

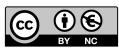
Reproducción experimental del proceso de obtención del pigmento azul egipcio a partir de una muestra de la tumba de Nefertari

Antonio Javier Criado Martín
Inmaculada Delage González

Universidad Internacional de La Rioja – Grupo INVITER

 0000-0003-1886-9575; antonio.criado@unir.net

 0000-0002-2393-1495; inmaculada.delage@unir.net



© del autor y la autora

Recepción: 15/09/2024

Aceptación: 08/03/2025

Publicación: 22/12/2025

Citación recomendada: CRIADO MARTÍN, A. J.; DELAGE GONZÁLEZ, I. (2025). «Reproducción experimental del proceso de obtención del pigmento azul egipcio a partir de una muestra de la tumba de Nefertari». *Faventia*, 47, 7-25. <<https://doi.org/10.5565/rev/faventia.204>>

Resumen

El presente artículo examina el pigmento azul egipcio, considerado el primer pigmento sintético de la historia, a través de una muestra proveniente de la tumba de Nefertari. Se comparó con una reproducción experimental basada en la receta de Vitruvio. Utilizando técnicas como la Microscopía Electrónica de Barrido y la Difracción de Rayos X, se confirmó la concordancia entre la receta antigua y la muestra histórica. La reproducción experimental confirmó los resultados.

Palabras clave: Nefertari; azul egipcio; Vitruvio; análisis multidisciplinar; reproducción experimental

Abstract. *Experimental Reproduction of the Process of Obtaining the Egyptian Blue Pigment from a Sample of the Tomb of Nefertari*

The present article examines Egyptian blue pigment, considered to be the first synthetic pigment in history, through a sample from Nefertari's tomb. It was compared with an experimental reproduction based on Vitruvius' recipe. Using techniques such as Scanning Electron Microscopy and X-ray Diffraction, the consistency between the ancient recipe and the historical sample was confirmed. The experimental reproduction validated the results.

Keywords: Nefertari; Egyptian blue; Vitruvius; multidisciplinary analysis; experimental reproduction

Sumario

- | | |
|--------------------|----------------------------|
| 1. Introducción | 4. Resultados y discusión |
| 2. El azul egipcio | 5. Reflexiones finales |
| 3. Metodología | Referencias bibliográficas |

1. Introducción

El azul egipcio, conocido también como azul pompeyano, es reconocido como el primer pigmento sintético de la historia¹. Fue empleado por las civilizaciones de Egipto y Mesopotamia desde el IV milenio a.C. hasta la caída del Imperio romano², y ha atraído la atención de estudiosos a lo largo de los siglos. A pesar de su temprano uso, no se han documentado referencias escritas sobre él hasta el siglo IV a.C., cuando Teofrasto, prominente discípulo de Aristóteles y su sucesor en el Liceo, lo mencionó por primera vez en su obra *De lapidibus*³. Sin embargo, una descripción detallada de su proceso de elaboración no aparece sino hasta siglos más tarde, específicamente durante el siglo I a.C., cuando Vitrubio lo abordó en su obra *De architectura*⁴.

Esta composición y el proceso para producirla parece olvidarse con la caída del Imperio romano, a excepción de ciertos casos que han suscitado el interés de investigadores modernos⁵, y empieza a atraer la atención científica a finales del siglo XVIII y principios del XIX. Ello se debe al interés que produjo las excavaciones en Pompeya y Herculano, así como a la «egiptomanía» desencadenada por la expedición de Napoleón en Egipto⁶. Dichas empresas arqueológicas revitalizaron el estudio de los murales que mostraban este color, tanto en contextos domésticos —en el caso de Pompeya— como en entornos funerarios —en el contexto egipcio—⁷. Desde entonces, diversos historiadores y químicos europeos se han dedicado a abordar el desafío de analizar y reproducir su ancestral proceso de fabricación⁸.

El presente estudio tiene como objetivo principal caracterizar y reproducir experimentalmente en laboratorio el pigmento azul egipcio, partiendo de una revisión de la literatura más reciente y analizando una muestra de este de la tumba de Nefertari en el marco del *Proyecto de asistencia científico-técnica a la investigación en el desarrollo de nuevos sistemas hiperdurables aplicables a efectos decorativos en materiales de uso arquitectónico* con el Grupo de Tecnología Mecánica

1. DOUMA (2006); EASTAUGH *et al.* (2004); JAKSCH *et al.* (1983).
2. ACETO *et al.* (2020); CORCORAN (2016); MOOREY (1994).
3. EICHHOLZ (1965).
4. SIDDALL (2006).
5. ACETO *et al.* (2020); BREDAL-JØRGENSEN *et al.* (2011); CRIADO *et al.* (2011a); GAETANI *et al.* (2004); MCCOUAT (2018); VASCO *et al.* (2020).
6. CARBÓ (2023); LARGACHA (2024); RODRÍGUEZ (2010).
7. GARCÍA-SÁNCHEZ (2014: 116-23).
8. GODET *et al.* (2022).

y Arqueometalurgia de la Universidad de Complutense de Madrid. Este fue financiado por el Laboratorio de Inspección y Control de Calidad, S.L., durante los años 2011 y 2012. La investigadora principal era la Dra. Laura García Sánchez y el director del grupo el Prof. Dr. Antonio José Criado Portal (1948-2024). De manera paralela también se consultó e interpretó la fórmula que describe Vitruvio de dicho pigmento en su obra *De architectura*, para con todo ello interpretar y reproducir el proceso de fabricación del azul egipcio.

2. El azul egipcio

El color azul ocupa un lugar destacado en la cultura egipcia antigua. Asociado con la regeneración, elemento fundamental de la cosmogonía egipcia, el azul se relaciona con el cielo, lo celestial, la vegetación y el agua; de hecho, el propio dios Amón era representado en azul⁹ y el dios Hapy era asociado con las aguas nilóticas e, incluso, los dominios acuáticos, marismas y lagos de Egipto también se presentaban con este color, como ocurre con las divinidades menores portadoras de ofrendas y, por ende, de regeneración y frescura¹⁰.

Este gusto por el azul lleva a los egipcios a intentar imitar el color de piedras semipreciosas como la turquesa y el lapislázuli, propiciando expediciones a las minas de turquesa en Serabit el-Khadim (Sinaí) o a importar el lapislázuli de tierras tan lejanas como el actual Afganistán¹¹, lo que encarecía el valor de estas rocas. Por ello, para obtener grandes cantidades de pigmento azul, los antiguos egipcios desarrollan métodos para fabricarlo, lo que resulta en el azul egipcio, considerado el primer pigmento sintético conocido¹². La fabricación de este pigmento requiere de métodos avanzados, mediante los cuales los artesanos egipcios funden mezclas de arena, chatarra de bronce y fundentes con cal para obtener el pigmento, no necesariamente a partir de minerales ricos en cobre como la malaquita o la azurita. Algunos autores sugieren la adición a la fundición de restos reciclados de rellenos de cobre metálico o de aleaciones de cobre como los bronce¹³.

La evidencia más temprana del uso de este pigmento se remonta al periodo Predinástico Tardío (3250 a.C.)¹⁴, identificado en un cuenco de alabastro descubierto en Hieracómpolis¹⁵. A partir de entonces su uso se extiende y en la V dinastía (2675-2545 a.C.) aparece, por ejemplo, en la pirámide de Unas¹⁶. Su uso fue incrementándose durante el Reino Medio (2050-1652 a.C.), momento en el que también se desarrolló el pigmento verde egipcio¹⁷, y llegó a su máximo esplendor durante

9. CASTEL (1995: 36-39).

10. RAMOS (2018).

11. DEL CERRO (2009).

12. JAKSCH *et al.* (1983); CRIADO *et al.* (2011b).

13. JAKSCH *et al.* (1983); MIRTÍ *et al.* (1995).

14. LLOYD (2010).

15. CORCORAN (2016).

16. DELAMARE (2013); STULIK *et al.* (1996).

17. PAGÉS-CAMAGNA *et al.* (2010).

el Reino Nuevo (1570-1070 a.C.) en la decoración de las tumbas privadas y reales, entre las que destaca la de la reina Nefertari (QV66)¹⁸.

