

# THE APPLICATION OF MULTI-BAND IMAGING INTEGRATED WITH NON-INVASIVE SPOT ANALYSES FOR THE EXAMINATION OF ARCHAEOLOGICAL STONE ARTEFACTS

## APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE IMAGEN MULTI-BANDA INTEGRADAS CON EL ANÁLISIS NO INVASIVO DE PUNTOS PARA EL EXAMEN DE OBJETOS ARQUEOLÓGICOS DE PIEDRA

Susanna Bracci, Roberta Iannaccone, Donata Magrini  
*Institute of Science for Cultural Heritage (ISPC-CNR), Italy.*

*susanna.bracci@cnr.it*

**Abstract:** multi-band imaging techniques have become part of the range of analytical methodologies available in archaeological contexts, in particular ultraviolet-induced luminescence (UVL) and visible-induced luminescence (VIL). Photographic campaigns, implemented and integrated with a non-invasive or micro-invasive survey, represent a strategic tool for gaining thorough knowledge of an archaeological artefact. Specific attention is given to the study of the original polychromy on statues, in most cases reduced to tiny traces. Excavation, bad warehousing and, in some cases, excessive cleaning due to a misinterpretation of classical sculpture as totally white have led to an almost entire loss of the original polychromy. The analytical protocol here proposed, based on the combination of imaging and spot techniques, could help reveal residual traces of patterns, characteristic pigments such as red lakes and Egyptian blue and help reconstruct past

**Resumen:** las técnicas de imagen multi-banda se han incorporado al conjunto de metodologías analíticas disponibles en contextos arqueológicos, en particular, la luminiscencia inducida por ultravioleta (UVL, de sus siglas en inglés) y la luminiscencia inducida visible (VIL, de sus siglas en inglés). Las campañas fotográficas, implementadas e integradas con un estudio no invasivo o micro invasivo, representan una herramienta estratégica para obtener un conocimiento profundo de un objeto arqueológico. En este artículo se presta especial atención al estudio de la policromía original en estatuas, que en la mayoría de los casos se reduce a pequeños vestigios. La excavación, el mal almacenaje y, en algunos casos, la limpieza excesiva debida a una interpretación errónea de la escultura clásica como totalmente blanca, han llevado a una pérdida casi total de la policromía original. El protocolo analítico aquí propuesto, basado en la combinación de técnicas de imagen y de puntos podría ayudar a revelar trazas residuales de patrones, pigmentos característicos como las lacas rojas y azul egipcio, y ayudar a reconstruir intervenciones

restoration interventions, as demonstrated with some examples of investigations conducted in different contexts from museums to archaeological sites.

**Key words:** archaeological artefacts; original polychromy; color traces; UVL; VIL; stone treatments.

Detailed knowledge of an archaeological object in terms of its composition is a prerequisite for any research in art history or archaeology as well as for any conservation-restoration procedure. Ever since imaging techniques have become part of the set of analytical methodologies available for the investigation of objects in archaeological contexts (Fisher and Kakoulli, 2006, pp. 3-16; Hain, Bartl and Jacko, 2003, pp. 9-12; Baldia and Jakes, 2007, pp. 519-525), a wide range of information has been obtained with immediate results. Among these techniques, ultraviolet-induced luminescence (UVL) and visible-induced luminescence (VIL) photographic methods are being progressively adopted by a wider range of users including scientists, conservators, archaeologists and curators. The fast deployment of these techniques is the result of an equally rapid development of digital cameras, with easier image acquisition and control of parameters than in the past.

UVL is a well-documented photographic technique widely used to characterize varnishes and retouchings on paintings (Buzzegoli and Keller, 2010, p. 204; Dyer, Verri and Cupitt, 2013; Maringer, 2000, pp. 56-75; Warda, et al., 2011, pp. 146-152; Pelagotti, et al., 2005; Pelagotti, Pezzati, Piva, and Del Mastio, 2006; Rorimer, 1931). It has also been used by scholars to rapidly detect the presence of materials on stone surfaces and has increasingly become part of a protocol to analyze color traces on ancient artefacts. VIL is instead a quite recent technique set up by Giovanni Verri (Verri, 2009, p.

de restauración pasadas, como se ha demostrado con algunos ejemplos de investigaciones realizadas en diferentes contextos desde museos hasta sitios arqueológicos.

