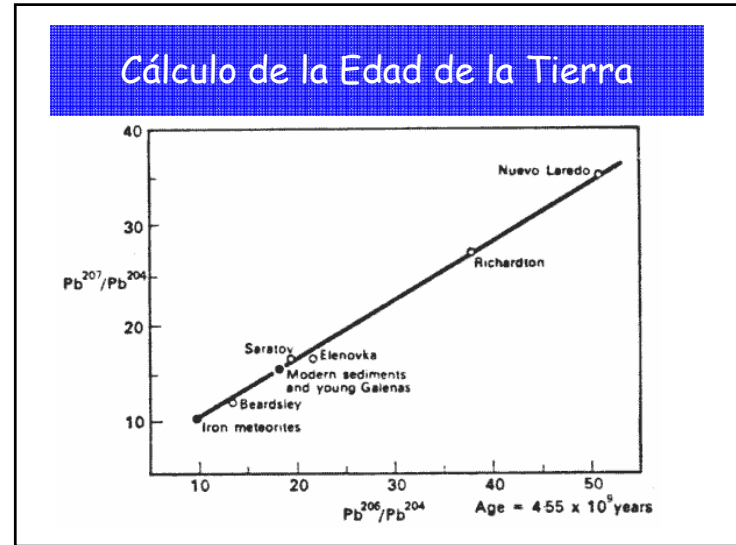
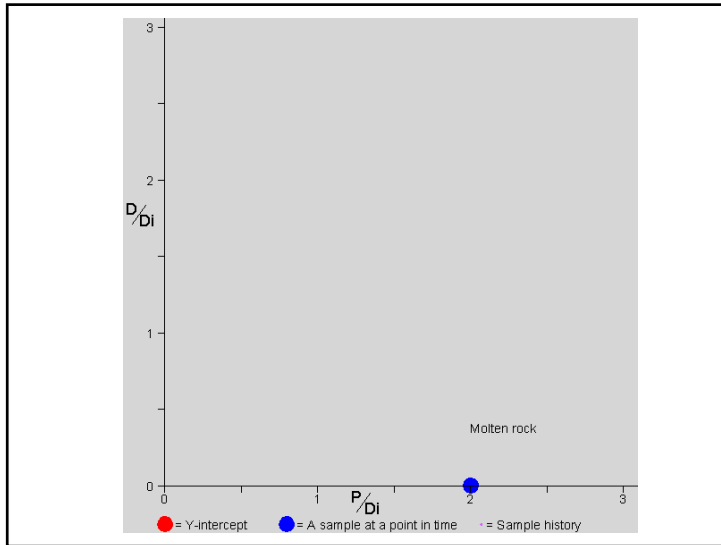


Fig. 4. Age vs depth, core 2005. Horizontal bars indicate the uncertainty of age determinations. Note increasing ages with depth. Sedimentation rates (italicized) calculated assuming constant rates of deposition between dated horizons.

A.L. Bobst et al. / Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 173 (2001) 21–42

## La Isocrona

- Método para validar fechas en rocas con múltiples muestras → la razón de radioactividad entre los dos es siempre constante de modo que las muestras deben caer sobre una línea recta (isocrona)
- Funciona porque es independiente de la cantidad original de isótopos padre o hijos en la muestra,  $T_b$  se puede utilizar para inferir edades de ciertas rocas que al tener un origen común deberían graficar sobre una línea (i.e. la edad de la tierra y el sistema solar)
- Supuestos: 1) obtención de múltiples submuestras de la misma edad, 2) estas contienen diferentes grados de contaminación detrítica, 3) en el caso de U-Th, el sistema ha permanecido cerrado desde su depositación.



### K/Ar Principios básicos

- ✓ K tiene 3 isótopos:  $^{39}\text{K}$ ,  $^{40}\text{K}$ , y  $^{41}\text{K}$ . Solamente  $^{40}\text{K}$  es radioactivo. Este puede emitir una partícula  $\beta$  transformándose en  $^{40}\text{Ca}$ , o adsorber un electrón y pasar a  $^{40}\text{Ar}$
- ✓ Ar es un gas noble (no reacciona con otros elementos) y queda atrapado en la matriz de un cristal una que vez que este se enfría  $\rightarrow$  todo el  $^{40}\text{Ar}$  presente en el mineral es producto del decaimiento de  $^{40}\text{K}$  con una vida media de  $1,31 \times 10^9$  años
- ✓ Problemas  $\rightarrow$  cuando un mineral pierde  $^{40}\text{Ar}$  produce edades demasiado jóvenes o cuando se mete  $^{40}\text{Ar}$  en el mineral y produce edades muy viejas  $\rightarrow$  técnicas de isocronos o fechados con  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

