

## La dosimetría termoluminiscente en arqueología

ANGEL DEZA\*, ALVARO ROMAN\*

### RESUMEN

En el fechamiento de cerámicas antiguas por termoluminiscencia (TL), el cálculo de la dosis anual media ( $D_0$ ) absorbida por la cerámica presenta serias dificultades. Una metodología usual es el análisis por activación neutrónica, pero es oneroso y sus resultados no son siempre confiables. En cambio, la dosimetría por TL proporciona los medios para solucionar el problema, llevando a cabo la dosimetría in situ, mediante sustancias termoluminiscentes de gran sensibilidad como el  $\text{CaSO}_4: \text{Dy}$ . Usando esta técnica, se presentan resultados obtenidos para algunos sitios arqueológicos y muestras de cerámicas de la zona de San Pedro de Atacama y Turi. Se informa sobre las ventajas del método y los cuidados necesarios para una correcta determinación de  $D_0$ .

Casi todas las rocas y tierras, salvo extraordinarias excepciones contienen algunas partes por millón (p.p.m.) de materiales radiactivos naturales, tales como uranio, torio y potasio. Estos elementos, por la inestabilidad de sus núcleos atómicos, se desintegran, es decir, emiten en forma espontánea y al azar, sea un núcleo de helio (partícula alfa), sea un electrón rápido (partícula beta), acompañado de la emisión de radiación electromagnética, denominada radiación gamma, análoga a los rayos X, pero en general de mayor energía, y que entre otros recibe el nombre de radiación ionizante.

Al interactuar con la materia, a través de varios efectos, las partículas y la radiación antes mencionada, pueden arrancarle electrones a sus átomos, produciendo iones o provocarle otro tipo de defectos en su estructura cristalina. Al hacerlo, ceden su energía a la materia atravesada o irradiada.

En general, se entiende por dosimetría la medición y evaluación, a posteriori, de la dosis de radiación que ha absorbido la materia o personas que han recibido sea partículas alfa, beta, radiación gamma, cósmica, etc. La medición se efectúa utilizando dosímetros, de los cuales existen una variedad de tipos: electrostáticos, de película fotográfica, termoluminiscentes y otros.

### Dosimetría termoluminiscente

La dosimetría por termoluminiscencia (TL), aprovecha las propiedades de ciertos dieléctricos sólidos que, al recibir radiación ionizante o ultravioleta, atrapan en "trampas" naturales o artificiales de su red cristalina a electrones que fueron liberados por las radiaciones. Estos electrones, pueden ser forzados a centros luminiscentes mediante una adecuada estimulación térmica; en tal caso, se produce una emisión luminosa que es proporcional a la dosis de radiación recibida por el material dosimétrico y que puede ser medida con un montaje experimental de TL.

La dosimetría TL es aprovechada en arqueología en forma amplia. La datación de cerámicas antiguas está basada en la habilidad del cuarzo y de los feldespatos, que están incluidos en la cerámica, para atrapar electrones en las trampas. Luego del último calentamiento de la cerámica, estas inclusiones cristalinas constituyen el dosímetro que permitirá medir la dosis global entregada por la cerámica misma y por el medio circundante (Aitken, 1969: 110-114, Mejdahl, 1970: 147-159).

Para poder datar la cerámica, es preciso conocer no sólo la dosis total absorbida por ella, sino que además, es necesario determinar la dosis que ha recibido por año. Esta última, denominada dosis media anual, puede ser calculada por diferentes medios: cuantificación por análisis físico-químicos de las trazas radiactivas, medida directa de las radiaciones por medio de contadores, etc.

---

\*Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Física, Casilla 6177 - Correo 22, Santiago-Chile.