**Palabras clave:** objetos arqueológicos; policromía original; trazas de color; UVL; VIL; tratamientos de piedra.

El conocimiento detallado de un objeto arqueológico en términos de su composición es un requisito previo para cualquier investigación en historia del arte o arqueología, así como para cualquier procedimiento de conservación-restauración. Desde que las técnicas de imagen han pasado a formar parte del conjunto de metodologías analíticas disponibles para la investigación de objetos en contextos arqueológicos (Fisher y Kakoulli, 2006, pp. 3-16; Hain, Bartl y Jacko, 2003, pp. 9-12; Baldia y Jakes, 2007, pp. 519-525), se ha podido obtener una gran cantidad de información de forma inmediata. Entre estas técnicas, los métodos fotográficos de luminiscencia inducida por luz ultravioleta (UVL) y luminiscencia inducida visible (VIL) están siendo adoptados progresivamente por un número cada vez mayor de usuarios, incluyendo científicos, conservadores, arqueólogos y comisarios. El rápido despliegue de estas técnicas es el resultado de un desarrollo igualmente rápido de las cámaras digitales, con una adquisición de imágenes y un control de parámetros más fáciles que en el pasado.

La UVL es una técnica fotográfica bien documentada y ampliamente utilizada para caracterizar barnices y retoques en pinturas (Buzzegoli y Keller, 2010, p. 204; Dyer, Verri y Cupitt, 2013; Maringer, 2000, pp. 56-75; Warda, et al., 2011, pp. 146-152; Pelagotti, et al., 2005; Pelagotti, Pezzati, Piva, y Del Mastio, 2006; Rorimer, 1931). También ha sido utilizada por investigadores para detectar rápidamente la presencia de materiales en las superficies de piedra convirtiéndose cada vez más en parte de un protocolo para analizar trazas de color en

1011-1021; Verri, Saunders, Ambers, Sweek, 2010, pp. 220-224; Dyer and Sotiropoulou, 2017). This technique allows Egyptian blue to be distinguished from other ancient blues thanks to its characteristic luminescence in the infrared range. The synthetic pigment, whose recipe dates back to first dynasties of ancient Egypt, beginning about 3100 B.C.E., corresponds to the rare natural mineral cuprorivaite ( $\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$ ) and is one of the oldest synthetic pigments known (Riederer, 1997). Egyptian blue absorbs visible radiation and re-emits a broad and intense band in the infrared (IR) range, around 910 nm. Observing the image on a grey scale, Egyptian blue appears bright white while other pigments and materials appear from light to dark grey. The pigment emission is so strong that its luminescence can be easily identified and localized with a modified camera.

The use of imaging techniques is often sufficient to gain a lot of information, but it is advisable that the examination also includes the use of other non-invasive analytical techniques in order to implement the data and integrate the results obtained (Bacci, 1995, pp. 190-196; Bacci, 2000, pp. 321- 362; Shugar and Mass, 2013; Karidas, Brecolouki, Bourgeois and Jockey, 2006, pp. 42-62). Non-invasive methods are preferred for a preliminary survey. In this way, the artefacts and the polychromy traces are better preserved for future generations and future investigations. A non-invasive approach allows the examination of a very large number of artworks with a virtually limitless number of analytical acquisitions and, based on the results of preliminary investigations, a more rational and limited sampling can be performed. Moreover, the possibility of achieving measurements in situ with portable instruments may generate a fundamental dialog during the acquisition process among scientists, archaeologists, conservators and museum experts. However, as complex materials and

objetos antiguos. La VIL es, en cambio, una técnica bastante reciente establecida por Giovanni Verri (Verri, 2009, pp. 1011-1021; Verri, Saunders, Ambers, Sweek, 2010, pp. 220-224; Dyer y Sotiropoulou, 2017). Esta técnica permite distinguir el azul egipcio de otros azules antiguos gracias a su luminiscencia característica en el rango infrarrojo. El pigmento sintético, cuya receta se remonta a las primeras dinastías del antiguo Egipto, en torno al año 3100 a.C., corresponde al raro mineral natural cuprorivaite ( $\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$ ) uno de los pigmentos sintéticos más antiguos conocidos (Riederer, 1997). El azul egipcio absorbe la radiación visible y vuelve a emitir una banda amplia e intensa en el rango infrarrojo (IR), alrededor de 910 nm. Al observar la imagen en una escala de grises, el azul egipcio aparece de color blanco brillante, mientras que otros pigmentos y materiales aparecen de gris claro a gris oscuro. La emisión en estos pigmentos es tan fuerte que su luminiscencia se puede identificar y localizar fácilmente con una cámara modificada.