## Fechados de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

- i. Una desventaja de los fechados K/Ar es que los distintos isótopos deben ser medidos en fracciones diferentes de la muestra. Tampoco se puede estimar la cantidad de  $^{40}\text{Ar}$  que se pierde.
- ii. Cuando las muestras se irradian en un reactor nuclear, el  $^{39}\text{K} \rightarrow ^{39}\text{Ar}$  y conociendo la razón entre  $^{40}\text{K}/^{39}\text{K}$  (siempre constante) se puede estimar la edad de la muestra
- iii. Por lo tanto se miden ambas fracciones de Ar de manera simultánea sobre la misma muestra

## Utilización del láser

- a) Realizar una datación de K/Ar sobre una muestra de roca presupone que no hubo pérdida diferencial de  $^{40}\text{Ar}$  por parte de algunos minerales incorporados a la muestra
- b) Al utilizar un láser altamente enfocado, se pueden individualizar y vaporizar granos de minerales que retienen mejor el  $^{40}\text{Ar}$
- c) Se mide una población de cristales mediante una serie de pasos de incrementos de  $T^\circ$

## ¿Cómo se calcula?

La edad de la muestra está dada por la ecuación:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln(J \times R + 1)$$

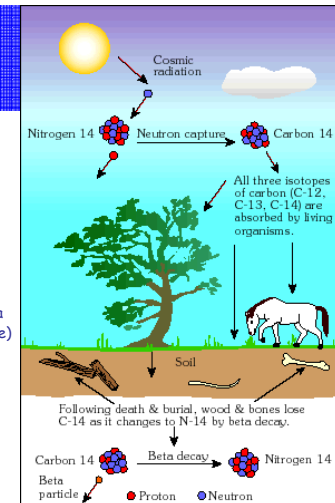
$\lambda$  = constante de radiación

$J$  = parámetro de irradiación (¡ojalá constante!)

$R$  = es la razón  $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$

## Radiocarbono Principios básicos

- 1) Fue desarrollado por W. Libby y sus colaboradores en los años 50 (PN en química en 1960)
- 2) El isótopo radioactivo  $^{14}\text{C}$  es formado en la alta atmósfera por bombardeo de rayos cósmicos (neutrones) sobre isótopos de  $^{14}\text{N}$ . Este gana un neutrón pero pierde un protón pasando a formar  $^{14}\text{C}$
- 3) El  $^{14}\text{C}$  una vez formado revierte a  $^{14}\text{N}$  liberando una partícula  $\beta$  (1 electrón) con una vida media de 5.730 años (Cambridge half-life)
- 4) La atmósfera actualmente contiene una cantidad ínfima de  $^{14}\text{C}$  (1:10<sup>12</sup>)
- 5) Las moléculas de  $^{14}\text{CO}_2$  son luego incorporados a los tejidos vivos de todos los organismos en el planeta.
- 6) El "reloj" radiocarbónico comienza una vez que un organismo muere  $\rightarrow$  su  $^{14}\text{C}$  empieza a disminuir con el tiempo.



## ¿Cómo se calcula?

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left( 1 + \frac{D}{P} \right)$$

where  $t$  is the age of the rock or mineral specimen,  
 $D$  is the number of atoms of a daughter product today,  
 $P$  is the number of atoms of the parent isotope today,  
 $\ln$  is the natural logarithm (logarithm to base  $e$ ), and  
 $\lambda$  is the appropriate decay constant.

$$t(\text{BP}) = -t_{\frac{1}{2}} \cdot \log_2 \frac{N}{N_0}$$

(The decay constant for each parent isotope is related to its half-life,  
 $t_{1/2}$  by the following expression:  $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$ )

La razón normalizada de  $^{14}\text{C}$  se toma como la razón entre la actividad de la muestra y la actividad de "hoy" (i.e. 1950)

Una muestra de 3325 años tiene una razón de  $^{14}\text{C}$  normalizado de 0,668846. Un error de medición en la tercera decimal (0,4%) podría generar una razón entre 0,667846 y 0,669846 lo que se traduce en una edad de entre 3,312 y 3,337 años...

