

# Azul maya: una maravillosa nanotecnología precolombina

**E**ste documento está dedicado a nuestro mentor y amigo Constantino Reyes-Valerio, quien con su experiencia, dedicación y entusiasmo nos transmitió su interés por estudiar lo que fue uno de los amores de su vida: el azul maya. Ninguno de los trabajos realizados hubiera sido posible sin la activa contribución de Constantino. Todos nosotros se lo agradecemos profundamente.

| 39

## Un resumen

La composición del azul maya, el maravilloso pigmento azul sintetizado por los mayas, ha constituido un rompecabezas para los científicos durante décadas. ¿Cómo explicar su brillo y su extrema estabilidad de material híbrido orgánico/inorgánico? El azul maya es un complejo formado por arcilla palygorskita y añil. Las teorías más respetadas defienden que la molécula poseedora del color se encuentra al interior de los canales de un mineral opaco a la luz. Es un concepto de la nano-estructura del azul maya, fundado en nuevos datos que puede resolver esta contradicción: el añil rellena los “surcos” (mitad de los canales cortados en la dirección del eje de las fibras) que se encuentran en la superficie de los cristales de palygorskita. Los surcos son canales cortados a la

\* Getty Conservation Institute, Los Angeles, CA.

\*\* Università di Torino, Dip. Scienze Mineralogiche e Petrologiche.

Durante años, muchos colegas contribuyeron con su trabajo al estudio del azul maya, pero ninguno como Constantino Reyes-Valerio, quien logró interesarnos en su estudio. Su entusiasmo y profesionalismo resultaron de inspiración para todos nosotros. Echamos de menos sus consejos científicos y su calor humano. Agradecemos a Alejandro Martínez Muriel su permiso para obtener las muestras necesarias, y a Diana Molatore, Leonardo López Luján y Arnoldo González por su preciosa contribución. Se agradece también a los colegas del GCI: Eric Doehne, Jim Druzik, Michael Schilling, Herant Khanjan, Joy Mazurek y Carol Namowicz, por su inestimable ayuda. A Aurora Ortega de Torre, por su enorme ayuda en la traducción.

mitad debido a las terminaciones de los cristales de la arcilla, los cuales pueden formar enlaces de hidrógeno con la molécula del colorante, esto explica la estabilidad y el color del complejo. Los diferentes colores que se encuentran en las pinturas murales de Cacaxtla se pueden explicar utilizando varias técnicas analíticas: el color turquesa claro se aplicó *a fresco* como fondo de la pintura y puesto que está mezclado con cal blanca, resulta ser más claro. La tonalidad más oscura está pintada sobre un nivel *a secco*, y de este modo en el azul maya el azul oscuro es mucho más rico.

El azul maya es un pigmento que fue perfeccionado por los mayas en el siglo VIII. Antes de su descubrimiento casi no había ningún color azul en las pinturas precolombinas; la introducción del azul maya aumentó sustancialmente la paleta del artista de la época. A causa de su atractivo y su estabilidad a la luz, ha sido utilizado ampliamente en pintura mural, estatuas, cerámicas, códices, e incluso en el caso de sacrificios humanos.<sup>1</sup> Su uso continuó durante la época colonial española.<sup>2</sup> En Cuba hemos encontrado dos ejemplos del uso del azul maya en pinturas murales: el primero en el Valle de los Ingenios (Trinidad), en la villa rural de Guaimaro. El segundo en una esquina del vestíbulo del convento de Santa Clara, en La Habana. Ambos ejemplos pueden ser fechados a mediados del ochocientos, indicando que el uso del azul maya continuó en Cuba durante más de dos siglos después de que fuera abandonado en México.<sup>3</sup> El añil fue transportado a Cuba, que es una parada

natural del viaje hacia Europa en barco y quizás con el añil se transportó también el “añil de roca”,<sup>4</sup> es decir el azul maya. Éste no hubiera podido ser producido en Cuba, puesto que no hay minas de palygorskita o sepiolita, las únicas dos clases de arcilla que pueden permitir la producción del pigmento.

Es plausible que una pequeña cantidad de azul maya llegara hasta Europa, ya que los pigmentos azules fueron raros y muy caros (lapislázuli) o de baja calidad y problemáticos en su utilización (azurita, la cual se altera cambiando de color). El azul maya en pintura mural puede ser fácilmente confundido con el vidrio de cobalto molido (esmalte), y si no se hacen análisis específicos el pigmento puede no ser identificado. Es posible, entonces, que algunas pinturas murales, particularmente en España, puedan contener azul maya sin que haya sido reconocido como tal hasta ahora, ya que nunca ha sido buscado de manera correcta. Esto es ciertamente una hipótesis, pero creo que su estudio podría valer la pena.