El uso de técnicas de imagen suele ser suficiente para obtener mucha información, pero es recomendable que el examen también incluya el uso de otras técnicas analíticas no invasivas para completar los datos e integrar los resultados obtenidos (Bacci, 1995, pp. 190-196; Bacci, 2000, pp. 321- 362; Shugar y Mass, 2013; Karidas, Brecolouki, Bourgeois and Jockey, 2006, pp. 42-62). Para un estudio preliminar se prefieren los métodos no invasivos. De esta manera, los objetos y los rastros de policromía se conservan mejor para futuras generaciones e investigaciones. Un enfoque no invasivo permite el examen de un gran número de objetos con un número prácticamente ilimitado de adquisiciones analíticas y, sobre la base de los resultados de las investigaciones preliminares se puede realizar un muestreo más racional y limitado. Además, la posibilidad de realizar medidas *in situ* con instrumentos portátiles puede generar un diálogo fundamental entre científicos, arqueólogos, conservadores y expertos en museos, durante el proceso de adquisición. Sin embargo, como los materiales complejos y las capas estructurales se aplican con frecuencia sobre

structural layers are often applied on polychrome surfaces, sampling often becomes necessary and micro-invasive techniques could be included in the protocol to improve results obtained by means of a non-invasive approach.

A specific field in which analyses such as UVL and VIL can be a strategic tool for achieving a thorough knowledge of an artefact is the study of traces of polychromy on archaeological findings. Although many ancient civilizations are known to have made use of polychromy on stone sculptures and architectural elements, most of these colors have been lost. For this reason, in the minds of a very large majority, until today the original stones have remained without color.

After a period of mistaken interpretation of classical statuary as pure white sculptures, a long discussion among scholars, about if ancient statues were painted or not, began in 1800 and continued throughout the past century. A turning point in this discussion was 1982, when Volkmar von Graeve started a research project on polychromy on ancient artefacts supported by scientific methodologies, which demonstrated that sculptures in classical period were richly painted. (Panzanelli, Schmidt and Lapatin, 2008). In recent years, interest in the study of original polychromy on ancient stone artefacts has grown. The most important examples include the studies conducted by Vinzenz Brinkmann on classical roman sculptures (Brinkmann, Kellner, Koch-Brinkmann and Østergaard, 2004, pp. 263-268; Brinkmann and Koch-Brinkmann, 2010, p. 115-135; Combs, 2012, pp. 32-33), the studies on the Augusto di Prima Porta by a scientific team of Vatican Museums in Rome (Liverani, 2003, pp. 121-140; Liverani, 2004, pp. 235-241; Liverani and Santamaria, 2014; Santamaria and Morresi, 2004, pp. 243-248) and the studies on the polychrome reconstruction of the Caligula portrait by the Ny

superficies policromadas, el muestreo se hace a menudo necesario y las técnicas micro-invasivas podrían incluirse en el protocolo para mejorar los resultados obtenidos por medio de un enfoque no invasivo.

Un campo específico en el que los análisis como UVL y VIL pueden ser una herramienta estratégica para lograr un conocimiento profundo de un objeto, es el estudio de rastros de policromía en los hallazgos arqueológicos. Aunque se sabe que muchas civilizaciones antiguas han hecho uso de la policromía en esculturas de piedra y elementos arquitectónicos, la mayoría de estos colores se han perdido. Por esta razón, la mayor parte de las personas cree hasta el día de hoy que las piedras originales se han mantenido sin color.

Después de un período de interpretación errónea sobre las estatuas clásicas como esculturas puramente blancas, en 1800 comenzó una larga discusión entre los eruditos, acerca de si las estatuas antiguas estaban pintadas o no, discusión que continuó durante todo el siglo pasado. Un punto de inflexión en esta discusión fue en 1982, cuando Volkmar von Graeve inició un proyecto de investigación sobre policromía de objetos antiguos basado en metodologías científicas, que demostró que las esculturas del período clásico fueron ricamente pintadas (Panzanelli, Schmidt y Lapatin, 2008). En los últimos años, ha crecido el interés por el estudio de la policromía original sobre objetos antiguos de piedra. Los ejemplos más importantes incluyen los estudios realizados por Vinzenz Brinkmann sobre esculturas romanas clásicas (Brinkmann, Kellner, Koch-Brinkmann y Østergaard, 2004, pp. 263-268; Brinkmann y Koch-Brinkmann, 2010, pp. 115-135; Combs, 2012, pp. 32-33), los estudios sobre Augusto di Prima Porta realizados por un equipo científico de los Museos Vaticanos en Roma (Liverani, 2003, pp. 121-140; Liverani, 2004, pp. 235-241; Liverani y Santamaria, 2014; Santamaria y Morresi, 2004, pp. 243-248) y los estudios sobre la reconstrucción de la policromía del retrato de Caligula por el equipo

