

Obtención del pigmento azul egipcio siguiendo la receta de Marcus Vitruvius Pollio descrita en su libro *De Architectura* (siglo I a.C.)

Antonio J. Criado Portal,¹ Laura García Sánchez,^{1*} Fernando Penco Valenzuela,¹ A. Javier Criado Martín,¹ Juan A. Martínez García,¹ Jorge Chamón Fernández,¹ Christian Dietz²

Resumen: En este artículo se describe la síntesis de un hermoso pigmento, el azul egipcio, siguiendo los datos aportados por la receta de Marcus Vitruvius Pollio descrita en su libro *De Architectura* (siglo I a.C.), y demostrando así su autenticidad científica e histórica.

Palabras clave: Azul Egipcio, Cuprorivaite, Pigmentos, Materiales Antiguos Egipcios.

Abstract: In this article we describe the preparation of a beautiful pigment, Egyptian blue, synthesized following the procedure provided by Marcus Vitruvius Pollio and described in his book *De Architectura* (I b.C. century), thus demonstrating its scientific and historical authenticity.

Keywords: Egyptian Blue, Cuprorivaite, Pigments, Ancient Egyptian Materials.

Introducción

El azul egipcio es el primer pigmento de color sintetizado por la Humanidad. Se trata de un filosilicato de calcio y cobre ($\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$), que en su forma natural es el muy escaso mineral cuprorivaite¹⁻⁷ de un hermoso color azul intenso.

Es muy resistente a los agentes atmosféricos y contaminantes medioambientales y, también, a ácidos y álcalis.^{6,8} De ahí que se haya usado desde el Antiguo Egipto y Mesopotamia, alrededor del 3.000 a.C.,^{9,10} hasta el final del Imperio Romano.^{11,13}

Este pigmento azul, convenientemente triturado, puede ser empleado, muy favorablemente, en técnicas como: al fresco, a la cal, al temple con aceite de linaza y huevo, al temple con sustancias resinosas, al temple con goma arábiga y clara de huevo sobre yeso, etc. Sin embargo, pierde totalmente su bella tonalidad azul, al ser triturado muy finamente y utilizado con aglutinantes oleosos como el aceite de linaza, de adormideras, etc., con lo que en la técnica de pintura al óleo no se ha utilizado nunca.^{14,15}

Numerosos investigadores han propuesto distintas recetas para la obtención del azul egipcio,^{4,6,7,16} y todas las propuestas coinciden, más o menos, en los materiales de partida y

en el tiempo y temperatura de calentamiento de la mezcla para sintetizar el pigmento. Sin embargo, ninguno de los autores parece haberlo fabricado, ya que no proponen datos fundamentales de la preparación de la mezcla y su manipulación antes del calentamiento, algo que es muy importante para el éxito o el fracaso de la síntesis del pigmento. En esta publicación se presentan algunas de las mezclas que hemos ensayado; así como el modo de operación para obtener el azul egipcio. Nuestras mezclas se basan en sustancias minerales muy asequibles a los artesanos antiguos que fabricaban este pigmento azul. Además, exponemos la manera de preparar la mezcla para obtener un resultado positivo.

De todas formas, nuestro objetivo principal fue comprobar que la receta que describe el ingeniero y arquitecto militar romano, a las órdenes de César y, posteriormente, de Octavio Augusto, Vitruvius Pollio (en español Marco Vitruvio Polión y, abreviado, Vitruvio) (siglo I a.C.), en su libro "*De Architectura*", es una manera exitosa de obtener el azul egipcio. Y es que en la literatura internacional, anteriormente citada, se dice directamente que la receta de Vitruvio a este efecto, está descrita a partir de noticias y comentarios; pero que él nunca vio fabricar el azul egipcio. Juzgan que le falta un ingrediente básico, como es la cal (aportadora de calcio) y como fuente de adición del catión cobre, comentan el empleo de limaduras de bronce de Chipre. Esto significa, para todos los autores, que Vitruvio nunca vio fabricar el azul egipcio en la ciudad de Alejandría (Egipto), como él mismo escribe en su magna obra "*De Architectura*"; ya que le falta un ingrediente, la cal y añade algo equivocado como es el bronce (aleación CuSn).

Nuestro trabajo viene a demostrar la autenticidad de la receta de Vitruvio, por razones científicas e históricas que se comentarán y, también, porque se ha conseguido un hermoso pigmento de azul egipcio, siguiendo los datos aportados en su receta.