## Los años radiocarbono no son equivalentes a los años calendario

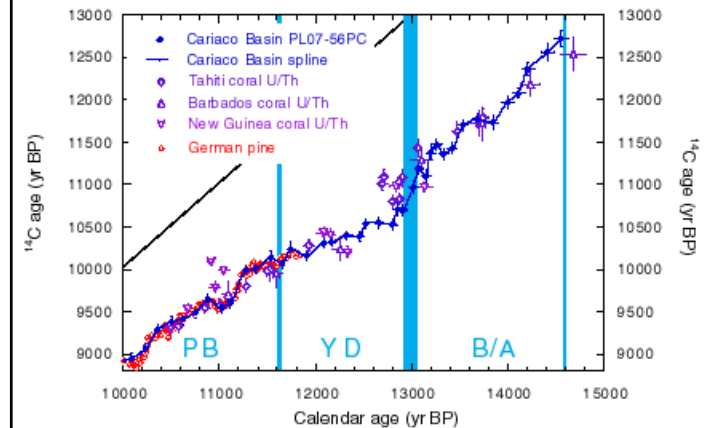
Supuesto inicial  $\rightarrow$  [ $^{14}\text{C}$ ] en la atmósfera no ha variado en el tiempo

Numerosos registros indican que esto no es cierto

¿Cómo hacemos las edades comparables?



## La cuenca de Cariaco ...



Hughen et al., 1998

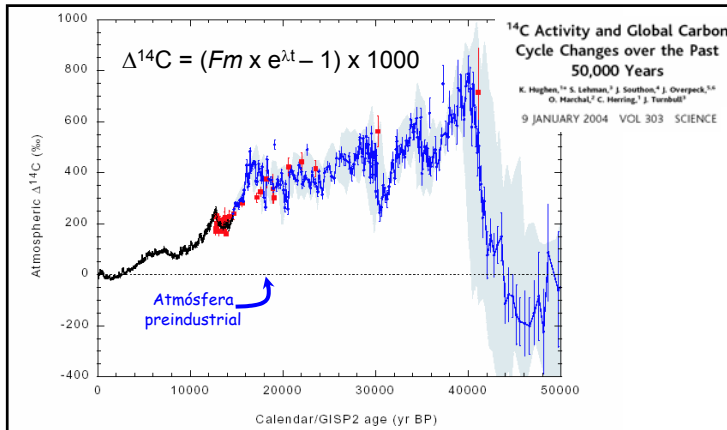


Fig. 3. Atmospheric  $\Delta^{14}\text{C}$  for the past 50 cal. ka B.P. Symbols are the same as those in Fig. 2A. Cariaco error bars represent independent uncertainty in  $\Delta^{14}\text{C}$  due to  $1\sigma$   $^{14}\text{C}$  age error. Light shading shows additional uncertainty in Cariaco  $\Delta^{14}\text{C}$  due to calendar-age error that is not independent from sample to sample, but rather would shift sections of the curve together within the limits of the shading. Dotted line is modern preindustrial atmospheric  $\Delta^{14}\text{C}$ , defined as 0‰. Upper and lower limits were determined by adding and subtracting  $1\sigma$  errors to the calendar age and recalculating  $\Delta^{14}\text{C}$  with the use of the new calendar ages.

## Calibración de fechas de radiocarbono

## La calibración aumenta el rango temporal de una fecha $^{14}\text{C}$

### NEWS & VIEWS

#### PALAEOCLIMATE

## Tree rings floating on ice cores

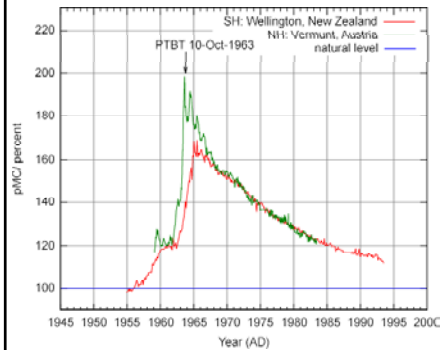
Paula J. Reimer<sup>1</sup> and Konrad A. Hughen<sup>2</sup>

Because of difficulties in creating a radiocarbon calibration that covers the end of the last glaciation, defining the timing and duration of the Younger Dryas cold event has been a challenge. Linking related cosmogenic isotopes in tree rings and ice cores may provide new insights into abrupt climate changes.

1. [www.scripps.edu/~reimer](http://www.scripps.edu/~reimer) (MEX.), 2. [www.scripps.edu/~hughen](http://www.scripps.edu/~hughen)

**Figure 1** Comparison of two calibrations of a hypothetical radiocarbon-dated event. The radiocarbon chronologies based on the floating tree-ring record (red dashed line) and the internationally accepted IntCal04 combined record (blue dashed line) are shown at the top of the figure. Both curves are plotted as uncertainty envelopes ( $2\sigma$ ). A hypothetical event with a measured radiocarbon age of  $10,850 \pm 50$   $^{14}\text{C}$   $\sigma$  (black) is calibrated using the respective calibrations. The potential dates that would be given by the tree-ring time series (red) and IntCal04 (blue) calibrations are shown by the probability distribution functions on the bottom calendar axis. A calendar-dated event (thick black line) that could be obtained from, for example, a UTh-dated speleothem, is shown at  $12,850 \pm 25$   $\sigma$  with gray shading representing the uncertainty ( $2\sigma$ ). Depending on which calibration curve is used, the radiocarbon-dated event could be interpreted as either leading or lagging the UTh-dated event.