Carlsberg Glyptotek team in Copenhagen, coordinated by Jan Stubbe Østergaard (Østergaard, 2007, pp. 178-183; Sargent and Therkildsen, 2010).

The understanding and characterization of the residues of pictorial materials on archaeological stone artefacts is indeed a crucial issue. Gathering as much information as possible about the original polychromy of an archaeological find is extremely important as it offers a new key that takes us closer to the sculpture's original appearance.

A correct reading of the original polychromy is often complicated by the low number and small size of the colour remains due to the vicissitudes the sculptures have undergone, such as exposure to the environment or burial for over two thousand years, but also past restoration.

Excavation, bad warehousing and treatments combined with the misunderstood idea that classical sculptures were pure white have led to an almost entire loss of original polychromy. Despite this, tiny residual fragments of pigments and binders can sometimes survive on the surfaces of ancient sculptures.

Archaeological finds are regularly examined under UV radiation because, thanks to the physical phenomenon of luminescence in the visible range, restorations, retouchings, varnishes as well as some pigments, can be revealed. Investigations through the UVL photographic technique can help highlight residual traces of characteristic pigments such as red lakes and its extension on the surface (Iannaccone, Bracci, Cantisani and Mazzei, 2015, pp. 1235-1242), while VIL technique can identify Egyptian blue (Verri, 2009, pp. 1011-1021).

de Ny Carlsberg Glyptotek en Copenhague, coordinados por Jan Stubbe Østergaard (Østergaard, 2007, pp. 178-183 ; Sargent y Therkildsen, 2010).

La comprensión y caracterización de los residuos de materiales pictóricos sobre objetos arqueológicos de piedra es, de hecho, una cuestión crucial. La recopilación de la mayor cantidad de información posible sobre la policromía original de un hallazgo arqueológico es de suma importancia, ya que ofrece una nueva clave que nos acerca a la apariencia original de la escultura.

La correcta lectura de la policromía original de una escultura a menudo se complica por el escaso número y tamaño de los restos de color que quedan debido a las vicisitudes que han sufrido las esculturas, como la exposición al medio ambiente o el enterramiento durante más de dos mil años, pero también por las restauraciones anteriores.

La excavación, el mal almacenaje y los tratamientos, combinados con la idea errónea de que las esculturas clásicas eran de color blanco puro, han llevado a una pérdida casi total de la policromía original. A pesar de esto, pequeños fragmentos residuales de pigmentos y aglutinantes a veces pueden sobrevivir en las superficies de esculturas antiguas.

Los hallazgos arqueológicos son examinados regularmente bajo radiación UV porque, gracias al fenómeno físico de luminiscencia en el rango visible, pueden revelarse restauraciones, retoques, barnices y algunos pigmentos. Las investigaciones a través de la técnica fotográfica UVL pueden ayudar a resaltar trazas residuales de pigmentos característicos como la laca roja y su extensión en la superficie (Iannaccone, Bracci, Cantisani y Mazzei, 2015, pp. 1235-1242), mientras que la técnica VIL puede identificar el azul egipcio (Verri, 2009, pp. 1011-1021).

Imaging techniques alone cannot solve all the questions that arise during analysis and the best results are obtained by combining data acquired from both imaging and single spot techniques. This combination allows a good number of ancient colors to be identified, thus revealing additional archaeometric data (Kakoulli, 2001, pp. 215-224; Kakoulli, Radpour, Lin and Fischer, 2017, pp. 104-115; Liverani, Bracci, Iannaccone and Lenzi, 2013; Bracci, Iannaccone, Lenzi and Liverani, 2014).