Sin embargo, la dosimetría TL aparece como una interesante alternativa para medir la dosis anual entregada por las trazas radiactivas contenidas en la cerámica y en el sitio arqueológico en que fue encontrada. Esta técnica puede llevarse a cabo con gran eficacia, gracias a la fabricación, desde no hace mucho tiempo, de sustancias dosimétricas, tales como LiF, CaF<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, y CaSO<sub>4</sub>, todas muy sensibles a radiaciones ionizantes. La introducción en estas sustancias de elementos activadores, como el disprosio (Dy), permite aumentar considerablemente esta sensibilidad. Uno de estos productos, que tiene propiedades muy relevantes, es el CaSO<sub>4</sub>: Dy (Sulfato de calcio activado con disprosio), cuya sensibilidad es veinte o más veces mayor que la de otros productos; tiene un fading (pérdida de información) pequeño, dependiente de la temperatura y del tiempo; se puede reutilizar luego de un tratamiento simple; se puede manipular en forma de polvo o en láminas de teflón, en las cuales se ha extruido el CaSO<sub>4</sub>: Dy. Estos dosímetros son muy adecuados para dosimetría ambiental o de terreno y tienen un rango útil que va desde 0,1 mrad hasta aproximadamente 10<sup>5</sup> rad.

Para medidas en los sitios arqueológicos, conviene colocar, en el "mismo" sitio donde se encontró la muestra, pequeños frascos estancos a la luz, en cuyo interior se introducen varios dosímetros (cuatro o más) para la medida de la dosis del terreno y un número semejante de dosímetros, previamente irradiados en el laboratorio con una dosis conocida, para el estudio del fading. Al trasladar los dosímetros desde y hacia el laboratorio se debe portar otro conjunto de ellos, para evaluar la irradiación en tránsito por radiación cósmica y/o por eventuales exposiciones a radiación en aeropuertos, viajes aéreos u otros controles de seguridad. Debe evitarse exponer los dosímetros a la luz o a temperaturas mayores que la ambiental.

La colocación de los dosímetros en el sitio arqueológico, tal como se ha indicado, es una utopía. Deberá tratarse de ubicarlos en forma tal que queden a la misma profundidad que la pieza encontrada y cubrirlos con el "mismo" material que había antes de la excavación y, en lo posible, a una profundidad mínima de 40 cm.

Es conveniente dejar los dosímetros en el sitio durante un tiempo de, al menos, un mes. El ideal sería dejarlos un año, para que estén sujetos a las variaciones climáticas de las cuatro estaciones.

En cuanto a la dosimetría en cerámicas, la dosis anual, debida a las trazas radiactivas contenidas en ellas, puede determinarse por distintas vías: a) mezclando polvo de CaSO<sub>4</sub>: Dy con cerámica molida (previamente calentada a 500 °C) y utilizar esta mezcla como dosímetro y fuente simultáneamente; b) el mismo procedimiento anterior, pero aislando el polvo de CaSO<sub>4</sub>: Dy por técnicas de flotación; c) adosando a la cerámica dosímetros de CaSO<sub>4</sub>: Dy - teflón; d) introduciendo los dosímetros de CaSO<sub>4</sub>: Dy-teflón dentro de polvo de cerámica (Aitken, 1968: 369-78; Mejdahl, 1969: 99-104). Las medidas de las dosis a que fueron expuestos los dosímetros deben efectuarse después de un tiempo de exposición, en lo posible no inferior a 15 días. Las correcciones por radiación cósmica y por fading deben tenerse en cuenta.

## Resultados

La dosimetría TL descrita anteriormente, ha sido aplicada en un conjunto de sitios arqueológicos de la Segunda Región de Chile y a tres muestras de cerámica de la misma región. Las medidas se realizan utilizando un equipo lector TL HARSHAW modelo 2000 A-B, provisto de un fotomultiplicador enfriado, un horno de calentamiento un amplificador e integrador de corriente, un programador de temperatura-tiempo y equipo electrónico auxiliar. Para evitar señales de TL espúreas, se trabaja en el horno con un ambiente inerte de nitrógeno y contenedores de platino. La calibración, lectura instrumental versus dosis, se ha llevado a cabo irradiando los dosímetros con fuentes radiactivas patrones, adquiridas a New England Nuclear y que tienen un error total de ± 4,2%.