Nefertari, la principal esposa de Ramsés II, fue enterrada en el Valle de las Reinas¹⁹, ubicado en las colinas tebanas relativamente cerca del Valle de los Reyes. En el Valle de las Reinas se sepultaron las principales reinas, príncipes y princesas de las dinastías XIX y XX (1295-1069 a.C.). El descubrimiento de su tumba (QV 66) en 1904 por Ernesto Schiaparelli²⁰ representa un hito, al revelar una de las más magníficas y mejor conservadas del antiguo Egipto, que proporcionó a los estudiosos una oportunidad única para examinar en detalle su arquitectura y decoración²¹. Desde entonces, esta relevante tumba ha sido objeto de extensos estudios y publicaciones académicas, por lo que su importancia histórica y artística sobresale en el ámbito del arte funerario egipcio²².

La excelencia artística y el minucioso ornamento presentes en la tumba de Nefertari reflejan un profundo respeto hacia la reina y testimonian un compromiso inigualable por parte de los artistas y artesanos egipcios²³. Los colores vibrantes utilizados en las pinturas murales, especialmente el azul egipcio que caracteriza los techos, evidencian un nivel excepcional de viveza y durabilidad, destacando el avanzado dominio técnico de los antiguos egipcios en el campo de la pigmentación y la conservación. Los análisis químicos y físicos llevados a cabo por el Grupo de Tecnología Mecánica y Arqueometalurgia de la Universidad Complutense de Madrid han permitido identificar con precisión la composición exacta de los pigmentos empleados. Estos proporcionan información sobre las técnicas artísticas y el conocimiento científico de la época contribuyendo significativamente a la comprensión de las habilidades técnicas y estéticas de esta antigua civilización²⁴.

Marco Vitruvio Polión (c. 90-20 a.C.) ha pasado a la historia como un destacado ingeniero militar y arquitecto romano cuyo legado se encuentra en su obra *De architectura*²⁵. Este tratado singular fusiona la narrativa histórica sobre la arquitectura y la ingeniería de la Antigüedad con las reflexiones personales del autor y sus consejos especializados en el campo. Esta obra ha emergido como una fuente fundamental para comprender la arquitectura griega y romana y otras disciplinas que van desde la filosofía hasta las matemáticas y la medicina²⁶.

En el *De architectura*, redactado entre el 30 y el 20 a.C., se menciona por primera vez el pigmento azul egipcio, en el libro VII capítulo XI, donde Vitruvio se refiere a él como *coeruleum*. El descubrimiento inicial de este proceso en Alejandría y su posterior organización en la fabricación por Vestorio en Pozzuoli revelan la innovación y el conocimiento tecnológico de la época:

18. EDREIRA *et al.* (2003); GANIO *et al.* (2015); MAZZOCCHIN *et al.* (2003).

19. LLAGOSTERA (2005); TRIGO (2024).

20. TRIGO (2024).

21. BARD (2023: 393).

22. DEL BARRIO (2023); LEBLANC y SILIOTTI (1998); ORNANO (2018).

23. CRIADO *et al.* (2011b); CORZO y AFSHAR (1993); SALEH (1987).

24. CORZO y AFSHAR (1993); TITE *et al.* (1981).

25. OLIVER (1997: 188).

26. CARTWRIGHT (2015).

En Alejandría se halló el primer procedimiento de preparación del azul; posteriormente Vestorio organizó su fabricación en Puzol [Pozzuoli]. El método y los elementos de su composición son objeto de admiración y de asombro. Veamos: se tritura arena con flor de sal mineral formando una mezcla tan fina como la harina; se revuelve bronce de Chipre, limado a partir de gruesas láminas, hasta que se forme una masa compacta; después, frotando las manos se van haciendo unas pelotitas que, una vez bien apretadas, se pondrán a secar. Cuando estén ya perfectamente secas, se colocan en una orza de barro, que introduciremos dentro de un horno: una vez que se haya secado conjuntamente el metal y la arena, gracias a la elevada temperatura del fuego, se produce un intercambio de sus propios vapores con la consiguiente eliminación de sus propiedades. A causa de la fuerza del fuego, se consumen sus características originales y adquieren un color azulado²⁷.

A partir de la descripción de Vitruvio, el pigmento azul egipcio comienza a ser mencionado en otras obras, como la de Cayo Plinio Segundo (c. 23-79 d.C.), más conocido como Plinio el Viejo. Sin embargo, estas fuentes no proporcionan la receta detallada para su elaboración²⁸.

En la actualidad, la arqueología y la arqueometría, indisolublemente unidas, proporcionan nuevos y valiosos datos. Se trata de técnicas fisicoquímicas que miden, analizan y aportan datos e información de restos arqueológicos que no se ven a simple vista²⁹. Desde la década del 2000, se ha incrementado exponencialmente la aplicación de estas técnicas a estudios que conciernen al azul egipcio en diferentes épocas, localizaciones, tipos de muestras y contextos. Este enfoque interdisciplinario ha facilitado una comprensión más profunda de la composición, métodos de producción y uso histórico de este pigmento.

El primer estudio al que se hará referencia es el de Seham Ramadan y su equipo³⁰. Este emplea un enfoque multianalítico para identificar y caracterizar los tipos de pigmentos presentes en dos estelas policromas de piedra caliza del Reino Medio. Se trata de dos funcionarios llamados Henu, hijo de Sobek-Hetep (CG 20212), e Imeny, hijo de Neb-Ieyou (CG 20594). El estudio ha permitido conocer las técnicas de pintura y el estado de conservación de los objetos. Las capas pintadas se han analizado con varias técnicas experimentales como la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), la Fluorescencia de Rayos X (FRX), la Difracción de Rayos X (DRX) y el Espectrofotómetro. Los equipos empleados permitieron hacer análisis precisos de los pigmentos. De esta manera se han detectado azul egipcio, verde egipcio, goethita, hematíes, calcita y negro de humo en las dos estelas. En el caso del azul egipcio, la fotoluminiscencia y las imágenes de luminiscencia inducida por el visible, permiten caracterizarlo fácilmente. De los resultados sobre el azul egipcio los espectros han mostrado altas intensidades de silicio, cobre y calcio, elementos característicos de este pigmento (cuprorivaita).

27. OLIVER (1997: 188).

28. BEARAT (1997).

29. CHAMON *et al.* (2009); CRIADO *et al.* (2009); GARCÍA *et al.* (2011); JIMÉNEZ *et al.* (2004).

30. RAMADAN *et al.* (2022).

El trabajo de Ilia Kovalev y su equipo, publicado en 2023³¹, ofrece una revisión exhaustiva de la evidencia arqueológica relacionada con la producción del azul egipcio al final del cuarto milenio a.C. en Egipto. Los autores identifican diferencias sistemáticas en la evidencia de producción del azul egipcio entre los sitios de la Edad del Bronce Tardío y aquellos de los periodos helenístico y romano tardío. Proponen un modelo que ayuda a distinguir entre los sitios de producción primaria, donde se manufacturaba el pigmento, y los talleres de procesamiento artístico secundario. A lo largo del artículo, se expone la escasez de evidencia directa de la producción de azul egipcio durante periodos significativos de su historia, como la Edad del Bronce Temprano y Medio, así como el periodo medieval. El estudio se centra en la identificación de criterios diagnósticos que faciliten la interpretación de los talleres de producción de este pigmento. Además, se propone una cadena operativa que describe las etapas de producción del azul egipcio, desde la selección de materias primas hasta los procesos de alta temperatura necesarios para su fabricación. Finalmente, se enfatiza la necesidad de realizar investigaciones adicionales para comprender mejor las decisiones y variaciones en los métodos de producción a lo largo del tiempo y en diferentes regiones.