## Calibración mediante el "Bomb Peak"



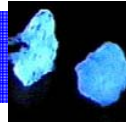
→ Detonaciones nucleares incrementaron enormemente la [14C] y otros isótopos radioactivos en la atmósfera superior

→ Partes de la curva de la "bomba" pueden ser utilizados para calibrar fechas "modernas"

## Otras técnicas de datación

- Fechado por Luminiscencia
- Racemización de Amino Ácidos
- Datación Cosmogénica (PIM)

## Luminiscencia



- 1) Se basa en la acumulación natural de electrones en "trampas" presentes en un cristal (cuarzo, feldespatos) a partir de una matriz radioactiva ionizante
- 2) Estos electrones son liberados con el estímulo (calor, luz, reacción química, presión, radiación ionizante, etc.)
- 3) La cantidad de luz emitido por el cristal al ser estimulado ya sea por calor (termo-) o por luz (óptimamente estimulada) es proporcional al tiempo en que ha estado sometido a radiación ionizante (o de "entierro") → unidad de "Grays"

## Luminiscencia

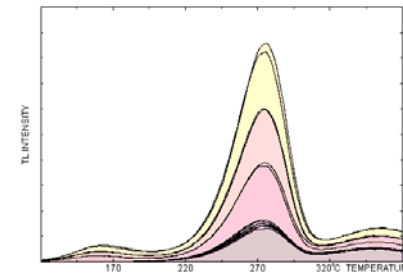
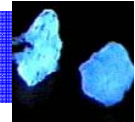
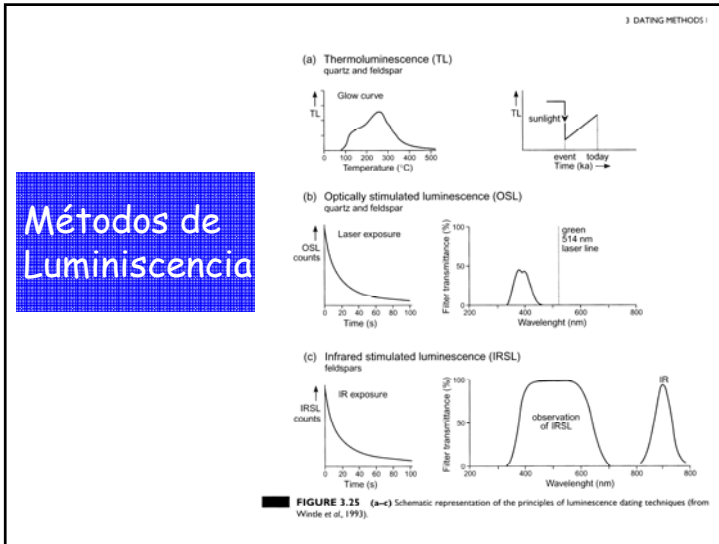
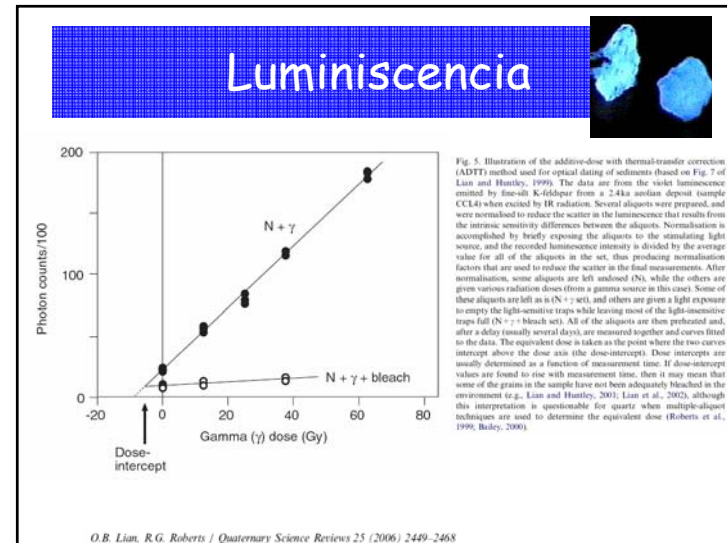
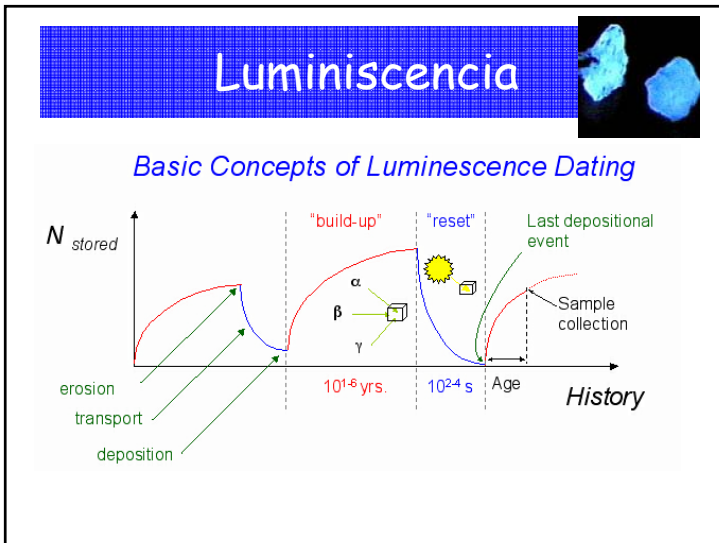