Los productos obtenidos, en los ensayos de laboratorio, han sido identificados mediante Difracción de Rayos-X.

Finalmente, la fórmula magistral, que él propone, en su libro "*De Architectura*" (libro VII, 11), en los párrafos dedicados a pigmentos "Del azul y el amarillo", y que vio llevar a cabo en Alejandría, para obtener el hermoso pigmento azul, es la siguiente:

".....se tritura arena con flor de sal mineral, formando una mezcla tan fina como la harina, se revuelve con bronce



A. J. Criado Portal¹



L. García Sánchez¹

¹ Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Complutense de Madrid. Avda. de la Complutense s/n, 28040 Madrid (España). C-e: gslaura@quim.ucm.es

² Centro de Arqueometría y Análisis Arqueológico. Facultad de Geografía e Historia. Universidad Complutense de Madrid. Avda. de la Complutense s/n, 28040 Madrid (España).

Recibido: 27/02/2010. Aceptado: 01/02/2011.

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 perfectamente secas, se colocan en una orza de barro, que introduciremos dentro de un horno; una vez 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 azul¹⁷.

Sustancias necesarias y modo de operación para obtener el azul egipcio

Para la preparación del azul egipcio se han empleado las recetas propuestas por la literatura internacional.^{4,6,7,16} Las sustancias químicas de partida para los experimentos de laboratorio, son las siguientes:

- Cuarzo.
- Silicato de calcio.
- Carbonato de calcio.
- Óxido de cobre (I).
- Carbonato básico de cobre (malaquita).
- Limaduras finas de bronce y cobre.
- Carbonato sódico.
- Bronce (Cu-4Sn).
- Arena del Desierto de Egipto.

En la Tabla 1, se exponen las diferentes sustancias y proporciones propuestas por la literatura internacional, y algunas de nuestras hipótesis sobre el tema. Pretendíamos conocer la fiabilidad de esas recetas y los procesos adecuados para conseguir el pigmento. Después de estos experimentos vendrían los dirigidos a la comprobación de la veracidad de lo comentado por Vitruvio en su libro “*De Architectura*”.

Tabla 1. Mezclas de reactivos empleadas para la síntesis del pigmento, a la temperatura de 850 °C durante 24 horas, así como el color obtenido en cada una de ellas.

MUESTRAS	REACTIVOS (equivalentes en masa)						COLOR
	CaCO ₃	Na ₂ CO ₃	SiO ₂	CuCO ₃ · Cu(OH) ₂	CaSiO ₃	Cu ₂ O	
1*	1	0,5	4	0,5	-	-	verde
2	-	0,5	4	-	1	0,5	azul
3*	1	0,5	4	0,5	-	-	verde
4	-	0,5	4	-	1	0,5	azul
5	-	0,5	4	-	1	0,5	azul
6	-	0,5	4	-	1	0,25	azul
7*	1	0,5	4	0,5	-	-	azul verdoso
8	-	0,5	4	-	1	0,5	verdoso
9	-	1,5	4	-	1	0,5	azul verdoso

* Recetas de la literatura internacional, 6, 8, 9, respectivamente.



Figura 1. Imágenes en las que se observa el aspecto de la mezcla antes (izquierda) y después (derecha) del proceso de trituración y homogeneización.

Después de pesadas en una balanza de precisión las cantidades adecuadas, se pasó al proceso de trituración y mezcla en un mortero de porcelana (Figura 1).

La molienda debe ser extremadamente fina, como propone Vitruvio en su receta, y la mezcla se va produciendo durante esta trituración, hasta conseguir una mezcla muy homogénea y, de tamaños de partícula extremadamente finos.

A continuación, viene la operación de llenado del crisol y compactación. Se debe presionar fuertemente la mezcla dentro del crisol, para conseguir la máxima compactación posible.

Finalmente, se introduce el crisol en el horno, que debe estar a 850 °C y se deja en él 24 horas.

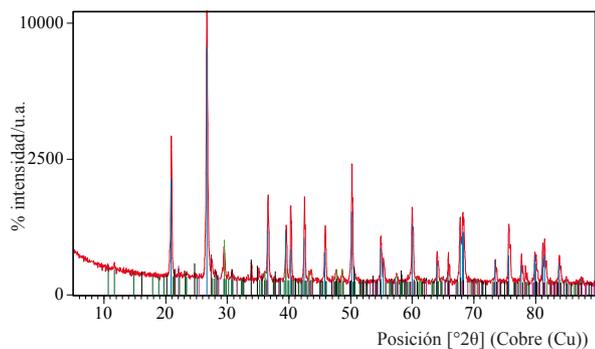
Transcurrido ese tiempo, se apaga el horno y se deja enfriar el crisol dentro de él. Al cabo de 6 horas, se saca el crisol del horno, y se vuelca; apareciendo un agregado de finos cristales de un rutilante y llamativo azul egipcio (Figura 2).