Red lakes are often present on archaeological objects, even if only as traces, in some cases barely visible to the naked eye. The strong UV luminescence of this class of pigments (Carmine and Madder) is useful for locating the traces, while micro-invasive techniques or single spot ones such as Fiber Optic Reflectance Spectroscopy (FORS) may contribute to the identification of the type of lake (Bacci, 1995, pp. 190-196; Bacci, 2000, pp. 321-362; Bisulca, Picollo, Bacci and Kunzelman, 2008).

A clear example of this approach is a study of the Etruscan Gens Statlanes sarcophagi from Tuscania (second half of 3<sup>rd</sup> century BCE) in the Florence National Archaeological Museum collection. Some pieces of the collection are shown in the courtyard of Villa Corsini, while others are currently stored in its warehouse. Five sarcophagi with anthropomorphic lids, made in nenfro stone, have been chosen for a study of polychrome traces. These sarcophagi show a few tiny traces of color. In particular, traces of red are visible on the inscriptions, faces, lips and clothes. Single spot techniques revealed the presence of an inorganic red pigment, possibly a red ochre. But in the case of the sarcophagus shown in Figure 1a, UVL investigation allowed the localization of tiny traces of a fluorescent organic red pigment, which were not easily perceived by the naked eye.

Las técnicas de imagen por sí solas no pueden resolver todas las preguntas que surgen durante el análisis y los mejores resultados se obtienen combinando los datos adquiridos tanto con las técnicas de imagen como con las de análisis de puntos. Esta combinación permite identificar un buen número de colores antiguos, revelando así datos arqueométricos adicionales (Kakoulli, 2001, pp. 215-224; Kakoulli, Radpour, Lin y Fischer, 2017, pp. 104-115; Liverani, Bracci, Iannaccone y Lenzi, 2013; Bracci, Iannaccone, Lenzi y Liverani, 2014).

Las lacas rojas están a menudo presente en los objetos arqueológicos, aunque solo sea como rastros, en algunos casos apenas visibles a simple vista. La fuerte luminiscencia UV de esta clase de pigmentos (carmin y granza) es útil para localizarlos, mientras que las técnicas micro-invasivas o de un solo punto como la espectroscopía de reflectancia de fibra óptica (FORS, de sus siglas en inglés) pueden contribuir a la identificación del tipo de laca (Bacci, 1995, pp. 190-196; Bacci, 2000, pp. 321-362; Bisulca, Picollo, Bacci y Kunzelman, 2008).

Un claro ejemplo de este enfoque es un estudio de los sarcófagos etruscos de Gens Statlanes de la Toscana (segunda mitad del siglo III a.C.) de la colección del Museo Arqueológico Nacional de Florencia. Algunas piezas de la colección se exponen en el patio de Villa Corsini, mientras que otras se encuentran actualmente almacenadas. En este estudio se han seleccionado cinco sarcófagos con tapas antropomorfas, realizados en piedra nenfro (piedra volcánica), con el fin de evaluar la presencia de trazas de policromía. Estos sarcófagos muestran unos pequeños rastros de color. En particular, se aprecian rastros de color rojo en las inscripciones, rostros, labios y ropa. Las técnicas de análisis por puntos revelaron la presencia de un pigmento rojo inorgánico, posiblemente un ocre rojo. Pero en el caso del sarcófago que se muestra en la Figura 1a, la investigación de UVL permitió la localización de pequeños rastros de un pigmento rojo orgánico fluorescente, que no se percibían fácilmente a simple vista.



**Figure 1** | Etruscan female sarcophagus of Gens Statlane. Ramtha Ziltna, from Tomb II, no. 8, from Tuscania (260-50 BCE). Archaeological Museum, Florence. Inv. no. 84289. Comparison between the visible and UVL images (b and c respectively).

**Figura 1** | Sarcófago femenino etrusco de Gens Statlane. Ramtha Ziltna, de la tumba II, no. 8, de Toscana (260-50 a.C.). Museo Arqueológico, Florencia. Inv. no. 84289. Comparación entre las imágenes visibles y UVL (b y c respectivamente).

The characteristic red/pinkish luminescence appears on the belt and ribbon of the woman portrayed on the lid (Fig. 1b, c). FORS confirmed the presence of an organic dye and high-performance liquid chromatography with diode-array detector (HPLC-DAD) analyses of a micro-sample the further specification as a madder lake. Another example is the decoration of the sarcophagus of Olympus Antistianus and Octavia Irene in Saint Pamphilus Catacombs in Rome (Fig. 2). Again, the UVL survey was useful to determine the presence of an organic dye and its distribution on the surface.