Germain Wiseman y su equipo, también en 2023³², investigaron el análisis de pigmentos en una escultura fragmentaria egipcia utilizando técnicas no invasivas, específicamente espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier en reflexión externa (ER-FTIR) y fotografía de luminiscencia inducida por luz visible (VIL). La escultura, que data de aproximadamente 600 a 300 a.C., es un pequeño cabezal de madera fragmentario conservado en el Museo Canadiense de Historia. Los investigadores identificaron varios pigmentos, incluyendo el azul egipcio, a través de la espectroscopia ER-FTIR, la cual permitió el análisis sin contacto y sin muestreo. Sin embargo, señalaron que la interpretación de los espectros puede ser complicada debido a la reflexión difusa y especular, lo que limita su aplicabilidad para ciertos pigmentos. La fotografía VIL, que combina una cámara de alta resolución con un proceso de apilamiento de enfoques, permitió la identificación y mapeo detallado de partículas de azul egipcio en la superficie, incluso aquellos granos submilimétricos que no son visibles a simple vista. Esto reveló que el pigmento azul estaba incrustado en las capas de pintura, y no como una capa de superficie o revestimiento. A través de estos métodos, se proporcionó nueva información sobre la composición y la distribución de los pigmentos en la escultura, adentrándose en la complejidad de la policromía egipcia y su posible uso intencionado o accidental de mezclas de pigmentos por los artistas. Este enfoque multidisciplinario destaca la importancia de técnicas no invasivas en el estudio del patrimonio cultural.

Por su parte, Abe Yoshinari y su equipo, en 2020³³, muestran los resultados de los análisis que realizaron a las pinturas murales de la tumba de Khonsuemheb. Por las características de las pinturas y la inscripción la datan entre las dinastías XIX-XX del Reino Nuevo (siglos XII-X a.C.). Para la caracterización de la composición

31. KOVALEV *et al.* (2023).

32. WISEMAN *et al.* (2023).

33. YOSHINARI *et al.* (2020).

química de los pigmentos emplearon un método en el que se calcula la abundancia de elementos como peso por unidad de área ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$). Este se basa en la intensidad del pico detectado en el espectro de FRX. Entre otros pigmentos, se detectan el azul y el verde egipcios. Estos dos contienen el elemento cobre como ingrediente principal. Calculando la abundancia por unidad de superficie para el SiO_2 y el CuO presente en los dos, comparan con los resultados obtenidos por Gareth D. Hatton y su equipo³⁴ para muestras de azul egipcio halladas en yacimientos del Reino Nuevo como Amarna, Tebas, Karnak y Zawiyet Umm el-Rakham. Los resultados concluyen que existe una notable diferencia en la composición química de estos dos pigmentos, presentando un mayor contenido en cobre el azul egipcio. Por otro lado, este último trabajo analiza las microestructuras y composiciones químicas de 55 muestras de azul y verde tanto del Reino Nuevo en Egipto como del siglo xv a.C. en Mesopotamia. La técnica experimental empleada fue la SEM. En este caso se reprodujeron estos dos pigmentos en laboratorio obteniendo resultados sobre sus estructuras cristalinas y temperaturas de cocción que determinaron entorno a los 1000°C .

En la Fortaleza de Ayanis en la Anatolia Oriental se estudiaron una serie de tortas azules egipcias³⁵. Las técnicas experimentales empleadas han sido la SEM, la DRX, la micro-Raman (μ -Raman) y la Microscopía Óptica. El análisis de los pasteles ha puesto de manifiesto la presencia de azul egipcio, cuyo componente principal es la cuprorivaita. Aparece mezclada con menor cantidad de otras fases como granos de cuarzo, una fase vítrea adherente y óxidos de cobre. Se trata del primer testimonio de este pigmento en Turquía y el estudio centra la atención en su caracterización y proceso de fabricación. Los resultados han aportado algunas diferencias significativas con respecto a los azules encontrados en Egipto y Mesopotamia, como por ejemplo la ausencia de estaño. Otra peculiaridad a la que apuntan los investigadores es la detección de zinc en las tortas que permite plantear la hipótesis de una producción local. Los bronce hallados en la Fortaleza de Ayanis se caracterizan por la presencia de zinc como elemento de aleación menor.

Un trabajo de investigación sobre el azul egipcio empleando radiación de sincrotrón es el de Ariadne Kostomitsopoulou y su equipo, en 2021³⁶. El artículo examina la producción del pigmento a través de unos *pellets* producidos con y sin éxito en un taller de época helenística en la isla de Cos (Dodecaneso, Grecia). La investigación se ha llevado a cabo empleando las técnicas experimentales de la SEM, la μ -Raman, la Espectroscopía de FRX de alta resolución y la Espectroscopía XSR. Las analíticas confirmaron la presencia de cuprorivaita en las zonas azules. Las muestras evidencian altas variaciones en la especiación. Los resultados a los que llegan es que no se dieron temperaturas de cocción inadecuadas que podrían haber llevado a la cuprita rojiza (Cu_2O). La producción fallida ha podido deberse al empleo de materiales de partida que no son los adecuados, con contenidos de hierro inusualmente altos.

34. HATTON *et al.* (2008).

35. INGO *et al.* (2013).

36. KOSTOMITSOPOULOU *et al.* (2021).

Es evidente, en base a estos ejemplos anteriores, que el uso del azul egipcio es generalizado en el antiguo mundo mediterráneo, aunque existen escasas evidencias arqueológicas de los lugares de producción. Kostomitsopoulou continua con el estudio del taller de la isla de Cos que contiene un conjunto de gránulos de azul egipcio producidos con y sin éxito, trozos de plomo amorfo, varillas de litargirio y pigmentos de tierra³⁷. Este enclave proporciona los suficientes restos materiales para poder estudiar la fabricación de azul egipcio. La producción la divide en dos fases: la primera consiste en la recolección, el procesamiento y la cocción de los materiales de partida no azules para producir los gránulos iniciales de un color azul saturado característico; la segunda implica el procesamiento adicional de los gránulos producidos inicialmente para crear colorantes azules de diferentes tonalidades.

Un trabajo centrado en azul egipcio empleado en pintura mural en la Alta Edad Media es el publicado sobre un fragmento de este pigmento perteneciente al segundo edificio de la iglesia de San Pedro en Gratsch datado en el siglo V-VI d.C. (Tirol del Sur, Italia)³⁸. En este estudio se ha empleado la técnica experimental de la Microespectroscopía Raman, junto a evidencias arqueológicas de fabricación del pigmento en Cumae y Liternum y las informaciones de Vitruvio y Plinio. Más allá de la cuprorivaíta y el negro de carbón como pintura base, se detectaron 26 minerales accesorios hasta niveles traza. Este hecho brinda una información sin precedentes sobre la mezcla de materias primas y las reacciones de conversión durante la preparación, la aplicación y el envejecimiento del pigmento. Las impurezas naturales informan sobre un pigmento producido en el norte de los Campos Flégreos (Campania, Italia). La calcosina y la calcopirita sugieren el uso de un mineral de cobre sulfurado y sales insolubles en agua: un flujo alcalino mixto en forma de ceniza vegetal. De estos procesos se deducen reacciones en estado sólido predominantes durante la síntesis del pigmento.