El azul maya es extremadamente estable: pudiendo resistir al ataque de ácido nítrico concentrado, álcali y disolventes orgánicos muy fuertes sin perder su color. A menos que fuera llevado con anterioridad por vía marítima a Europa desde Cuba, en Europa fue visto por primera vez cuando Stevens y Catherwood (1839) exploraron las ruinas mayas de Yucatán. Gettens y Stout le dieron su nombre<sup>5</sup> pero durante mucho tiempo siguió siendo un misterio. A finales de la década de 1950 la difracción de los rayos X por polvo (XRD) comprobó la presencia de la arcilla palygorskita y el añil fue identificado después con análisis de espectroscopia infrarroja.<sup>6</sup> En

<sup>1</sup> Constantino Reyes-Valerio, *De Bonampak al Templo Mayor: el Azul maya en Mesoamérica*, México, Siglo XXI, 1993.

<sup>2</sup> Alberto A. Tagle, Hubert Paschinger, Helmut Richard, Guillermo Infante, “Maya Blue: its Presence in Cuban Colonial Wall Paintings”, *Studies in Conservation*, vol. 35, núm. 3, agosto de 1990, pp. 156-159.

<sup>3</sup> Constantino Reyes-Valerio, *op. cit.*

<sup>4</sup> *Idem.*

<sup>5</sup> Rutherford J. Gettens y G. L. Stout, *Painting Materials: A Short Encyclopedia*, Nueva York, Van Nostrand, 1942.

<sup>6</sup> Rutherford J. Gettens, “Maya Blue: An Unsolved Problem



Figura 1. Hojas de *Indigofera suffruticosa* que contienen indigotina, sustancia que, después de sufrir un proceso de oxidación, produce añil. La planta fue cultivada por Constantino Reyes-Valerio. Foto: Giacomo Chiari.

México el añil se obtiene normalmente a partir de la planta común *Indigofera suffruticosa*. Una simple mezcla de palygorskita y añil no revela el típico color turquesa ni tampoco lo hace resistente a los ataques químicos. Por lo tanto, no es suficiente mezclar la arcilla y el añil para obtener el azul maya. La técnica de producción fue redescubierta cuando fueron conscientes de que la mezcla de colorante/arcilla tenía que ser calentada a una temperatura de 100-110°C durante algunas horas para producir el azul maya.<sup>7</sup>

in Ancient Pigments”, en *American Antiquity*, núm. 27, 1962, pp. 557-564; R. Kleber, L. Masschelein-Kleiner y J. Thissen, “Studies and Identification of Maya Blue”, en *Studies in Conservation*, vol. 12, núm. 2, 1967, pp. 41-56; H. Van Olphen, “Maya Blue: A Clay-organic Pigment?”, en *Science* 154 (3749), 1966, pp. 645-46.

<sup>7</sup> Giacomo Chiari, Roberto Giustetto y G. Ricchiardi, “Crystal Structure Refinements of Palygorskite and Maya Blue from Molecular Modelling and Powder Synchrotron Diffraction”, en *European Journal of Mineralogy*, vol. 15, núm. 1, 2003, pp. 21-33; Roberto Giustetto y Giacomo Chiari, “Crystal Structure Refinement of Palygorskite from Neutron Powder Diffraction”, en *European Journal of Mineralogy*, vol. 16, núm. 3, 2004, pp. 521-532; Constantino Reyes-Valerio, *op. cit.*

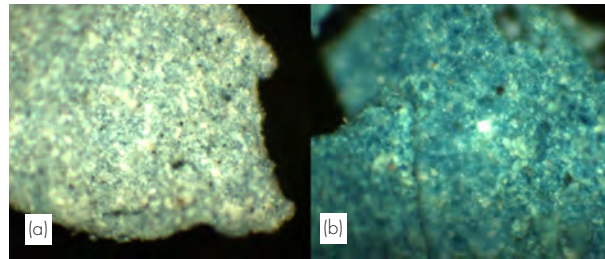


Figura 2. Mezcla de palygorskita y añil: a) antes y b) después de calentar a 110°C. Nótese que en a) el añil es de preferencia concentrado en pequeños grumos oscuros y, por contrario, en b) están más dispersos, dando a la masa de la arcilla el característico color. Foto: Giacomo Chiari.