The VIL technique shows the presence of Egyptian blue on the altar and in the inner part of the basin (images not reported). The sarcophagus is located in a narrow aisle, which makes the operator's movements and the use of tripods for positioning instruments extremely complex. In addition, the lack of an electrical supply means that only battery-operated instruments can be used. In this case the use of new portable instrumentation equipped with battery packs was extremely useful for the identification of the pigments that would otherwise be difficult to analyze without sampling.

Another example attesting the benefits of a photographic investigation is the study of the Lot sarcophagus housed in the San Sebastiano catacombs in Rome. Analyses of the sarcophagus were performed in order to identify the materials present, to highlight the original polychromy and to localize color traces to improve our understanding of the painting technique.

After a first examination with imaging techniques, non-invasive spot techniques (FORS and X-ray fluorescence, XRF) (Bacci, 1995, p. 190-196; Bacci, 2000, p. 321-362; Shugar and Mass, 2013; Karidas et al., 2006, p. 42-62) were performed on selected polychromy residues to characterize the

La característica luminiscencia roja/ rosada aparece en el cinturón y la cinta de la mujer representada en la tapa (Fig. 1b, c). Con FORS se pudo confirmar la presencia de un tinte orgánico y el análisis de una micro-muestra mediante la cromatografía líquida de alto rendimiento con análisis de detector de matriz de diodos (HPLC-DAD, de sus siglas en inglés) permitió concretar que se trataba de una laca de granza. Otro ejemplo es la decoración del sarcófago de Olympus Antistianus y Octavia Irene en las catacumbas de San Pánfilo en Roma (Fig. 2). Nuevamente, el estudio UVL fue útil para determinar la presencia de un tinte orgánico y su distribución en la superficie.

La técnica VIL muestra la presencia de azul egipcio en el altar y en la parte interior de la cuenca (imágenes no reportadas). El sarcófago se encuentra en un pasillo estrecho, lo que hace que los movimientos del operador y el uso de trípodes para posicionar los instrumentos sean extremadamente complejos. Además, la falta de suministro eléctrico significa que solo se pueden utilizar instrumentos que funcionan con baterías. En este caso, el uso de nuevos instrumentos portátiles equipados con baterías fue extremadamente útil para la identificación de los pigmentos, que de otro modo, serían difíciles de analizar sin la toma de muestras.

Otro ejemplo que confirma los beneficios de una investigación fotográfica es el estudio del sarcófago de Lot ubicado en las catacumbas de San Sebastiano en Roma. Se realizaron análisis del sarcófago para identificar los materiales presentes, resaltar la policromía original y localizar trazas de color para mejorar nuestra comprensión de la técnica pictórica.

Después de una primera exploración con técnicas de imagen, se aplicaron técnicas no invasivas de análisis por puntos (FORS y fluorescencia de rayos X, XRF) (Bacci, 1995, pp. 190-196; Bacci, 2000, pp. 321-362; Shugar y Mass, 2013; Karidas et al., 2006, pp. 42-62) sobre restos de policromía seleccionados para caracterizar la paleta,



**Figure 2** | Detail of the sarcophagus of Olympus Antistianus and Octavia Irene, 3rd to 4th century BCE, Saint Pamphilus Catacombs in Rome. Comparison between visible and UVL images (a and b, respectively).

**Figura 2** | Detalle del sarcófago del Olimpo Antistiano y Octavia Irene, siglos III al IV a.C., las catacumbas de San Pánfilo en Roma. Comparación entre imágenes visibles y UVL (a y b, respectivamente).



**Figure 3** | Detail from the Lot sarcophagus, Rome (ca. 350-360 CE), 246x118x104 cm, in San Sebastiano catacombs, Rome. Comparison between the visible and UVL image of the cupid (a and b, respectively).

**Figura 3** | Detalle del sarcófago de Lot, Roma (circa. 350-360 d.C.), 246x118x104 cm, en las catacumbas de San Sebastiano, Roma. Comparación entre la imagen visible y UVL del Cupido (a y b, respectivamente).

palette, avoiding sampling. An example is shown in Figure 3, which illustrates the UVL image of a sarcophagus detail. The angel's wings show a pale yellow emission due to an organic deposit. The lips and eye are fluorescent and the colour of this emission, as already mentioned in the previous examples, can be connected to the presence of a red lake pigment.