Siguiendo la línea del tiempo es necesario centrarse en un hallazgo reciente. Se trata del azul egipcio detectado en el fresco romano de Rafael *El triunfo de Galatea*, conservado en la Villa Farnesina de Roma³⁹. Se trata del primer caso en el Renacimiento tras siglos de olvido. Es un hecho la discontinuidad del uso del azul egipcio a lo largo del tiempo. Esta puede deberse a la escasez de investigaciones en obra de arte en los siglos centrales de la Edad Media.

Respecto a estudios en museos, se ha llevado a cabo recientemente uno sobre materiales pictóricos utilizados para decorar máscaras funerarias y sarcófagos egipcios. Las muestras están conservadas en el Museo Nacional de Arqueología de Portugal (MNA), en el Museo Arqueológico de Carmo (MAC) en Lisboa y en el Museo de Historia Natural de la Universidad de Oporto (MNHFCUP). Para el análisis del azul egipcio se ha empleado la técnica experimental de la SEM. Las analíticas arrojan la presencia, entre otros elementos, de cobre y estaño, lo que indica el empleo de bronce para su síntesis. En este caso la muestra objeto

37. KOSTOMITSOPOULOU (2022).

38. DARIZ y SCHMID (2021).

39. SGAMELLOTTI y ANSELMi (2022).

de estudio fue una máscara funeraria, la LJJ 1-80, de cartón pintado, supuestamente perteneciente a Kawit, sacerdotisa de Min, y datada en el Periodo Tardío (c. VII-IV a.C.).⁴⁰

En la actualidad el azul egipcio se ha dado a conocer por otras cualidades y aplicaciones múltiples más allá de su finalidad original. Antonio Sgamellotti y Chiara Anselmi ofrecen una breve reseña de las propiedades estructurales de este material y sus actuales aplicaciones médicas, forenses y energéticas⁴¹.

3. Metodología

El fragmento de azul egipcio de la tumba de Nefertari fue examinado por el Grupo de Tecnología Mecánica y Arqueometalurgia dentro del marco del *Proyecto de asistencia científico-técnica a la investigación en el desarrollo de nuevos sistemas hiperdurables aplicables a efectos decorativos en materiales de uso arquitectónico* de la Universidad de Complutense de Madrid financiado por Laboratorio de Inspección y Control de Calidad, S.L., en los años 2011 y 2012, con el propósito de distinguir las características de este pigmento, así como para comprender la técnica empleada en la pintura.

La muestra fue insertada en una probeta de resina compuesta por Résine Mécaprex KM-U. Luego fue sometida a un proceso de desbaste y pulido convencional utilizando papeles abrasivos de Buehler, junto con un plato de pulido de impregnado con alúmina α de 0,3 micrómetros. Posteriormente, fueron secadas en una estufa a 35 °C sin sufrir ningún tratamiento químico durante dos horas.

La probeta fue examinada utilizando un Microscopio Óptico y, para un análisis más detallado, se aplicó la técnica experimental de la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) con análisis EDS-EDX (Análisis Elemental Cualitativo por Dispersión de Energías).

La identificación del pigmento y sus compuestos presentes en el aglutinante y en el mortero de soporte se realizó mediante Difracción de Rayos X (DRX) y análisis EDS-EDX.

La posterior reproducción experimental se llevó a cabo siguiendo la receta de Vitruvio para comprobar la concordancia con los resultados obtenidos del azul de la tumba de Nefertari. Para ello se utilizaron materiales iguales a los empleados en la Antigüedad, incluyendo arena del desierto de Alejandría, y aplicando las mezclas y usando los hornos del laboratorio del Grupo de Investigación de Tecnología Mecánica y Arqueometalurgia para reproducir los procesos y las condiciones de obtención de este pigmento.

4. Resultados y discusión

Mediante la observación y posterior análisis con las técnicas experimentales descritas se ha determinado la estructura del pigmento de la capa de pintura azul como un

40. SCHIAVON *et al.* (2021).

41. SGAMELLOTTI y ANSELM (2022).

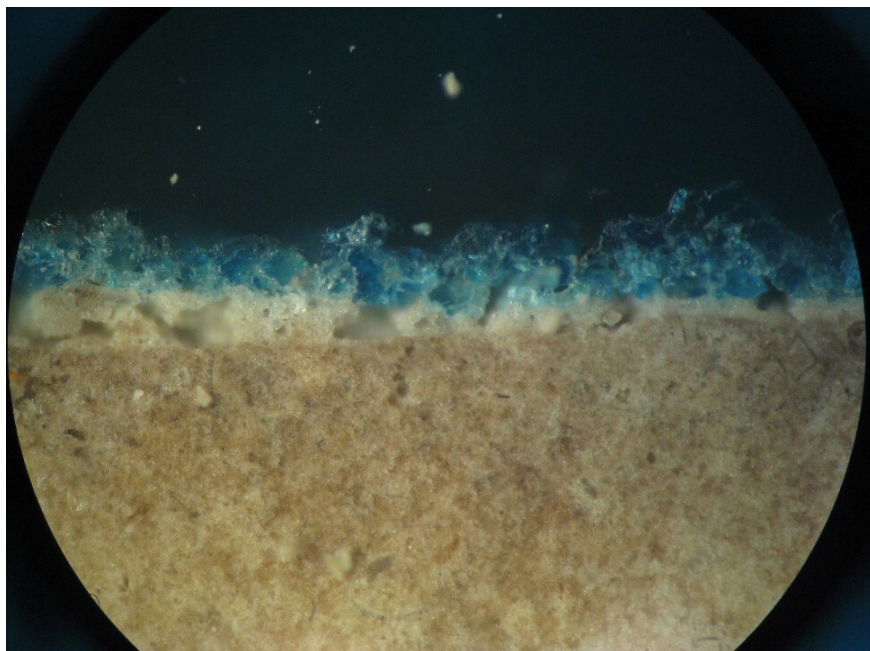


Figura 1. Imagen del microscopio óptico mostrando las distintas capas de la muestra.

Fuente: *Proyecto de asistencia científico-técnica a la investigación en el desarrollo de nuevos sistemas hiperdurables aplicables a efectos decorativos en materiales de uso arquitectónico* de la Universidad de Complutense de Madrid.

filotetrasilicato de cobre y calcio ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$). La figura 1 muestra la imagen de las capas captadas con el microscopio óptico.

Los análisis de difractograma y de EDS-EDX, realizados en los Centros de Asistencia a la Investigación (CAI) de la Universidad Complutense de Madrid, revelan la diversidad de materiales presentes en la muestra de la tumba de Nefertari. Esta técnica experimental permite el análisis cualitativo y cuantitativo de muestras. Se pueden apreciar estructuras cristalinas de cuarzo y silicatos, que contienen sodio y aluminio, y carbonatos de calcio con una pequeña proporción de magnesio. Estos componentes actúan tanto como cargas para el aglutinante como diluyentes para el pigmento. La adición de carbonato cálcico tiene como propósito realzar la luminosidad. La presencia de yeso (sulfato cálcico) proviene del mortero ubicado debajo de la capa de pintura.