Como Constantino Reyes-Valerio ha demostrado que su producción es bastante fácil, incluso utilizado exclusivamente las técnicas sencillas de las que disponían los mayas, nosotros también pudimos hacerlo utilizando las hojas de *Indigofera* y la palygorskita que llegaba de Sac’lum, cerca de Chichen Itzá, que Constantino generosamente nos brindó del cultivo de la planta de su balcón (figura 1). Si miramos el proceso de formación a través de un microscopio, se pueden ver (figuras 2 a, b) que los grumos de añil muy oscuros son claramente visibles antes de calentar la mezcla. Después de calentarla a más o menos 100-110°C el tono general parece más turquesa y los grumos están más dispersos, ya que ahora el añil ha reaccionado con la arcilla.

El proceso de calentar es fundamental, como vamos a ver en seguida. Gran cantidad de azul maya puede ser producido utilizando ya sea añil sintético o natural (en polvo), calentando la arcilla a 350°C por algunas horas hasta que toda el agua que contenga sea completamente eliminada (inclusive el agua zeolítica localizada al interior de los canales). Después de sacar la arcilla del horno y antes de que se enfríe totalmente (más o menos 150-200°C), se puede añadir hasta 2% de añil. Se produce una reacción instantánea y toda la arcilla se vuelve de color turquesa, mientras el color oscuro del añil desaparece. Esta reacción es prácticamente instantánea. Esta téc-

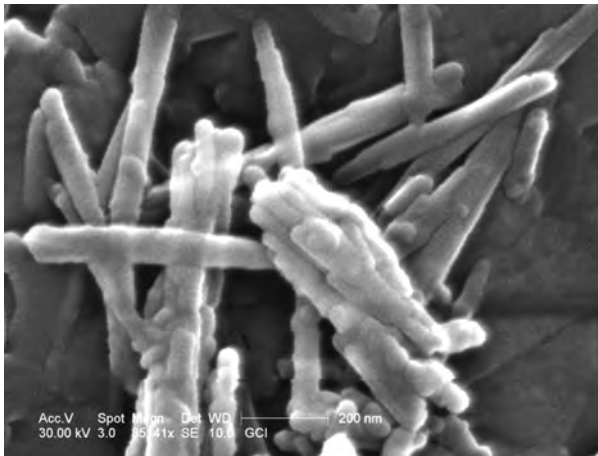


Figura 3a. Cristales de palygorskita como pueden verse con un ESEM, después de cubrirlos con una fina capa de paladio. Foto: Eric Doehne.

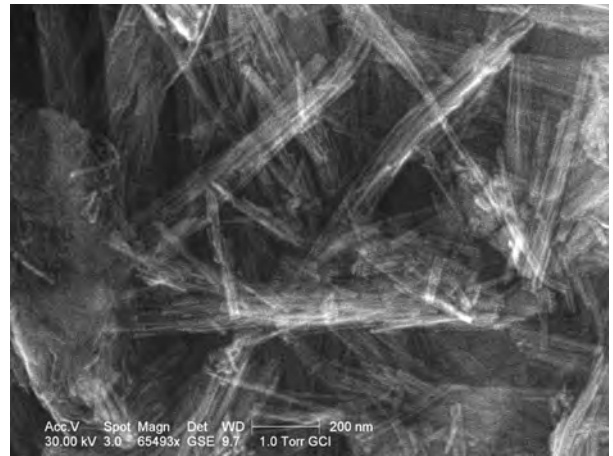


Figura 3b. Imagen ESEM de palygorskita en estado natural (sin capa de metal). Foto: Eric Doehne.

nica puede ser considerada como otra vía posible de producir azul maya, además de la ya propuesta por Constantino Reyes-Valerio.<sup>8</sup> De esta manera el pigmento se produce mezclando los ingredientes en forma seca, cuando el añil ya ha sido obtenido de la planta en forma de polvo. La manera en que Reyes-Valerio utiliza los ingredientes de forma húmeda, antes que sean oxidados, puede explicar mejor el descubrimiento accidental del pigmento como un producto secundario de la producción del añil. La palygorskita no es un mineral que se encuentre en abundancia, por lo que todavía no están claras las razones por las que de forma bastante pura esta rara arcilla se pone en contacto con el añil. Pero Reyes-Valerio demostró que el agua que se añade a las hojas de *Indigofera* para la producción de añil contiene en realidad arcilla.<sup>9</sup>

Años después se hicieron diferentes análisis y se recogieron muchos más datos sobre la naturaleza del azul maya, culminando con la estructura de la palygorskita y el azul maya, utilizando el sincrotrón y la difracción de los neutrones.<sup>10</sup>