Figura 2. Imágenes en las que se muestra el estado final del pigmento obtenido, de un intenso color azul.

Obtención del pigmento azul egipcio según Marcus Vitruvius Pollio

Para obtener el pigmento azul egipcio, tuvimos que utilizar dos sustancias que no están en las propuestas de la literatura internacional y que, además, son tenidas por graves errores en la formulación de Vitruvio: el bronce y la arena del desierto. Si bien en algunas recetas propuestas aparece la arena del desierto, se pone el acento en la falta de cal. El bronce utilizado por nosotros ha sido del 10 % de estaño en masa (Cu-10%Sn);¹⁷ de igual composición a la mayoría de los bronces chipriotas.¹⁷ Para que funcionase la receta del ingeniero y arquitecto romano, era necesario que en la arena del desierto de Egipto hubiese presencia de caliza. La muestra se tomó de los alrededores de Alejandría, a diferentes profundidades, y se molió en mortero



Compuesto	Factor	Fórmula química
Cuarzo	0,761	SiO ₂
Carbonato de calcio y magnesio	0,034	(Mg _{0,03} Ca _{0,97})(CO ₃)
Silicato de calcio y magnesio	0,013	CaMgSiO ₄
Óxido de silicio	0,017	SiO ₂
Cristobalita	0,007	SiO ₂
Silicato carbonato de calcio hidratado	0,031	Ca ₇ (Si ₆ O ₁₈)(CO ₃) ₂ H ₂ O

Figura 3. Identificación de la arena del desierto de Egipto, mediante Difracción de Rayos-X.

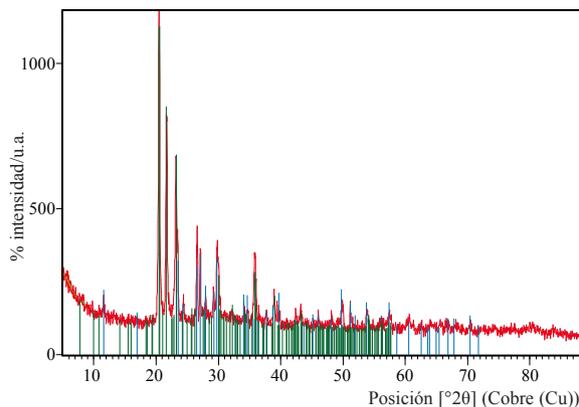
de forma exhaustiva, hasta obtener un polvo muy fino, como requiere la receta histórica de Vitruvio.

Se analizó mediante Difracción de Rayos-X y análisis físico-químicos; obteniéndose unos resultados muy interesantes para la validación de la receta del arquitecto romano (Figuras 3 y 4).

El carbonato de calcio estaba presente en las cantidades necesarias. No es de extrañar el resultado si se tiene presente que la arena del desierto de Egipto debe su composición química al resultado de la erosión de las montañas y rocas del lugar. El Egipto actual se formó durante el Eoceno, que comenzó hace 54 millones de años y finalizó hace 40 millones de años. Las rocas del Valle de los Reyes y del Valle de las Reinas y, todo el entorno egipcio, es de roca caliza formada por un cocolito (microfósiles de muy pequeño tamaño, ≤ 2 micras, de CaCO₃) muy característico y buen trazador de este periodo geológico (Eoceno). Con un clima de subtropical a cálido, el Sáhara egipcio era un mar de poca profundidad perteneciente al océano de Thetis. Por tanto, el suelo egipcio es de rocas calizas microfósilíferas formadas por esqueletos fósiles del cocolito *Gephrocapsa* Oceánica.

DETERMINACIONES	UNIDADES	Arena Desierto de Egipto (profundidad en cm)		
		0-20	20-40	40-60
ARENA	% en masa	85,4	84,1	86,1
LIMO	% en masa	12,7	14,25	12,1
ARCILLA	% en masa	1,9	1,65	1,8
ARENA	Carbonatos % en masa	15	16,8	5,3
DESIERTO	Cloruros ppm	200	300	700

Figura 4. Análisis físico-químico de la arena del desierto de Egipto, a diferentes profundidades.