### *Dosimetría en sitios*

Cinco dosímetros de CaSO<sub>4</sub>: Dy, en polvo, fueron colocados a 50 cm. de profundidad en tres sitios de la zona de San Pedro de Atacama: Quito, Toconao Oriente y Patio del Museo Arqueológico R.P. Le Paige. Luego de 22 días de entierro en los sitios mencionados, tres de ellos fueron retirados. Al cabo de un año se sacaron los otros dos, enterrados durante ese lapso

en los sitios Quitor y Toconao Oriente. Esta última operación tiene gran importancia para comparar la dosis acumulada por los tres primeros dosímetros y estos dos últimos, que permanecieron en la región, sometidos a las variaciones climáticas ocurridas durante el año. Los resultados obtenidos para cada uno de estos sitios, se muestran en la Tabla I. Ellos corresponden la dosis de radiación gamma a 50 cm. de profundidad, debida a los elementos radiactivos del terreno (U-238, Th-232 y K-40, principalmente).

En la misma Tabla I, se ha incluido la dosis anual gamma del sitio Turi. A diferencia de las ya mencionadas, ésta se realizó con dosímetros de  $\text{CaSO}_4$ : Dy-teflón, TELEDYNE, enterrados a 95 cm de la superficie, durante ocho días.

#### *Dosimetría en cerámica*

Dos metodologías diferentes se han utilizado para determinar la dosis beta anual en cerámicas. Una de ellas consistió en mezclar el fragmento de cerámica molida con dosímetros de  $\text{CaSO}_4$ : Dy-Teflón, TELEDYNE. Este procedimiento fue aplicado a una muestra del sitio Toconao Oriente. Los dosímetros permanecieron en el polvo de cerámica durante 30 días separados del ambiente por un blindaje adecuado y la dosis acumulada fue determinada por los procedimientos ya descritos.

La dosimetría beta de dos cerámicas del sitio Turi, fue realizada con la metodología propuesta por Mejdhal (Aitken, 1974), adosando directamente a cada objeto, los dosímetros TELEDYNE, tanto en la parte interior como en la exterior de las cerámicas. Luego de 17 días de exposición, la dosis de radiación acumulada fue medida siguiendo los procedimientos corrientes de dosimetría TL. La Tabla II indica los resultados de las dosis beta, extrapoladas a un año, para las tres muestras estudiadas.

#### *Corrección por fading*

En la determinación de todas las dosis anuales informadas en este trabajo, se ha tenido en cuenta la corrección por factores del efecto fading. Estos se han estimado por informaciones de los fabricantes de los dosímetros (HARSHAW y TELEDYNE) y/o por medidas efectuadas en nuestro laboratorio. Dichas estimaciones figuran en la Tabla III.

Tabla I

#### DOSIMETRIA GAMMA DE SITIOS ARQUEOLOGICOS DE LA SEGUNDA REGION DE CHILE

Sitio	Dosímetro	Profundidad	Tiempo exposición	Dosis (m rad/año)
Toconao Oriente	$\text{CaSO}_4$ : Dy (polvo)	50 cm	22 días	145 ± 5
Toconao Oriente	" "	50 cm	1 año	142 ± 3
Quitor	" "	50 cm	22 días	165 ± 5
Quitor	" "	50 cm	1 año	152 ± 8
Patio Museo	" "	50 cm	22 días	170 ± 5
Turi	$\text{CaSO}_4$ : Dy (teflón)	95 cm	8 días	127 ± 6

Tabla II

#### DOSIMETRIA BETA DE CERAMICAS DE LA SEGUNDA REGION DE CHILE (Dosímetros $\text{CaSO}_4$ : Dy-teflón, Teledyne)

Muestra	Tiempo de exposición	Dosis (mrad/año)
Toconao Oriente	30 días	110 ± 10
Turi-1	17 días	124 ± 10
Turi-2	17 días	130 ± 10