<sup>8</sup> Constantino Reyes-Valerio, *op. cit.*

<sup>9</sup> *Idem.*

<sup>10</sup> Giacomo Chiari, Roberto Giustetto y G. Ricchiardi, *op. cit.*,

La cristalografía moderna puede localizar fácilmente todos los átomos comenzando por un único cristal. Desgraciadamente no es posible aislar un único cristal de palygorskita, puesto que es un material fibroso (figuras 3a, b) y la fibras son extremadamente pequeñas de diámetro. Por este motivo se ha debido utilizar la difracción de polvo, la cual nos da menos cantidad de información debido a la superposición de los efectos de difracción. Además, dos de las diferentes clases de palygorskita están siempre juntas, una ortorrómbica y otra monoclinica, lo que hace el refinamiento de las dos estructuras extremadamente difícil. De todas maneras, utilizando el sincrotrón y la difracción de neutrones se han podido obtener datos estructurales bastante buenos. En la figura 4 se ve la prueba definitiva de cómo están unidos el añil y la palygorskita. Este trabajo estructural ha sido obtenido sintetizando el azul maya del añil deuterizado. Los átomos marcados con una D en la molécula de añil son deuterio.

2003; Roberto Giustetto y Giacomo Chiari, *op. cit.*, 2004; Roberto Giustetto, David Levy y Giacomo Chiari, "Crystal Structure Refinement of Maya Blue Pigment Prepared with Deuterated Indigo, Using Neutron Powder Diffraction", en *European Journal of Mineralogy*, vol. 18, núm. 5, 2006, pp. 629-640.



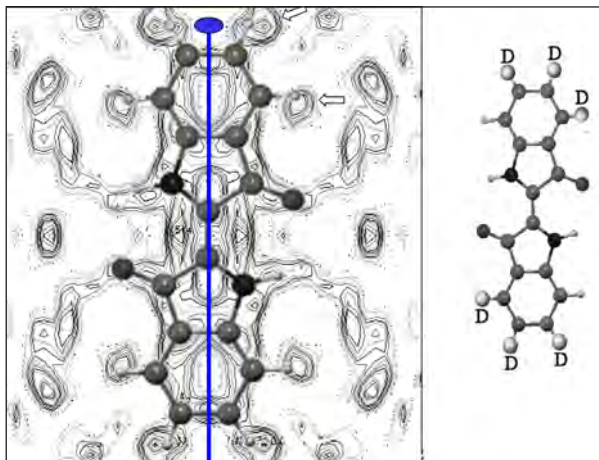


Figura 4. Mapa Cristalográfico de Fourier. Diferencia con dibujo computarizado del añil deuterizado superpuesto a la estructura de palygorskita. Las dos flechas corresponden a los átomos de deuterio. La molécula está desordenada en la dirección del eje longitudinal. (Roberto Giustetto, David Levy y Giacomo Chiari, "Crystal Structure Refinement of Maya Blue Pigment Prepared with Deuterated Indigo, Using Neutron Powder Diffraction", en *European Journal of Mineralogy*, vol. 18, núm. 5, 2006, pp. 629-640.)

terios, lo cual es claramente visible utilizando la difracción de neutrones, al contrario del hidrógeno con los rayos x.

Todo esto confirma la teoría aceptada por todos los autores, según la cual el añil rellena los canales de la arcilla. Pero algunos datos parecen contradecir esta teoría. Para que las moléculas de añil puedan entrar en los canales, es necesario primero que toda el agua zeolítica se vaya. Cálculos de modelos químicos<sup>11</sup> sugieren que la arcilla prefiere el contacto del agua al del añil. En otras palabras, el añil no puede desplazar el agua de los canales. Cuando una molécula entra en un canal, forma dos enlaces de hidrógeno con la arcilla, los cuales tienen que estar simultáneamente rotos, de modo que la molécula pueda moverse de un grado al interior. Una segunda molécula de añil puede entrar después, solamente tres grados en este proceso y con poca probabilidad. Entonces, la penetración del añil en los ca-

<sup>11</sup> Giacomo Chiari, Roberto Giustetto y G. Ricchiardi, "Crystal Structure Refinements...", *op. cit.*, 2003.

nales es la suma de un número muy grande de eventos improbables. La única conclusión posible es que el añil rellena solamente la parte más superficial de los canales, es decir, un nivel sobre la cara perpendicular de la fibra. Estas moléculas funcionan como una tapa e impiden la inserción de otras moléculas.

Datos de XRD indican que la cantidad de añil del azul maya es muy bajo (1-2%). Sin embargo, el color transmitido al azul maya es muy brillante, lo que es difícil de explicar si la molécula que tiene el cromóforo está dispersa al interior de los canales de un mineral opaco. Imágenes directas del azul maya muestran que las fibras de palygorskita de escala micrométrica están en realidad hechas por haces de micro-fibras más pequeñas en la escala de 10-100 nm (figura 3b). Midiendo las dimensiones de los cristales de las imágenes ESEM se puede fácilmente calcular que, si todos los canales estuvieran rellenos de añil, su contenido sería de  $\sim 6\%$ , es decir, tres veces más que el valor medido. Claro que este dato no es concluyente, puesto que los canales pueden estar en parte vacíos o ciertas moléculas residuales de agua pueden haberse quedado en su interior.