Compuesto	Factor de escala	Fórmula química
Cuprorivaite	0,181	CaCu+2Si ₄ O ₁₀
Óxido de silicio	0,809	SiO ₂

Figura 5. Identificación del pigmento sintetizado de azul egipcio, mediante Difracción de Rayos-X.

Resultados de los experimentos de laboratorio

Antes de ensayar la receta de Vitruvio, se valoraron los resultados obtenidos con las diversas mezclas de sustancias químicas con el objeto de comprobar las propuestas de otros autores^{4,6,7,16} y nuestras propias hipótesis personales. En todos los casos el resultado fue positivo; obteniéndose el azul egipcio.

Identificado el pigmento mediante difracción de Rayos-X (Figura 5), comparamos las mezclas realizadas (Tabla 1), analizando las cantidades y condiciones de trabajo empleadas.

Las muestras que presentan, como reactivos de partida, óxido de cobre y silicato de calcio conducen, en todos los casos, a la identificación del cuprorivaite mediante la difracción de Rayos-X. Todos ellos exhiben un color azul, más o menos intenso, incluso, en alguna ocasión, una tonalidad predominantemente verdosa. Estas diferencias de tonalidades se deben a las proporciones empleadas en los reactivos de partida; comprobándose que a menor proporción de cobre, más tiende al color azul y menos al verde. Las condiciones empleadas (850 °C, 24 horas) han sido iguales para todos.

Es muy importante para obtener la tonalidad azul del pigmento, la molienda muy fina, una mezcla homogénea y una buena compactación en el crisol.

Otro aspecto importante en la síntesis del pigmento es la presencia del fundente, de forma que en ausencia de este lo que ocurre es una calcinación de la mezcla de partida, sin posibilidad de reaccionar.

Experimentación de la receta de Marcus Vitruvius Pollio

La receta de Vitruvio se ha respetado de forma escrupulosa; añadiendo los ingredientes que él señala, y usando como fuente de cobre el bronce de estaño al 10 % en masa y, como fuente de sílice (cuarzo) y de cal, la arena del desierto

por él propuesta. El resultado fue muy favorable, obteniéndose un bello azul egipcio. La utilización del bronce para la fabricación del azul egipcio era en Egipto, en la época de Vitruvio, una tradición milenaria; ya que parece estar aceptado, en la actualidad, por todos los investigadores del tema, que desde el periodo de Ramsés II (Dinastía XIX, siglo XIII a.C.), hubo un cambio en la técnica de preparación del azul egipcio. Se sustituyeron sustancias como la malaquita, azurita, cuprita, etc; como fuentes del elemento cobre, por el bronce, ya que se dejaron de explotar las menas de estos minerales y se primó el comercio del cobre, estaño y bronce procedentes de Asiria y del Mediterráneo Oriental.^{3,4,6,7,13,17} Estos autores, han encontrado estaño en los azules egipcios examinados desde esa época.

Se partió de las mismas sustancias descritas por Vitruvio: arena (Desierto Egipcio), sal mineral (carbonato sódico (fundente), bronce de Chipre (Cu-10%Sn), y su preparación fue semejante; aunque en nuestro caso utilizamos el bronce de estaño (Bronce de Chipre), haciéndolo virutas con una cola fina de ratón (lima muy fina de acero muy duro) y se compactó en el mismo crisol, que también sustituyó a la orza a la hora de introducir la mezcla en el horno.

Se calentó durante 24 horas a 850 °C y se dejó enfriar en el horno, obteniéndose un pigmento cristalino granular de un hermoso color azul (Figura 2).

Después de estos experimentos la antigua receta de Vitruvio queda validada, pudiéndose interpretar de la siguiente manera:

“.....se tritura arena –arena del desierto: cuarzo y cal– con flor de sal mineral –fundente: carbonato sódico natural de los yacimientos egipcios próximos a Alejandría–, formando una mezcla tan fina como la harina –tamaño de partícula muy fina–, se revuelve con bronce de Chipre– aleación Cu-10 %Sn–, limado a partir de gruesas láminas –barras de bronce–, hasta que se forme una masa compacta –mezcla homogénea humedecida–; después, frotando las manos se van haciendo unas pelotitas que, una vez bien apretadas –buena compactación en el crisol, en nuestro caso–, se pondrán a secar –la mezcla se humedeció con agua para conseguir una buena homogeneidad y una buena compactación–. Cuando estén perfectamente secas –para que no estallen en el horno–, se colocan en una orza de barro –crisol refractario–, que introduciremos dentro de un horno –horno eléctrico en nuestro caso–; una vez se haya secado conjuntamente el metal y la arena, gracias a la elevada temperatura del fuego –850 °C durante 24 horas–, se produce un intercambio de sus propios vapores –reacción química entre los componentes de la mezcla– con la consiguiente eliminación de sus propiedades. A causa de la fuerza del fuego, se consumen sus características originales y adquieren un color azul –el pigmento azul egipcio: filosilicato de cobre y calcio–”.