Figure 1. Characteristic glow curves of stalagmitic calcite, showing the growth in the intensity of TL emission produced by exposing the material to increasing amounts of ionizing radiation. Measurements such as these enable the radiation dose received by the sample over archaeological or geological time scales to be determined.



# Luminiscencia

La "dosis equivalente" o "paleodosis" es la cantidad de radiación necesaria para generar la misma luminiscencia original emitida por la muestra

$$\text{Age (a)} = \frac{\text{Equivalent Dose (ED) (Gy)}}{\text{Dose Rate (Gy/a)}}$$


# Luminiscencia

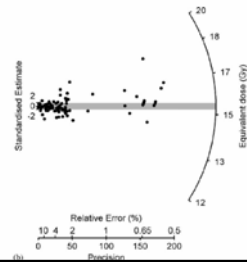
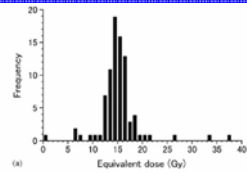
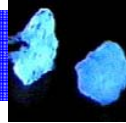


Fig. 8. (a) Frequency distribution (histogram) of the equivalent doses obtained for 86 small aliquots of sand-sized quartz from sample MIT 58.0m, Lake Mungo, southeastern Australia (Bowler et al., 2003). (b) Radial plot of the same data as displayed in (a), where the shaded band is centred on an equivalent dose value of 15.3 Gy, which is the weighted-mean value of all 86 independent estimates. The histogram shows several equivalent doses of >20 Gy, but some of these are measured with poor precision, which is not apparent using this type of data display. With the radial plot, however, each estimate of equivalent dose is shown together with its associated precision: imprecise values fall to the left of the radial plot, whereas values measured with the greatest precision lie farthest to the right. For this sample, equivalent doses measured with relative errors of <1% are distributed over a narrow dose range (14–18 Gy). A further point of interest in the radial plot is the large number of values, of both high and low precision, that falls outside the shaded band. This indicates visually that the data are distributed more broadly than can be accounted for solely on the basis of the measurement uncertainties, and the amount of overdispersion can be determined numerically using the central age model. In this instance, the data are overdispersed for  $13.9 \pm 1.2\%$ , which is a value that falls within the range reported for several other samples of well-bleached quartz. See text for details.

O.B. Lian, R.G. Roberts / Quaternary Science Reviews 25 (2006) 2449–2468

## Major *in-situ* produced cosmogenic nuclides in terrestrial materials

Nuclide	Half-life (yr)	Major targets in terrestrial rocks
$^{14}\text{C}$	5730	O
$^{41}\text{Ca}$	$1.04 \times 10^5$	Ca, Ti, Fe
$^{36}\text{Cl}$	$3.01 \times 10^5$	Cl, K, Ca, Fe
$^{26}\text{Al}$	$7.05 \times 10^5$	Si
$^{10}\text{Be}$	$1.5 \times 10^6$	O
$^{53}\text{Mn}$	$3.7 \times 10^6$	Fe
$^{129}\text{I}$	$1.56 \times 10^7$	Te, Be, Rare Earth Elements
$^3\text{He}$	stable	O, Mg, Si, Fe
$^{21}\text{Ne}$	stable	Mg, Al, Si
$^{36, 38}\text{Ar}$	stable	Cl, K, Ca, Fe