Algunos cálculos de modelos químicos<sup>12</sup> demostraron que la absorción del añil en palygorskita deshidratada es exotérmica. Al contrario, la absorción del añil en palygorskita hidratada es muy endotérmica: la arcilla prefiere mucho más el agua al añil. Esto puede explicar porque el azul maya no se obtiene simplemente mezclando los dos componentes, sin calentar la mezcla, puesto que la inserción del añil en los canales completamente llenos de agua es energéticamente desfavorecida. Al contrario, si el agua es removida por calentamiento, el añil puede ocupar su espacio y así formar un compuesto estable.

<sup>12</sup> *Idem*; Roberto Giustetto y Giacomo Chiari, "Crystal Structure...", *op. cit.*, 2004.

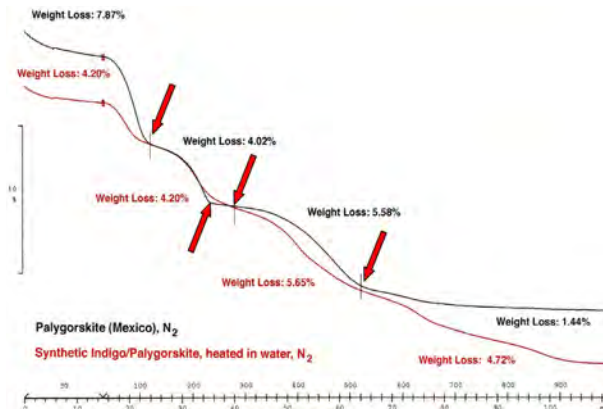


Figura 5. Análisis de termo-gravimetría (TGA) de la palygorskita y del azul maya. Nótese la diferencia en temperatura a la cual el agua zeolítica sale al segundo grado entre palygorskita (230°C) y azul maya (280°C). Esto se puede explicar por el hecho de que las moléculas de añil pueden trabajar como tapas en los canales. El contenido total del agua es el mismo, así que el añil no ha sustituido el agua de los canales. (Giacomo Chiari *et al.*, *Pre-Columbian Nanotechnology: Reconciling the Mystery of the Maya Blue Pigment*, en *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, vol. 90, núm. 1, 2008, pp. 3-7.)

44 |

La deshidratación de la palygorskita y del azul maya sintetizado ha sido estudiada con el análisis de termo-gravimetría (figura 5). Los grados importantes son, primero, el agua absorbida en la superficie es eliminada por abajo de  $\sim 120^\circ\text{C}$ ; segundo, el agua coordinada (zeolítica) viene eliminada a temperaturas superiores a  $120\text{-}280^\circ\text{C}$ ; por último, el agua estructural es eliminada a temperaturas aún más altas.

La pérdida de peso en el primer grado (agua con poros libres, con término a  $\sim 120^\circ\text{C}$ ) es mucho más fuerte para la palygorskita que para el azul maya (7.9 y 4.2%, respectivamente). Esto indica que la superficie del azul maya es menos apta para aceptar agua. Es compatible con una capa de añil que cubre la superficie externa. En el segundo grado de pérdida en peso, el agua zeolítica deja los canales completamente vacíos a una temperatura más baja por la palygorskita ( $230^\circ\text{C}$ ) que por el azul maya ( $280^\circ\text{C}$ ), pero la pérdida total de peso es casi la misma (4% por palygorskita *vs.* 4.2% por azul maya).

Las teorías actuales y los cálculos de modelos

moleculares sugieren que el agua zeolítica tiene que desaparecer antes que el añil pueda entrar en los canales. Pero los análisis térmicos muestran que es necesario calentar a alta temperatura ( $230\text{-}280^\circ\text{C}$ ) para poder obtener esto. Sin embargo, el azul maya puede ser fácilmente producido a  $\sim 100^\circ\text{C}$ .<sup>13</sup> El añil probablemente sólo puede penetrar en los canales por una molécula, puesto que, debido a la formación de enlaces de hidrógeno, la primera molécula va a estar fuertemente enlazada a la arcilla. Esto impide una ulterior penetración y el ingreso de otras moléculas. Entonces, ¿cuál es el enlace del añil con la arcilla en el azul maya? Una posible explicación es que el añil no entra en los canales, sino solamente en los “surcos” que se encuentran al exterior de la superficie de los cristales. Las terminaciones de un cristal se producen por las caras que más fácilmente se separan y en la dirección del eje de las fibras, sin duda al final de las fibras mismas, donde se encuentra el ingreso de los canales (figura 6). Un estudio estructural evidencia que los surcos son bastante profundos para recibir la molécula del añil y que los enlaces de hidrógeno se pueden formar igualmente bien. El análisis de termo-gravimetría (TGA) comprobó que a  $\sim 100^\circ\text{C}$  casi toda el agua se había ido de los surcos, así que es posible que el añil pueda penetrar en ellos. El agua de los canales, al contrario, puede ser eliminada solamente a temperaturas más altas. Utilizando este modelo podemos comprender la formación del azul maya a  $\sim 100^\circ\text{C}$ . La inserción del añil no necesita que una molécula se mueva siguiendo el eje del canal, y para poder hacer esto tiene que romper los fuertes enlaces de hidrógeno que ya se han formado. Cuando una molécula ha sido adsorbida en los surcos, ya no se moverá y se