Resumen

Después de examinadas y experimentadas las recetas propuestas por la bibliografía internacional y, otras nuestras, hemos podido comprobar que para que resulten exitosas se deben cuidar las siguientes operaciones:

- Molienda muy fina.
- Mezcla homogénea.
- Compactación en crisol.

La temperatura debe ser, en todos los casos, de 850 °C y, la duración del calentamiento, 24 horas; dejando enfriar el crisol en el horno. Temperaturas más elevadas conducen a la obtención de una “frita” (esmalte) y tiempos más cortos no completan la reacción.

Después de estos experimentos, la receta de Marcus Vitruvius Pollio, queda completamente validada; ya que la arena del desierto lleva suficiente cal para aportar el calcio necesario y el bronce, aporta el cobre necesario para que se produzca el pigmento azul. La presencia de estaño en el producto final está refrendado por los análisis químicos realizados a este pigmento, desde la Dinastía XIX, hasta la existencia del ingeniero y arquitecto romano.

Agradecimientos

Nuestro más sincero agradecimiento a Alfonso Rodríguez y Eugenio Baldonado, del CAI de Microscopia Electrónica (Luis Bru) y a Julián Velázquez, del CAI de Difracción de Rayos-X, ambos de la Universidad Complutense de Madrid.

Bibliografía

1. G. Acorsi, G. Verri, M. Bolognesi, N. Armaroli, C. Clementi, C. Miliani, A. Romani, *Chem. Commun.*, **2009**, 3392–3394.
2. J. Riederer en *Egyptian Blue. Artists Pigments: a Handbook of their History and Characteristic*, volume 3, (E. West Fitzhugh ed. Oxford University Press), Oxford, **1997**, pp. 23–45.
3. W. T. Chase, *Science and Archaeology*, edited by R. H. Brill. Cambridge: MIT Press, **1971**, 80–90.
4. G. Bayer, H. G. Wiedemann, *Sandoz-Bulletin* **1976**, *40*, 20–39.
5. J. Baines, *American Anthropologist* **1985**, *87*, 282–297.
6. G. Bayer, H. G. Wiedemann, *Naturwissenschaften* **1975**, *62*, 181–182.
7. H. Jaksch, W. Seipel, K. L. Weiner, A. E. Goresy, *Naturwissenschaften*, **1983**, *70*, 525–535.
8. M. S. Tite, M. Bimson, M. R. Cowell en *Technological Examination of Egyptian Blue*, In *Archaeological Chemistry III*, edited by J. B. Lambert. Washington, D. C.: American Chemical Society, **1984**, pp. 215–242.
9. P. Horne, *Expedition*, **1998**, *40*, 4–11.
10. L. Stodulski, E. Farrell, R. Newman, *Studies in Conservation*, **1984**, *29*, 143–154.
11. J. M. Roman, E. Navas, *Arqueología y Territorio* **2006**, 170.
12. J. Juan-Tresserras, *Complutum 11*, Universidad Complutense de Madrid (Madrid), **2000**, 245–252.
13. R. Weatherhead, A. Buckley: “Artist’ Pigments from Amarna”. B. Kemp (Ed.), *Amarna Reports V*. London: Egypt Exploration Society, **1989**, pp. 202–239.
14. B. Gineau en *Albores de la belleza. La pintura romana antigua. Colores y técnicas*, (Ars Latina Ed.), París, **1995**, pp. 499–516.
15. M. Doerner en *Los materiales de pintura y su empleo en el arte*, (Edit. Reverté, S.A.), Barcelona, **1975**, pp. 236–261.
16. P. Bianchetti, F. Talarico, M. G. Vigliano, M. Fuad Ali, *Journal of Cultural Heritage*, **2000**, *1*, 179–188.
17. J. P. Mohen en *Metalurgia Prehistórica*, (Edit. Masson, S.A.), Barcelona, **1992**, pp. 135–165.