

La Física Aplicada al servicio de la Historia del Arte

María Cecilia Tomasini *

Durante las últimas décadas numerosas técnicas derivadas de la Física aplicada se han puesto al servicio de la Arqueología y de la Historia del Arte. Las aplicaciones de la Física varían desde la datación de piezas arqueológicas por el conocido método del radiocarbono hasta la desinfección de objetos valiosos mediante el tratamiento con radiaciones ionizantes. Entre las aplicaciones más interesantes se encuentra el análisis de obras de arte mediante métodos no destructivos.

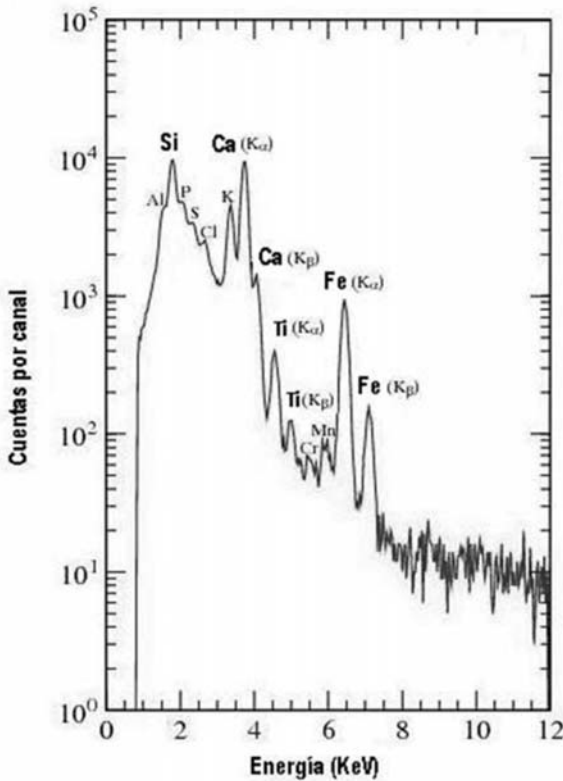
Uno de los métodos de análisis no destructivo que más se ha aplicado en los últimos tiempos es el **método PIXE: Particle Induced X-ray Emission**. El fundamento físico del método reside en la emisión estimulada de radiación X: cuando un haz de partículas incide sobre un átomo, éste es excitado y tiende a volver a su configuración original. Este proceso implica transiciones electrónicas entre diferentes niveles de energía, acompañadas por la emisión de radiación electromagnética en la forma de rayos X. En el método PIXE la muestra a analizar es irradiada por protones procedentes de un acelerador, cuyas energías se encuentran comprendidas en el rango de los MeV. Los protones incidentes golpean a los electrones de la capa interior del átomo (capa K) comunicándoles suficiente energía como para que puedan escapar del campo atractivo generado por el núcleo atómico. Cuando el electrón escapa deja su lugar “vacante”, y la capa interna queda ionizada. Inmediatamente algún electrón de las capas superiores tiende a llenar este lugar, efectuando una transición desde su nivel energético hasta el nivel vacío, de menor energía. Durante la transición libera el excedente de energía bajo la forma de un fotón de rayos X. De esta manera, tal como predice la mecánica cuántica, el átomo tiende a recuperar su configuración más estable. La mecánica cuántica predice también que sólo están permitidas determinadas transiciones. Por lo tanto, la radiación X emitida será característica del elemento irradiado. En otras palabras: observando la radiación X emitida es posible conocer los elementos que componen la muestra analizada.

El método PIXE tiene numerosas ventajas. Una de ellas es su **alta sensibilidad**. En comparación con otros métodos no destructivos de análisis, el método PIXE ofrece un espectro en el que aparecen perfectamente determinados los elementos que componen la muestra, gracias a la formación de “picos” muy bien definidos en

* Docente de la Facultad de Ingeniería - UP y de la Facultad de Ciencias Sociales - UP.

los lugares correspondientes a las energías de emisión de dichos elementos. En este tipo de espectro aparecen graficadas, en ordenadas, las cuentas registradas por el detector; y en abscisas, la energía. El número de cuentas es proporcional a la intensidad de la radiación emitida. Por lo tanto, a mayor intensidad, el pico formado en el espectro será de mayor altura. En la figura puede observarse, a modo de ejemplo, el espectro resultante del análisis PIXE de una muestra. En el mismo aparecen picos muy pronunciados en las energías de emisión correspondientes al silicio, titanio, calcio y hierro, y picos menores en otras energías. Por lo tanto, la lectura del espectro permite determinar la composición de la muestra infiriendo que está formada, mayoritariamente, por estos cuatro elementos. Por otra parte, el análisis PIXE no sólo permite individualizar las diferentes especies atómicas sino que también permite *estimar la cantidad* de las mismas presentes en la muestra. Efectivamente, como ya se ha dicho, la altura del pico –esto es, el número de cuentas– es proporcional a la intensidad de emisión; y la intensidad de emisión es a su vez proporcional a la cantidad de sustancia contenida en la muestra. Por lo tanto, las alturas relativas de los picos son indicativas de las proporciones relativas de los diferentes elementos presentes en la muestra. El estudio permite también *identificar una gran variedad de elementos*. Bajo ciertas condiciones se han podido reconocer elementos comprendidos entre el número atómico $Z=12$ (magnesio) y el $Z=92$ (uranio). Pero probablemente la mayor de las ventajas reside en que *el método no es invasivo ni daña la obra*. En efecto, el análisis se realiza directamente sobre el objeto en cuestión, sin que sea necesario extraer muestras de material ni realizar algún tipo de preparación que pueda afectarlo. En este sentido, y dado que este tipo de estudios se aplica sobre todo a objetos incunables, se han realizado numerosos estudios que demuestran que el método es un análisis no destructivo.¹