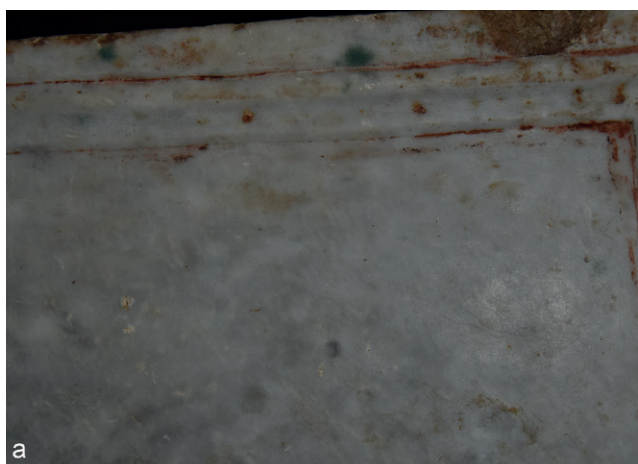
Traces of red lake are also visible on the wing, together with circular spots of different dimensions characterized by a brilliant red luminescence emission. These red spots are due to a biological growth that appears as a blue-green color in the VIS image. The spots are particularly visible on the hand and arm of the cupid (Fig. 3) and on the frame (Fig. 4).

The identification was made by sampling the spots of supposed biological origin with sterile swabs. Once in the laboratory, the samples were sown by passing the swab directly on nutrient media. Potato Dextrose Agar (PDA) was used to detect a possible fungal presence, whereas BG11M nutrient

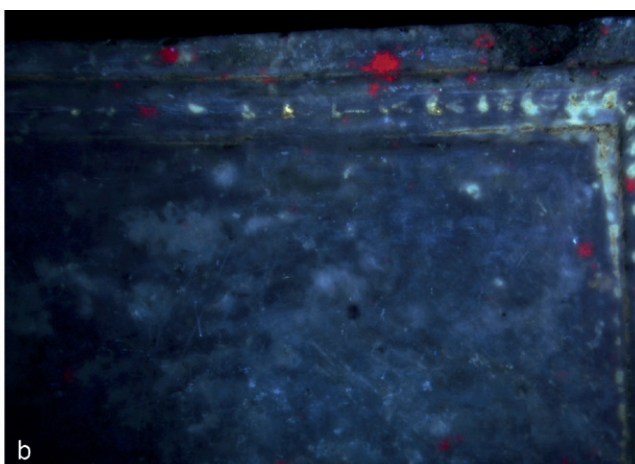
evitando la toma de muestras. La Figura 3 muestra un ejemplo que ilustra la imagen UVL de un detalle del sarcófago. Las alas del ángel muestran una emisión de color amarillo pálido debido a un depósito orgánico. Los labios y el ojo son fluorescentes y el color de esta emisión, como ya se mencionó en los ejemplos anteriores, puede relacionarse a la presencia de un pigmento de laca roja.

En el ala del ángel, también se pueden observar trazas de pigmento rojo de laca, junto con manchas circulares de diferentes dimensiones caracterizadas por una emisión de luminiscencia roja brillante. Estas manchas rojas se deben a un crecimiento biológico que aparece como un color azul-verde en la imagen VIS. Las manchas son particularmente visibles en la mano y el brazo del cupido (Fig. 3) y en el marco (Fig. 4).

La identificación se realizó mediante la toma de muestras, con hisopos estériles, de las manchas del supuesto origen biológico. Una vez en el laboratorio, las muestras se sembraron pasando el hisopo directamente sobre medios nutritivos. Se utilizó Agar Papa Dextrosa (PDA, de sus siglas en inglés) para detectar una posible



**Figure 4 |** Detail from the Lot sarcophagus, Rome (ca. 350-360 CE), 246x118x104 cm, in San Sebastiano catacombs, Rome. Comparison between the visible and UVL image of a detail of the frame (a and b, respectively).



**Figura 4 |** Detalle del sarcófago de Lot, Roma (circa 350-360 d.C.), 246x118x104 cm, en las catacumbas de San Sebastiano, Roma. Comparación entre la imagen visible y UVL de un detalle del marco (a y b, respectivamente).



media was used to detect a possible phototrophic presence. After incubation time (two weeks) no fungal growth was observed on the PDA medium. Filamentous cyanobacteria such as *Phormidium* sp and round-shaped coccoid colonial cyanobacteria were detected in the BG11M nutrient medium.