<sup>13</sup> Para una interpretación completa de la TGA, véase Giacomo Chiari *et al.*, *op. cit.*, 2008.

decompondrá en este mismo lugar calentando a temperaturas de 580°C.

La velocidad de reacción es más grande en este modelo comparado con el modelo de canales, porque las moléculas de añil pueden entrar simultánea e independientemente las unas de las otras (figura 7). Calculando la cantidad máxima de añil en los surcos, y teniendo en cuenta el tamaño medio de los cristales, se obtiene el valor de 1.95%, en buen acuerdo con las medidas de los análisis térmicos y los estudios estructurales.

Siendo distribuida solamente en las superficies externas de los cristales, una pequeña cantidad de colorante parece suficiente para impartir un fuerte color azul maya. Las caras de los cristales de palygorskita están de este modo parcialmente cubiertas de moléculas no-polares, y el agua (y el ácido nítrico) no entra en contacto ni ataca el doble enlace del añil, que está así protegido de la oxidación. De esta manera se puede explicar la estabilidad del azul maya ante los oxidantes. La estabilidad a alta temperatura quizá se deba al hecho de que la combinación de los dos enlaces de hidrógeno tienen que estar simultáneamente rotos y que la molécula no es libre en su rotación. Por esto, cuando un enlace de hidrógeno se rompe la molécula se mantiene en su sitio por el otro enlace. La formación nueva

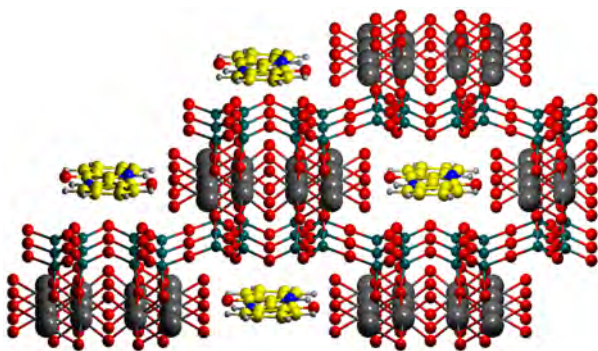


Figura 6. Estructura del azul maya proyectada sobre la cara (001). El añil (amarillo) se encuentra en los surcos y en un canal (Giacomo Chiari *et al.*, *op. cit.*, 2008).

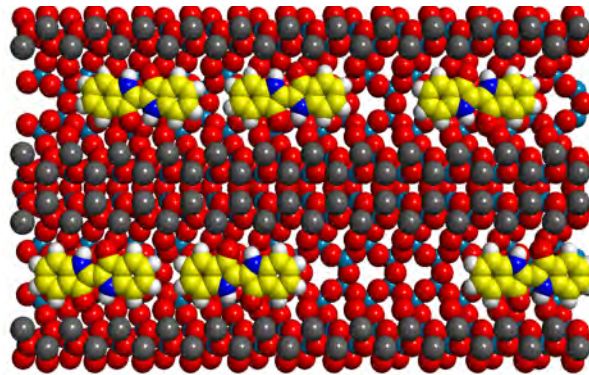


Figura 7. Distribución desordenada del añil en los surcos de las caras laterales de las fibras de palygorskita. (*Idem.*)

del enlace que se acaba de romper es, por lo tanto, favorable.<sup>14</sup>

A pesar de que en la actualidad se han entendido ya los detalles estructurales del complejo del azul maya, todavía genera muchos problemas. El primero es su datación.<sup>15</sup> Hasta ahora no se ha hecho ninguna datación directa del pigmento con éxito. En teoría el añil tendría que ser fácil de extraer y datarlo con la técnica rutinaria del AMS C<sup>14</sup>. Los resultados obtenidos sobre muchas muestras de pinturas murales han sido pobres e intermitentes.<sup>16</sup> Se puede decir que una cantidad variable de materia orgánica se puso en los canales en el momento de la formación de la arcilla. Este “carbono muerto” puede “envejecer” la fecha. Un proyecto futuro podría ser el de destruir la estructura de la arcilla con ácido fluorhídrico y aislar el añil con la secuencia de dos reacciones químicas típicas de esta molécula. El resultado puede valer la pena, puesto que permitiría la determinación de la fecha de pinturas