La micrografía presentada en la figura 2 corresponde a una imagen obtenida a través de MEB. Muestra la separación entre el estrato pictórico (figura 1) y la pared de roca de la tumba de Nefertari (debajo en la imagen). Los cristales de tonalidad más clara son atribuibles al pigmento utilizado (azul egipcio), mientras que el resto de la composición está constituido por la arena utilizada como carga (carbonatos de calcio, silicatos y cuarzo). La matriz de partículas extremadamente finas observada representa el cemento aglutinante de yeso, el cual fue elaborado

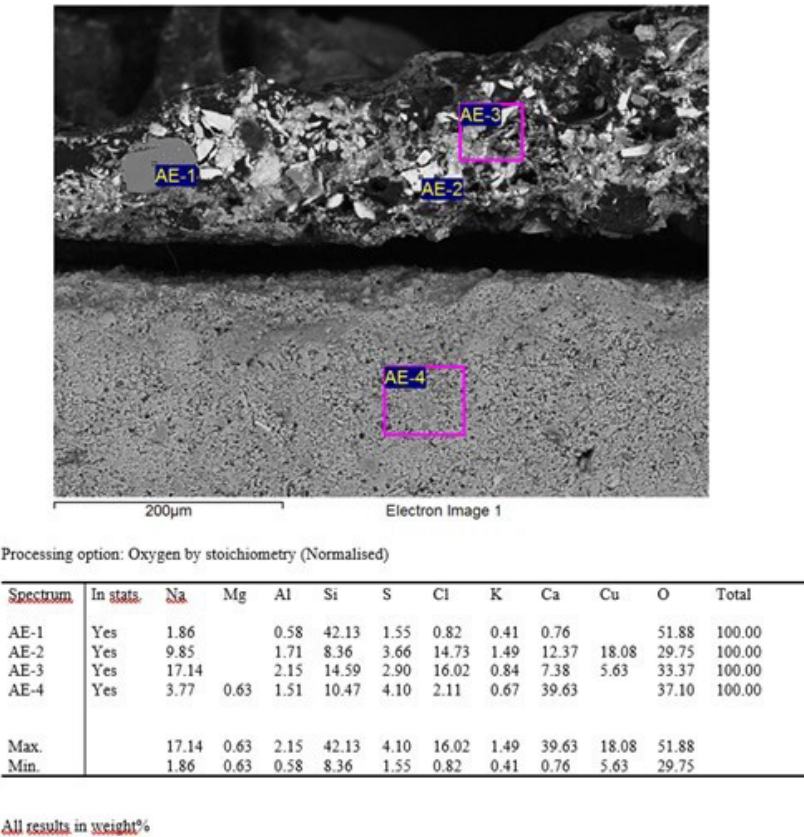


Figura 2. Esquema de las diferentes secciones de una pintura al fresco.
Fuente: Proyecto de asistencia científico-técnica a la investigación en el desarrollo de nuevos sistemas hiperdurables aplicables a efectos decorativos en materiales de uso arquitectónico de la Universidad de Complutense de Madrid.

mediante la disolución de goma arábiga en agua y su mezcla con albúmina. Esto representó una práctica distintiva en la práctica pictórica egipcia hasta la introducción de la técnica de mezcla de pigmentos con cera caliente⁴².

En la figura 2 también se señalan los puntos de análisis EDS-EDX destacando las composiciones de los distintos cristales presentes en la carga de la capa pictórica: cuarzo (AE-1), pigmento (AE-2), silicato (AE-3) y mortero (AE-4). La presencia de cloro se atribuye a la contaminación del agua utilizada en el proceso de preparación de la muestra con el desbaste y pulido, además de las filtraciones que pudiera sufrir la tumba a lo largo de los siglos.

42. SHARON (1987).



Figura 3. Imagen de MEB de la Gephyrocapsa Oceanica.

Fuente: *Proyecto de asistencia científico-técnica a la investigación en el desarrollo de nuevos sistemas hiperdurables aplicables a efectos decorativos en materiales de uso arquitectónico* de la Universidad de Complutense de Madrid.

La capa predominante de mortero consiste principalmente en estuco y yeso, junto con arena y cal para proporcionar mayor cohesión y brillo. La capa pictórica se aplica de manera directa sobre el estuco, el cual se encuentra apoyado sobre la pared de roca caliza meticulosamente homogeneizada. Esta formación rocosa se caracteriza por ser microfossilífera compuesta por los microesqueletos de cocolitos del tipo Gephyrocapsa Oceanica (figura 3). Esta formación de roca caliza, presente en el Valle de los Reyes y las Reinas, se remonta al periodo del Eoceno, que abarcó desde hace aproximadamente 54 millones hasta unos 40 millones de años. Durante esta era, el clima en el Sahara egipcio era subtropical a cálido, y la región estaba sumergida bajo un mar poco profundo perteneciente al océano de Tethys⁴³.

La utilización de materiales triturados tanto para la base como para el propio pigmento (azul egipcio) en la pintura permitía la creación de dibujos y figuras de gran delicadeza y dimensiones adecuadas mediante el uso de pinceles finos y bro-

43. MOLINA (2007).

chas. Para diluir el pigmento, se utilizaba una mezcla de albúmina, agua y goma arábica, empleando conchas marinas a modo de contenedores⁴⁴. La adición de carbonato cálcico en la capa de pintura tenía como objetivo ofrecer una luminosidad notable, que aún es perceptible al entrar en el monumento funerario. El estuco de yeso empleado como mortero en los interiores exhibe una alta durabilidad⁴⁵.

En relación con la muestra de pintura de Nefertari, es relevante destacar que desde la XIX dinastía, que comenzó con Ramsés I, la técnica empleada para producir el azul egipcio experimentó un cambio significativo. En lugar de los compuestos tradicionales como la cuprita y la malaquita, se optó por emplear bronce como fuente de catión de cobre en la síntesis del pigmento azul egipcio⁴⁶. Esta modificación guarda semejanza con la descripción de Marco Vitruvio Polión en *De architectura*, específicamente en el libro (VII, 11), donde se hace referencia al uso de limaduras de bronce en la Alejandría de la época para obtener este característico color azul.

El Grupo de Tecnología Mecánica y Arqueometalurgia de la Universidad Complutense de Madrid, después de analizar detenidamente los estudios y comparar con los principios de diseño arquitectónico de Vitruvio, pudo inferir lo siguiente: cuando se menciona la trituration de la arena, se está haciendo referencia a la combinación de cuarzo y cal como ingredientes básicos. La adición de flor de sal mineral corresponde al agente fundente, que es un carbonato natural. La obtención de una mezcla finamente molida se refiere a la granulometría adecuada. La inclusión de bronce de Chipre en la mezcla del pigmento implica el uso de objetos de aleación de cobre y estaño, presentes en numerosas composiciones. El limado de gruesas barras de bronce indica la preparación de estos objetos para su uso. La formación de una masa compacta y la creación de pequeñas bolas al amasar con las manos, seguido de su secado, representa la preparación de una mezcla homogénea humedecida. Una vez completamente secas, estas bolas se colocan en un crisol refractario, representado por una orza de barro, y se introducen en un horno donde ocurre un intercambio de vapores. Estos desencadenan una reacción química a alta temperatura (aproximadamente 850 °C). Finalmente, debido a la intensidad del calor, las características originales de los objetos se consumen y adquieren un tono azul característico, correspondiente al pigmento conocido como azul egipcio, compuesto principalmente por filosilicato de cobre y calcio⁴⁷.

Después de medir las cantidades adecuadas de los elementos empleados experimentalmente con una balanza de precisión, se llevó a cabo el procedimiento de molienda y mezclanza utilizando un almirez de porcelana. La trituration se realizó con gran atención, buscando obtener una consistencia extremadamente fina, conforme a la sugerencia de Vitruvio en su receta. Durante este proceso, la mezcla se homogeneizó progresivamente hasta alcanzar una uniformidad notable y partículas extremadamente pequeñas.

44. ZAPATA (2010).

45. DOERNER (1975).

46. MAZZOCCHIN *et al.* (2004).

47. CRIADO *et al.* (2011b).

Posteriormente, se llevó a cabo el proceso de llenado del crisol y su consiguiente compactación. Es esencial aplicar una presión significativa sobre la mezcla contenida en el crisol para lograr una compresión máxima. Seguidamente, el crisol se introdujo en un horno previamente calentado a 850 °C y se deja en su interior durante un periodo de 24 horas. Una vez transcurrido este periodo de tiempo, se apaga el horno y se deja enfriando el crisol dentro. Después de unas 6 horas, se retira el crisol del horno y se voltea, revelando una acumulación de pequeños cristales de un azul egipcio brillante.