1. La autora del presente artículo trabajó en la Comisión Nacional de Energía Atómica en la determinación de radionucleídos por el método de espectrometría gama.



Espectro de emisión de rayos X

La combinación de esta técnica con otras similares, tales como **PIGE** (Particle Induced Gamma-ray Emission), **RBS** (Rutherford Back Scattering) o **XRF** (X-ray Fluorescence) ha permitido a los arqueólogos e historiadores del arte obtener valiosos datos acerca de la procedencia, el estado de conservación y la composición de numerosas piezas. Se han analizado, entre otras cosas, piezas numismáticas, vasos antiguos, joyas, y objetos de pasta vítrea, revelando aspectos desconocidos de las técnicas empleadas en la antigüedad.

Entre las aplicaciones más importantes del análisis PIXE figura el estudio de pinturas y dibujos. En particular, el método se ha aplicado al estudio de aguadas y acuarelas puesto que, debido a su fragilidad, este tipo de obras requiere de análisis sumamente delicados. Los estudios realizados a pinturas y dibujos han permitido conocer, por ejemplo, el tipo de pigmentos empleados por algunos grandes maestros para iluminar u oscurecer diferentes zonas de sus pinturas. También han revelado la composición de los lápices empleados en sus bocetos, de las tintas utilizadas en sus aguadas y de los barnices aplicados para protegerlas. La aparición de diferentes elementos en una misma región de la obra ha permitido, asimismo, descubrir la superposición de diferentes

capas de pigmento aplicadas sucesivamente para corregir errores o cubrir imperfecciones. Del mismo modo, ha permitido encontrar dibujos y marcas escondidas en capas inferiores de las obras. La información recopilada a partir de estos estudios no sólo permite conocer las técnicas particulares de cada escuela y de cada artista, y los materiales de uso corriente en épocas pasadas, sino que aporta datos imprescindibles para restauradores y conservadores. A partir de estas técnicas los profesionales del arte pueden conocer detalles muy precisos acerca de la composición de los barnices, pigmentos, y demás sustancias empleadas en la confección de las obras.

Entre las obras que se han analizado mediante la técnica PIXE hay una que merece especial atención. Se trata de la *Madonna dei Fusi*, también conocida como *Madonna of the Yarnwinder*, cuyo original habría sido pintado por Leonardo da Vinci a principios del siglo XVI. De esta obra existen actualmente dos versiones. Una de ellas (*figura 1*) se encuentra en una colección privada en Nueva York, y la otra (*figura 2*) pertenece a la familia del duque de Buccleuch, y se encuentra en el castillo de Drumlanrig en Escocia.



Figura 1



Figura 2

Se ha discutido largamente acerca de la autenticidad de estas dos obras. Los especialistas han sugerido que la primera de las pinturas (*figura 1*) es obra de Leonardo, mientras que la segunda (*figura 2*) habría sido un trabajo dirigido por él, pero ejecutado por sus discípulos. Originalmente la pintura fue encargada por Florimond de Robertet, secretario de estado de Francia. A partir de ciertas cartas de la época se sabe que en los primeros años del siglo XVI Leonardo se encontraba trabajando en la obra. A principios del siglo XX la obra de Nueva York fue transferida desde su tabla original a una tela, con

la finalidad de preservarla. De la comparación con copias previas a la transferencia se sabe que la pintura sufrió modificaciones y restauraciones durante este proceso.

De las dos obras arriba mencionadas, la de Nueva York es la de mejor calidad. Se trata de una pequeña tela de unos 50 x 35 cm. Presenta varias similitudes con la *Virgen de las Rocas* de Leonardo (**figura 3**). Por ejemplo, el rostro de María y la posición de su mano son similares en ambos casos². Por otra parte, el paisaje montañoso, esfumado hacia el horizonte en perspectiva atmosférica, recuerda el fondo de *La Gioconda* y el de *Santa Ana, la Virgen, el Niño y el cordero*.