<sup>14</sup> *Idem.*

<sup>15</sup> Giacomo Chiari, Roberto Giustetto, E. Sacchi, C. Reyes-Valerio, G. Bonani, “Dating Mesoamerican Paintings by <sup>14</sup>C AMS Measurements del Indigo Contained in the Maya Blue Pigment: A Feasibility Study”, en *Archaeometry in Europe in the Third Millennium*, Roma, Accademia Nazionale dei Lincei, 2002, pp. 197-202.

<sup>16</sup> *Idem.*





Figura 8. Ejemplos de azul maya claro y oscuro en una pintura mural de Cacaxtla. Foto: Giacomo Chiari.

46 |

individuales, independientemente de los datos arqueológicos.

Un segundo problema sería el de establecer la procedencia del pigmento: ¿se produjo el azul ma-

ya en una localidad únicamente y de allí fue exportado a todos los otros sitios o al contrario, fue la técnica la que se exportó de una localidad a otra? El soporte mural de la pintura es obviamente local, entonces tenemos que observar solamente al pigmento. Los ensayos preliminares mostraron que la cantidad de las fases monoclinica y ortorrómbica en la palygorskita varía de una mina a la otra, pero es constante en la misma localidad. Se puede tratar de resolver este problema comparando este dato en varias muestras de

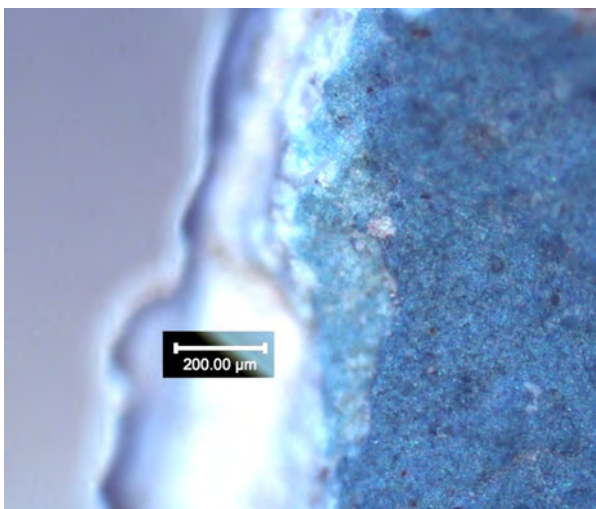


Figura 9. Micro-fotografía de una región donde falta la capa oscura superficial, y se puede ver el nivel claro bajo ella. Foto: David Carson.

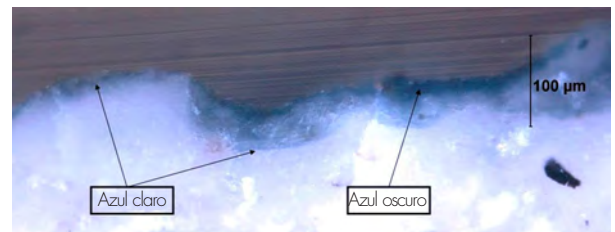


Figura 10. Corte de una pintura mural de Cacaxtla. Los dos niveles superpuestos (oscuro más superficial) son claramente visibles. Foto: David Carson.



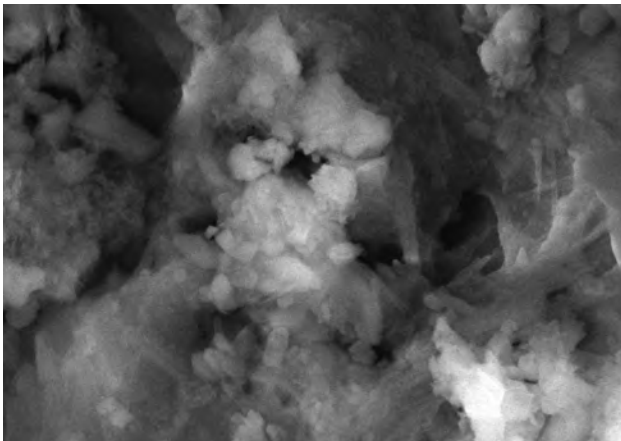


Figura 11a. Imagen ESEM del nivel oscuro de la pintura de Cacaxtla. Los cristales de palygorskita son claramente visibles y muy abundantes en este nivel. Foto: David Carson.

azul maya que lleguen de procedencias diferentes. Si todos tienen la misma proporción de las dos fases es probable que el azul maya haya sido producido en un solo sitio. Desgraciadamente, el proceso para obtener esta información es muy complejo.