Para producir el pigmento azul egipcio, requerimos el uso de dos sustancias ausentes en las referencias de la literatura internacional, lo que se considera una omisión significativa respecto a la fórmula que ofrece Vitruvio: el bronce y la arena del desierto⁴⁸. Aunque ciertas recetas propuestas incorporan la arena del desierto, se resalta la carencia de cal en ellas⁴⁹. El bronce empleado contenía un 10% de estaño en masa, una constitución similar a la mayoría de los bronce de Chipre⁵⁰. Para que la fórmula de Vitruvio fuera eficaz, resulta crucial que la arena del desierto de Egipto contuviera restos de productos calcáreos. La arena se tomó de las proximidades de Alejandría y se sometió a una molienda exhaustiva en un mortero hasta obtener un polvo de gran finura. La presencia de carbonato de calcio era adecuada, dado que la composición química de la arena del desierto de Egipto se atribuye a la erosión de las montañas y rocas locales, incluyendo la presencia de la *Gephyrocapsa* Oceánica⁵¹.

Objetivo 1: se aplicaron las técnicas experimentales de MEB y DRX para el análisis de la composición de la muestra de azul egipcio de la tumba de Nefertari como un primer acercamiento para conocer la composición de esta.

Objetivo 2: se compararon los resultados obtenidos de estas técnicas experimentales con la receta del ingeniero Marco Vitruvio Polión. Se deduce que los ingredientes básicos son el cuarzo y la cal. El agente fundente es un carbonato natural (*Gephyrocapsa* Oceánica) y de la molienda debe obtenerse una granulometría adecuada. Lo que se conoce como bronce de Chipre corresponde al uso de objetos de aleaciones de cobre y estaño, que deben ser limados para su empleo. La masa debe presentar una mezcla homogénea que posteriormente se calienta en un crisol para obtener el azul.

Objetivo 3 y Objetivo 4: se reprodujo y caracterizó el azul experimentalmente a partir de los datos obtenidos de la MEB y la EDS-EDX de la muestra de la tumba de Nefertari y la receta de Vitruvio (figura 2).

Objetivo 5: este último proceso experimental de reproducción confirma la concordancia entre la muestra arqueológica, la receta de Vitruvio y la correcta preparación y caracterización que se hizo en el laboratorio de la Universidad Complutense de Madrid.

48. CRIADO *et al.* (2011b).

49. MAZZOCCHIN *et al.* (2003); NICOLA *et al.* (2018); TITE *et al.* (1984); MIRT *et al.* (1995).

50. MOHEN (1992).

51. CRIADO *et al.* (2011a).

5. Reflexiones finales

El presente estudio se enmarcó en el *Proyecto de asistencia científico-técnica a la investigación en el desarrollo de nuevos sistemas hiperdurables aplicables a efectos decorativos en materiales de uso arquitectónico* con el Grupo de Tecnología Mecánica y Arqueometalurgia de la Universidad de Complutense de Madrid. Este fue financiado por el Laboratorio de Inspección y Control de Calidad, S.L., durante los años 2011 y 2012. La investigadora principal era la Dra. Laura García Sánchez y el director del Grupo el Prof. Dr. Antonio José Criado Portal (1948-2024). Esta investigación de laboratorio sobre el pigmento azul egipcio ha proporcionado una visión detallada de los procesos de análisis y reproducción experimental de este pigmento. A través de la utilización de técnicas como la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), la Difracción de Rayos-X (DRX) y la reproducción experimental basada en la receta de Vitruvio, se ha logrado una comprensión más profunda de la composición química, la estructura y la técnica de fabricación de este pigmento.

En el caso del análisis de la muestra de azul egipcio de la tumba de Nefertari, este reveló la presencia de un filotetrasilicato de cobre y calcio, que constituyen los elementos característicos. Además, se identificaron otros componentes como cuarzo, silicatos y carbonatos, que actúan como cargas para el aglutinante y diluyentes para el pigmento. Estos hallazgos confirman la concordancia entre la muestra analizada y la receta histórica de Vitruvio, así como la reproducción experimental del proceso de fabricación del pigmento.

La metodología empleada en el estudio, que incluyó el desbaste, pulido y análisis detallado de la muestra mediante técnicas avanzadas de MEB y EDS-EDX, demostró ser efectiva para la caracterización de la composición y estructura del pigmento azul egipcio. Asimismo, la reproducción experimental basada en la receta de Vitruvio permitió obtener con éxito el pigmento azul egipcio utilizando los mismos materiales, mezclas, temperaturas y tiempos empleados en su receta. Además, los resultados concuerdan con los obtenidos de los análisis del azul egipcio de la tumba de Nefertari. El estudio contribuye a la comprensión del azul egipcio desde una perspectiva histórica y científica.

Referencias bibliográficas

- ACETO, M.; CALÁ, E.; FENOGLIO, G.; LABATE, M.; DENOËL, C.; OPERTI, L.; AGOSTINO, A. (2020). «New Evidence of Non-traditional Egyptian Blue Manufacture in the 6th Century Ashburnham Pentateuch». *Journal of Archaeological Science Reports* 33. <<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102487>>
- BARD, K. A. (2023). *Introducción a la arqueología del Antiguo Egipto*. Córdoba: Editorial Almuzara.
- BEARAT, H. (1997). «Quelle est la gamme exacte des pigments romains ? Confrontation des résultats d'analyse avec les textes de Vitruve et de Pline». En BEARAT, H.; FUCHS, M.; MAGGETTI, M.; PAUNIER, D. (eds.). *Roman Wall Painting: Materials, Techniques, Analyses and Conservation*. Friburgo: Institute of Mineralogy and Petrology, Fribourg University, p. 11-34.