Tabla III

FACTOR DE CORRECCION POR "FADING" EN  $\text{CaSO}_4 \cdot \text{Dy}$ 

Tiempo de exposición	Fading
8 días	0,53%
17 días	1,13%
22 días	1,50%
30 días	2,00%
1 año	21,00%

**Discusión de resultados y conclusiones**

Los resultados obtenidos para los sitios Toconao Oriente y Quito (Tabla I) son coherentes, dentro de los límites de errores experimentales, para los diferentes tiempos de exposición (22 días y un año). No obstante, nuestra experiencia nos ha mostrado que los dosímetros en polvo absorben humedad del ambiente, pese a estar en envases estancos. Esto acarrea dificultades en las medidas de TL en el laboratorio: durante el calentamiento parte del polvo dosimétrico se pierde y la lectura instrumental es menor que la real. Lo anterior, unido al efecto de fading, puede explicar las pequeñas diferencias en los resultados de la dosis anual gamma de estos dos sitios.

Los hechos mencionados sugieren entonces, la utilización de dosímetro extruidos en teflón, a fin de evitar el problema creado por la humedad en los dosímetros en polvo.

Es interesante comparar los resultados de la Tabla I con los que se derivan del contenido de trazas radiactivas en uno de los sitios estudiados. Una muestra de tierra del sitio Toconao Oriente fue sometida a análisis por activación neutrónica en el Centro Nuclear de La Reina Santiago. Con la información de este análisis y la Tabla de Bell (1979, 243-245), se ha calculado la dosis anual gamma (Tablas IV y V) y como puede observarse, es menor en algunas decenas de mrad/año que la dosis medida por dosimetría TL. Esta discrepancia puede atribuirse, entre otros factores, al hecho de que las medidas de trazas radiactivas por activación neutrónica se llevan a cabo con unos pocos gramos de muestra, que en el caso del terreno, contrario al de la

Tabla IV

DOSIS ANUAL EN mrad/ PARA 1 p.p.m. DE TORIO Y URANIO Y 1% DE  $\text{K}_2\text{O}$   
EN POTASIO NATURAL, SEGUN W.T. BELL (1979)

	Alfa	Beta	Gamma
Serie del torio	73,8	2,86	5,14
Serie del uranio	278,3	14,20	11,48
Potasio natural	-	68,93	20,69

Tabla V

DOSIS ANUAL GAMMA DEL SITIO TOCONAO ORIENTE, A PARTIR DEL CONTENIDO  
DE TRAZAS RADIATIVAS

	Contenido	Dosis gamma (mrad/año)
Th - 232	$11 \pm 0,26$ p.p.m.	$56,5 \pm 1,3$
U - 238	$3 \pm 0,30$ p.p.m.	$34,4 \pm 3,4$
K - 40	$0,023 \pm 0,0009\%$	$0,5 \pm 0,02$
Dosis anual gamma		$91 \pm 5$ (mrad/año)

cerámica, trae consigo una información muy puntual. En cambio los dosímetros globalizan o integran al recibir radiación de todo el medio que rodeaba a la muestra en estudio, proporcionando así una información más fidedigna.

### Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen la colaboración prestada por los arqueólogos Pilar Allende, Victoria Castro, Carlos Aldunate y José Berenguer, quienes tuvieron la gentileza de trasladar y colocar los dosímetros en los sitios estudiados.

Agradecemos también el apoyo de la Dirección de Investigaciones de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DIUC), a través del proyecto de investigación 46/84.

### BIBLIOGRAFIA

- AITKEN, M. J.  
1968 Thermoluminescence of Geological Materials (ed. D. J. McDougal): 369-378. Academic Press, New York.
- 1969 en *Archaeometry*, vol. 11: 110-114.
- 1974 *Physics and Archaeology*, Clarendon Press Oxford, Cap. III.
- BELL, W. T.  
1979 en *Archaeometry*, Vol. 21: 243-245.
- MEJDAHL, V.  
1969 en *Archaeometry*, Vol. 11: 99-104.
- 1970 en *Archaeometry*, Vol. 12: 147-159.