Un tercer problema es el de explicar las diferentes tintas del color azul maya. La típica turquesa puede llegar hasta un azul oscuro o mostrar tonalidades de verde. Esto es muy evidente en las pinturas murales de Cacaxtla (figuras 8 y 9), donde se pueden ver dos tonalidades de azul, y está claro que el artista las ha empleado de manera intencional, para obtener un maravilloso contraste. Se proponen dos posibles explicaciones. La primera de ellas es acorde con el color turquesa obtenido mediante la síntesis del pigmento: el color claro sería el azul maya, en el cual el añil se encuentra en la proporción adecuada para rellenar los surcos. Si esto es correcto, una posible explicación del azul más oscuro podría deberse a un exceso de añil añadido a propósito. La segunda posibilidad es que el color oscuro sea el “verdadero” azul maya y la tinta clara se haya obtenido mezclando el pigmento con otro blanco, por ejemplo con cal o aplicándolo al muro de manera

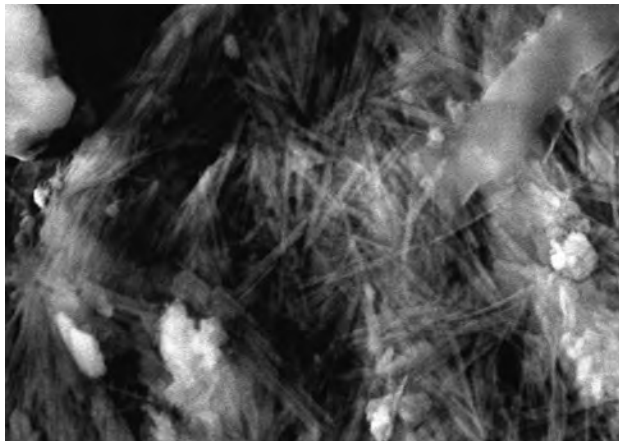


Figura 11b. Imagen ESEM del nivel claro del corte de la pintura de Cacaxtla. Los cristales de palygorskita son muy pocos y cubiertos con calcita en el nivel claro. Foto: David Carson.

diferente. Con espectrometría infrarroja (FTIR) se puede observar que más que un exceso de añil en la sección oscura hay una abundancia de palygorskita con respecto a la clara. En la figura 10 se ve una sección delgada, mientras en otra son visibles los dos colores y está muy claro que el más oscuro se encuentra arriba en la capa más clara.

Es evidente que el color claro ha sido distribuido sobre todo el muro como base y se pintó de manera uniforme, quizás por un asistente del pintor. La técnica utilizada fue *a fresco*, como se puede observar gracias a la penetración progresiva del pigmento en el mortero del soporte. El nivel más oscuro está pintado claramente *a secco* sobre la base clara. Seguramente esta operación fue hecha por un pintor experto, el verdadero artista. En las figuras 11a, b, se ven las márgenes ESEM de los dos tipos de tintas. Esto explica bastante bien la diferencia de color que se observa en el azul maya utilizado en las pinturas murales de Cacaxtla.

## Conclusiones

Esta nueva manera de interpretar la nanoestructura del azul maya puede explicar su color úni-

co, su estabilidad y la facilidad de formación: el añil no penetra en los canales sino que es adsorbido en los surcos (mitad de los canales cortados en la dirección del eje de las fibras) que cubren las caras de los cristales. El agua adsorbida en los surcos puede ser eliminada a la temperatura de formación del azul maya ( $\sim 100^\circ\text{C}$ ), dejando así sitio libre para que el añil pueda entrar. Al contrario, el agua zeolítica contenida en los canales necesita temperaturas mucho más altas para eliminarse. La cantidad de colorante que llena los surcos está relacionada con las medidas de ter-

mo-gravimetría y de sincrotrón. Esta nueva perspectiva permite interpretar varios fenómenos para los que antes no teníamos explicación, ya sea con respecto a la estructura como al proceso de formación del azul maya. La presencia de azul maya de diferentes colores en la misma pintura mural se puede explicar por las diferentes maneras de aplicación (mezclada la cal en un proceso al “fresco” para el color turquesa claro del fondo o con un médium por el momento desconocido para la tonalidad oscura aplicada a “seco” sobre el nivel turquesa de base).



Constantino Reyes-Valerio (CRV) en su 80 aniversario, acompañado de su familia y amigos.