- BREDAL-JØRGENSEN, J.; SANYOVA, J.; RASK, V.; SARGENT, M. L.; THERKILDSSEN, R. H. (2011). «Striking Presence of Egyptian Blue Identified in a Painting by Giovanni Battista Benvenuto from 1524». *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 401, p. 1433-39.
<<https://doi.org/10.1007/s00216-011-5140-y>>
- CARBÓ, J. R. (2023). «Testimonios de la *Imitatio Alexandri* de Napoleón Bonaparte en la Campaña de Egipto (1798)». *El futuro del pasado: revista electrónica de historia* 14, p. 289-324.
<<https://doi.org/10.14201/fdp.30195>>
- CARTWRIGHT, M. (2015). *Vitruvius. World History Encyclopedia*. <<https://www.worldhistory.org/Vitruvius>> [Consultado 18/04/2024].
- CASTEL, E. (1995). *Diccionario de mitología egipcia*. Cuenca: Alderabán Ediciones.
- CHAMON, J.; DIETZ, C.; GARCÍA, L.; ARÉVALO, R.; BRAVO, E.; CRIADO-MARTÍN, A. J.; MARTÍNEZ, J. A.; CRIADO, A. J. (2009). «An Archaeological Analogue for a Composite Material of Carbon Steel, Copper and Magnetite». *Practical Metallography* 46(8), p. 377-93.
<<https://doi.org/10.3139/147.110017>>
- CORCORAN, L. H. (2016). «The Color Blue as an “Animator” in Ancient Egyptian Art». En GOLDMAN, R. B. (ed.). *Essays in Global Color History, Interpreting the Ancient Spectrum*. Piscataway: Gorgias Press, p. 41-63.
- CORZO, M. A.; AFSHAR, M. (eds.) (1993). *Art and Eternity. The Nefertari Wall Paintings Conservation Project 1986-1992*. Oxford: OUP.
- CRIADO-MARTÍN, A. J.; CRIADO, A. J.; SAN NICOLÁS, M. P.; GARCÍA, L.; CRIADO, A. (2009). «Los carburos de hierro como testigos de los ritos de cremación entre los pueblos pre-romanos de la Península Ibérica: algunos ejemplos». *SPAL* 18, p. 105-30.
<<http://dx.doi.org/10.12795/spal.2009.i18.07>>
- CRIADO-MARTÍN, A. J.; GARCÍA, L.; PENCO, F.; CRIADO, A. J.; MARTÍNEZ, A. J.; CHAMÓN, J.; DIETZ, C. (2011a). «Archaeometrical Comparative Study of Paint Samples with Egyptian Blue, from Nefertari's Tomb (XIII Century BC) and Balneum (Roman Baths, First Century BC and AD)». *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio* 50(3), p. 161-68.
- CRIADO-MARTÍN, A. J.; SÁNCHEZ, L. G.; VALENZUELA, F. P.; GARCÍA, J. A. M.; FERNÁNDEZ, J. C.; DIETZ, C. (2011b). «Obtención del pigmento azul egipcio siguiendo la receta de Marcus Vitruvius Pollio descrita en su libro *De architectura* (siglo I a.C.)». *Anales de la Real Sociedad Española de Química* 2, p. 163-66.
- DARIZ, P.; SCHMID, T. (2021). «Trace Compounds in Early Medieval Egyptian Blue Carry Information on Provenance, Manufacture, Application, and Ageing». *Scientific Reports* 11, p. 1-12.
<<https://doi.org/10.1038/s41598-021-90759-6>>
- DEL BARRIO, B. (2023). «Iconos del arte egipcio: coronas y tocados de la realeza femenina en la iconografía de Amarna». *Eikón Imago* 12, p. 143-51.
<<https://doi.org/10.5209/eiko.81750>>
- DEL CERRO, C. (2009). «Azul para los dioses. De Oriente a Occidente: la búsqueda del lapislázuli durante el III milenio a.C.». *ISIMU. Revista sobre Oriente Próximo y Egipto en la antigüedad* 13, p. 71-103.
- DELMARE, F. (2013). *Blue Pigments, 5000 Years of Art and Industry*. Londres: Archetype.
- DOERNER, M. (1975). *Los materiales de pintura y su empleo en el arte*. Barcelona: Editorial Reverté.
- DOUMA, M. (2006). *Egyptian Blue. WebExhibits Project*. Washington, DC: Institute for Dynamic Educational Advancement. <<http://webexhibits.org/pigments/indiv/history/egyptblue.html>> [Consultado 14/02/2024]

- EASTAUGH, N.; WALSCH, V.; CHAPLIN, T.; SIDDALL, R. (2004). *The Pigment Compendium: Optical Microscopy of Historical Pigments*. Oxford: Elsevier Butterworth Heine-
mann.
- EDREIRA, M. C.; FELIU, M. J.; FERNÁNDEZ-LORENZO, C.; MARTÍN, J. (2003). «Spectroscopic
Study of Egyptian Blue Mixed with Other Pigments». *Helvetica Chimica Acta* 86(1),
p. 29-49.
<<https://doi.org/10.1002/hlca.200390017>>
- EICHHOLZ, D. E. (1965). *De lapidibus*. Oxford: Clarendon.
- GAETANI, M. C.; SANTAMARIA, U.; SECCARONI, C. (2004). «The Use of Egyptian Blue and
Lapis Lazuli in the Middle Ages - The Wall Paintings of the San Saba Church in Rome».
Studies in Conservation 49, p. 13-22.
- GANIO, M.; SALVANT, J.; WILLIAMS, J.; LEE, L.; COSSAIRT, O.; WALTON, M. (2015).
«Investigating the Use of Egyptian Blue in Roman Egyptian Portraits and Panels from
Tebtunis, Egypt». *Applied Physics A* 121, p. 813-21.
<<https://doi.org/10.1007/s00339-015-9424-5>>
- GARCÍA, L.; CRIADO-MARTÍN, A. J.; CRIADO, A. J.; CHAMÓN, J.; PENCO, F.; ALONSO, J.;
ARÉVALO, R.; MARTÍNEZ, J. A.; DIETZ, C. (2011). «Evidence for Artificial Magnetite
Coating on Iberian Armoury». *Revista de Metalurgia* 47(2), p. 101-11.
<<https://doi.org/10.3989/revmetalmadrid.0933>>
- GARCÍA-SÁNCHEZ, J. (2014). *Breve historia de la Arqueología*. Madrid: Ediciones Nowtilus.
- GODET, M.; BINET, L.; SCHÖDER, S.; BRUNEL-DUVERGER, L.; THOURY, M.; BERTRAND, L.
(2022). «X-Ray Irradiation Effects on Egyptian Blue and Green Pigments». *Journal of
Analytical Atomic Spectrometry* 37, p. 1265-72.
<<https://doi.org/10.1039/D2JA00020B>>
- HATTON, G. D.; SHORTLAND, A. J.; TITE, M. S. (2008). «The Production Technology of
Egyptian Blue and Green Frits from Second Millennium BC Egypt and Mesopotamia».
Journal of Archaeological Science 35, p. 1591-604.
<<https://doi.org/10.1016/j.jas.2007.11.008>>
- INGO, G. M.; ÇILINGIROĞLU, A.; DI CARLO, G.; BATMAZ, A.; DE CARO, T.; RICCUCCI, C.;
PARISI, E. I.; FARALDI, F. (2013). «Egyptian Blue Cakes from the Ayanis Fortress
(Eastern Anatolia, Turkey): Micro-chemical and Structural Investigations for the
Identification of Manufacturing Process and Provenance». *Journal of Archaeological
Science* 40, p. 4283-90.
<<http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2013.06.016>>
- JAKSCH, H.; SEIPEL, W.; WEINER, K.L.; EL GORESY, A. (1983). «Egyptian Blue Cuprovarite
a Window into Ancient Egyptian Technology». *Die Naturwissenschaften* 70, p. 525-35.
- JIMÉNEZ, J. M.; BRAVO, E.; CRIADO-MARTÍN, A. J.; ARÉVALO, R.; DIETZ, C.; MARTÍNEZ, J. A.;
CRIADO, A. J. (2004). «A New Method for Dating Ancient Steel Samples Using Vickers
Microhardness». *Materials Characterization* 52, p. 145-51.
<<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2004.04.005>>
- KOSTOMITSOPOULOU, A. (2022). «The Materialisation of Colour: Reconstructing Egyptian
Blue Manufacture on Late Hellenistic Kos». *Norwegian Archaeological Review* 55(1),
p. 21-37.
<<https://doi.org/10.1080/00293652.2022.2052746>>
- KOSTOMITSOPOULOU, A.; GIANNICI, F.; HANDBERG, S.; DE NOLF, W.; COTTE, M.; CARUSO,
F. (2021). «Synchrotron Radiation-Based Micro-XANES and Micro-XRF Study of
Unsuccessfully Produced Egyptian Blue from the Late Hellenistic Production Site
of Kos (Dodecanese, Greece)». *Analytical Chemistry* 93, p. 1157-567.
<<https://doi.org/10.1021/acs.analchem.1c02063>>