Figura 3

Sin embargo, estas similitudes, que bien podrían ser obra de un copista virtuoso, no son suficientes para inclinar la balanza en favor de la autenticidad de la pintura. Es entonces cuando se recurre a la objetividad del método científico.

2. Existen dos versiones de la *Virgen de las Rocas*. En este trabajo se incluye la versión que se encuentra en el Museo del Louvre.

Recientemente, en el marco del proyecto Leonardo Universal, la obra fue sometida a numerosos estudios no invasivos, incluyendo el análisis PIXE. Los estudios fueron coordinados por el Opificio delle Pietre Dure y participaron importantes instituciones científicas italianas como el Instituto Nacional de Óptica Aplicada de Florencia y el Instituto Nacional de Física Nuclear.

El análisis PIXE, implementado junto al estudio de radiación gama inducida (PIGE) permitió identificar elementos livianos en diferentes capas de la pintura. Entre otras cosas se hallaron rastros de bistro en la región marrón de las rocas. El bistro es un pigmento pardo amarillento hecho a base de hollín que se encuentra frecuentemente formando parte de ciertas tintas. Esta manera poco usual de pintar las rocas concuerda, según los especialistas, con el interés en experimentar nuevas técnicas que caracterizó a Leonardo da Vinci. También se encontraron importantes cantidades de hierro en las áreas del manto de María próximas a la rodilla. El hierro hallado no pertenece al manto azul de la Virgen puesto que este elemento no formaba parte de los pigmentos azules empleados en aquella época. Por lo tanto, el hierro pertenece a los estratos inferiores de la pintura. En efecto, el hallazgo del hierro reveló la presencia de un objeto –probablemente una cesta– que habría sido pintado y luego cubierto con las capas de pintura azul que forman el manto de María. Finalmente también se encontró blanco de plomo³ en abundancia. Esta sustancia habría formado parte de la imprimación previa a la ejecución de la pintura. Es sabido que Leonardo aconsejaba preparar las tablas cubriéndolas, entre otras cosas, con este compuesto. El hallazgo de este pigmento en las capas profundas de la obra confirma que el maestro, efectivamente, seguía este procedimiento aplicando luego delicadas películas de óleo sobre la superficie blanca. Esta peculiar manera de pintar podría explicar la atmósfera de carácter transparente y luminoso que rodea a los personajes en los cuadros de Leonardo. En síntesis, el análisis PIXE parece confirmar que la obra fue pintada efectivamente por Leonardo puesto que las técnicas empleadas en su ejecución concuerdan con los intereses e inclinaciones del maestro.

A modo de conclusión podemos afirmar que los avances de la Física no sólo han favorecido el desarrollo de la ciencia pura. La Física aplicada, y en particular la tecnología de los aceleradores de partículas, han aportado grandes beneficios a la humanidad y han contribuido, entre otras cosas, a la conservación y al conocimiento más profundo de su patrimonio cultural.

3. Carbonato de plomo, también conocido en la antigüedad como *albayalde*. Este pigmento se usó asiduamente en tiempos de Leonardo y posteriormente se abandonó debido a su toxicidad.

Referencias:

Govil, I. M.; *Proton Induced X-ray Emission – A toll for non-destructive trace element analysis*. Current Science, vol.80, No. 12, June 2001; p. 1542- 1549.

Neelmeijer, C; and Mäder, M.; *The merits of particle induced X-ray emission in revealing painting techniques*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 189 (2002), 293- 302.

Absil, J.; Garnir, H. P.; Strivay, D.; Oger, C.; Weber, G.; *Study of color centers induced by PIXE irradiation*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 198 (2002), 90- 97.

Uda, M; Yoshimura, S.; Ishizaki, A.; Yamashita, D.; and Sakuraba, Y; *Tutankhamun's Golden mask investigated with XRDF*. International Journal of PIXE, Vol. 17, No. 1 & 2; (2007); 65- 76.

Ruiz-Conde, A.; Enrique Margariño, M. E.; Ramirez de Arellano, A.; Tabarea Rodriguez, M. A.; Sánchez-Soto, P. J.; *Aplicación de la técnica PIXE (Particle Induced X-ray Emission) a la caracterización no destructiva de una pieza de ajuar funerario (siglo I d.C.) procedente de una excavación arqueológica (antiguo Hospital de las Cinco Llagas, Sevilla)*. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, Vol. 41, No. 6 (2002), 531- 538.

N. Grassi, A. Migliori, P.A. Mandò and H. Calvo del Castillo, *Differential PIXE measurements for the stratigraphic analysis of the painting «Madonna dei fusi» by Leonardo da Vinci*, X-Ray Spectrometry 34, 4 (2005), 306-309.

P. A. Mandó, M. E. Fedi, N. Grassi and A. Migliori, *Differential PIXE for investigating the layer structure of paintings*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 239, (2005), 71- 76.