- KOVALEV, I.; RODLER, A. S.; BRONS, C.; REHREN, T. (2023). «Making and Working Egyptian Blue – a Review of the Archaeological Evidence». *Journal of Archaeological Science* 153.
<<https://doi.org/10.1016/j.jas.2023.105772>>
- LARGACHA, A. (2024). «Propaganda y manipulación a través de la pintura. Antoine-Jean Gros y la campaña de Napoleón a Siria». *Atrio. Revista de Historia del Arte* 30, p. 130-49.
<<https://doi.org/10.46661/atRIO.10629>>
- LEBLANC, C.; SILIOTTI, A. (1998). *Nefertari: Ausgrabungen im Tal der Königinnen*. Augsburg: Bechtermünz Verlag in Weltbild Verlag.
- LLAGOSTERA, E. (2005). «Exhibición de la reproducción fotográfica de la tumba de la reina Nefertari (QV&&), en el Museo Arqueológico Nacional de Madrid». *Boletín de la Asociación Española de Orientalistas* XLI, p. 91-105.
- LLOYD, A. (2010). *A Companion to Ancient Egypt*. Oxford: Blackwell.
- OLIVER, J. L. (trad.) (1997). *Vitruvio, Los diez libros de arquitectura*. Madrid: Alianza Forma.
- MAZZOCCHIN, G. A.; AGNOLI, F.; COLPO, I. (2003). «Investigation of Roman Age Pigments Found on Pottery Fragments». *Analytica Chimica Acta* 478(1), p. 147-61.
<[https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(02\)01476-9](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(02)01476-9)>
- MAZZOCCHIN, G. A.; RUDELLO, D.; BRAGATO, C.; AGNOLI, F. (2004). «A Short Note on Egyptian Blue». *Journal of Cultural Heritage* 5, p. 129-33.
<<https://doi.org/10.1016/j.culher.2003.06.004>>
- MCCOUAT, P. (2018). «Egyptian Blue: The Colour of Technology». *Journal of Art in Society*. <<https://www.artinsociety.com/egyptian-blue-the-colour-of-technology.html>> [Consultado 18/04/2024]
- MIRTI, P.; APPOLONIA, L.; CASOLI, A.; FERRARI, R. P.; LAURENTI, E. (1995). «Spectrochemical and Structural Studies on a Roman Sample of Egyptian Blue». *Spectrochim. Acta* 51, p. 437-46.
<[https://doi.org/10.1016/0584-8539\(94\)E0108-M](https://doi.org/10.1016/0584-8539(94)E0108-M)>
- MOHEN, J. P. (1992). *Metalurgia Prehistórica*. Barcelona: Editorial Masson.
- MOOREY, P. R. S. (1994). *Ancient Mesopotamian Materials and Industries*. Oxford: OUP.
- MOLINA, E. (2007). «Causas de los principales eventos de extinción en los últimos 66 millones de años». *Revista de la Real Academia de las Ciencias de Zaragoza* 62, p. 37-64.
<<http://wzar.unizar.es/perso/emolina/pdf/Molina2007RRACZ.pdf>>
- NICOLA, M.; ACETO, M.; GHEROLDI, V.; GOBETTO, R.; CHIARI, G. (2018). «Egyptian Blue in the Castelseprio Mural Painting Cycle. Imaging and Evidence of a Non-traditional Manufacture». *Journal of Archaeological Science Reports* 19, p. 465-75.
<<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.03.031>>
- ORNANO, V. (2018). *Nefertari - Por La Que Brilla El Sol*. Babelcube Inc. Edición de Kindle.
- PAGÉS-CAMAGNA, S.; LAVAL, E.; VIGEARS, D.; DURAN, A. (2010). «Non-destructive and in Situ Analysis of Egyptian Wall Paintings by X-Ray Diffraction and X-Ray Fluorescence Portable Systems». *Applied Physics A* 100(3), p. 671-81.
<<https://doi.org/10.1007/s00339-010-5667-3>>
- RAMADAN, S.; MAHGOUB, G.; ELHAGRASSY, A.; ABDEL-AZIZ, M.; MERTAH, E. (2022). «Investigation and Characterization of Two Painted Limestone Stelae, Egyptian Museum, Cairo, Egypt». *Egyptian Journal of Chemistry* 65, p. 85-96.
<<https://doi.org/10.21608/ejchem.2022.102211.4747>>
- RAMOS, C. (2018). *Breve historia de la vida cotidiana del antiguo Egipto*. Madrid: Ediciones Nowtilus.

- RODRÍGUEZ, J. M. (2010). «De la reconstrucción tradicional a la virtual. Una visión desde la Arqueología». *Virtual Archaeology Review* 1(1), p. 163-67.
<<https://doi.org/10.4995/var.2010.5140>>
- SALEH, A. (1987). «Characterization of Pigments Used in Ancient Egypt». En M. UDA; G. DEMORTIER; I. NAKAI (eds.). *X-Rays for Archaeology*. Dordrecht: Springer, p. 3-26.
- SCHIAVON, N.; PANGANIBAN, P.; VALADAS, S.; BOTTAINI, C.; BARROCAS DIAS, C.; MANHITA, A.; CANDEIAS, A. (2021). «A Multi-Analytical Study of Egyptian Funerary Artifacts from Three Portuguese Museum Collections». *Heritage* 4(4), p. 2973-95.
<<https://doi.org/10.3390/heritage4040166>>
- SGAMELLOTTI, A.; ANSELM, C. (2022). «An Evergreen Blue. Spectroscopic Properties of Egyptian Blue from Pyramids to Raphael, and Beyond». *Inorganica Chimica Acta* 530, p. 1-6.
<<https://doi.org/10.1016/j.ica.2021.120699>>
- SHARON, C. (1987). *Scientific and Technical Examination of the Tomb of Queen Nefertari at Thebes. The Conservation of Wall Paintings*. Oxford: OUP.
- SIDDALL, R. (2006). «Not a Day without a Line Drawn: Pigments and Painting Techniques of Roman Artists». *Focus Magazine: Proceedings of the Royal Microscopical Society* 2, p. 18-23.
<<https://doi.org/10.22443/rms.inf.1.4>>
- STULIK, D.; PORTA, E.; PALET, A. (1996). *Analyses of Pigments, Binding Media, and Varnishes. House of Eternity: The Tomb of Nefertari*. Oxford: OUP.
- TITE, M.; BIMSON, M.; COWELL, M. (1984). «Technological Examination of Egyptian Blue». *ACS Publications* 11, p. 215-42.
<<https://doi.org/10.1021/ba-1984-0205.ch011>>
- TITE, M.; BIMSON, M.; MEEKS, N. (1981). «Technological Characterisation of Egyptian Blue». *Revue d'Archeométrie* 1, p. 297-301.
- TRIGO, A. M. (2024). «Revolución en el arte: obras maestras que transformaron la Historia. Parte I». *Revista Digital de ACTA*, p. 1-32. <https://www.acta.es/medios/articulos/cultura_y_sociedad/212001.pdf>
- VASCO, G.; SERRA, A.; MANNO, D.; BUCCOLIERI, G.; CALCAGNILE, L.; BUCCOLIERI, A. (2020). «Investigations of Byzantine Wall Paintings in the Abbey of Santa Maria di Cerrate (Italy) in View of their Restoration». *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 239, p. 1-7.
<<https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.118557>>
- WISEMAN, G.; BARNES, S.; HELWIG, K. (2023). «Investigation of Egyptian Blue on a Fragmentary Egyptian Head Using ER-FTIR Spectroscopy and VIL Imaging». *Heritage* 6, p. 993-1006.
<<https://doi.org/10.3390/heritage6020056>>
- YOSHINARI, A.; OGIDANI, E.; HIDAKA, H.; EBISAWA, H.; NAKAI, I.; TAKAHASHI, K.; KAWAI, N.; KONDO, J. (2020). «Proposal of a compositional characterization method by semi-quantitative analysis XRF Spectrum of pigments in mural painting and its application to nondestructive on-site analysis of the murals of the tomb of Khonsuemheb in Egypt». *Bunseki Kagaku* 69, p. 497-504.
<<https://doi.org/10.2116/bunsekikagaku.69.497>>
- ZAPATA, J. (2010). «¡Los neandertales también eran modernos!». *Ciencia cognitiva* 4(1), p. 20-23. <<https://www.cienciacognitiva.org/files/2010-2.pdf>>