The identification was important to make the curators aware of this presence and the necessity of its removal to prevent further biological phototrophic colonization, as this kind of bacteria is able to grow even at very low light levels (10-15 lux).

The following example illustrates how the use of VIL imaging was useful. On most of the areas analyzed blue color traces were still visible and VIL confirmed that the pigment used was Egyptian blue (Fig. 5 a-d).

In some areas, no traces of Egyptian blue were visible or sometimes barely visible on first inspection, but VIL still showed its presence.

As an example, the images in Figure 6 show the face of an Eros. The blue pigment is barely visible to the naked eye, but the VIL helped to reveal the presence and spatial distribution of Egyptian blue. In this case the pigment was used to depict the inner part of the eyes of the Eros.

A further field of application of UVL is the study of ancient surface treatments on archaeological artefacts. Studies conducted during the Marmora Phrygiae Project, funded by the Italian Ministry of Education, University and Research, illustrate

presencia de hongos, mientras que el medio nutritivo BG11M se utilizó para detectar una posible presencia fototrófica. Después del tiempo de incubación (dos semanas), no se observó crecimiento de hongos en el medio PDA. Se detectaron cianobacterias filamentosas tales como *Phormidium* sp y cianobacterias coloniales cocoides de forma redonda en el medio nutritivo BG11M.

La identificación de estos agentes biológicos fue importante para que los comisarios fueran conscientes de su presencia y de la necesidad de su eliminación para prevenir una mayor colonización fototrófica biológica, ya que este tipo de bacterias puede crecer incluso a niveles de luz muy bajos (10-15 lux).

El siguiente ejemplo ilustra la utilidad del uso de las imágenes con la técnica VIL. En la mayoría de las áreas analizadas, las trazas de color azul aún eran visibles y la VIL confirmó que el pigmento utilizado era azul egipcio (Fig. 5 a-d).

En algunas zonas, no se observaron rastros de azul egipcio o, a veces, apenas visibles en la primera inspección, pero la VIL aún mostraba su presencia.

Como ejemplo, las imágenes en la Figura 6 muestran la cara de un Eros. El pigmento azul es apenas visible a simple vista, pero la VIL ayudó a revelar la presencia y distribución espacial del azul egipcio. En este caso, el pigmento se usó para representar la parte interna de los ojos del Eros.

Otro campo de aplicación de la técnica UVL es el estudio de antiguos tratamientos superficiales en los objetos arqueológicos. Los estudios realizados durante el Proyecto Marmora Phrygiae, financiado por el

**Figure 5 |** Detail from the Lot sarcophagus, Rome (ca. 350-360 CE), 246x118x104 cm, in San Sebastiano catacombs, Rome. Detail of Isaac and wall decoration, visible and VIL images (a and b, respectively). Detail of the donkey's bridle, visible and VIL images (c and d, respectively).

**Figura 5 |** Detalle del sarcófago de Lot, Roma (circa. 350-360 d.C.), 246x118x104 cm, en las catacumbas de San Sebastiano, Roma. Detalle de Isaac y decoración de paredes, imágenes visibles y VIL (a y b, respectivamente). Detalle de la brida del burro, imágenes visibles y VIL (c y d, respectivamente).



**Figure 6 |** Detail from the Lot sarcophagus, Rome (ca. 350-360 CE), 246x118x104 cm, in San Sebastiano catacombs, Rome. Eros, visible and VIL images compared (a and b, respectively).

**Figura 6 |** Detalle del sarcófago de Lot, Roma (circa. 350-360 d.C.), 246x118x104 cm, en las catacumbas de San Sebastiano, Roma. Eros, imágenes visibles y VIL comparadas (a y b, respectivamente)

this topic well. Following a multidisciplinary approach, the project sought to reconstruct the building stone procurement strategies adopted in the city of Hierapolis in Phrygia (Turkey) (Ismaelli and Scardozi, 2016). Archaeometric investigations were conducted in order to identify the building stones, determine their provenance and assess the state of conservation of the monuments. The artefacts examined and presented here are the reliefs and decorative statuary of the Severan Theatre, and materials from the Sanctuary of Apollo and the north Agora.

The results obtained for the surfaces of the reliefs on the frieze of the podia in the theater are of particular interest. Specifically, the UVL images showed

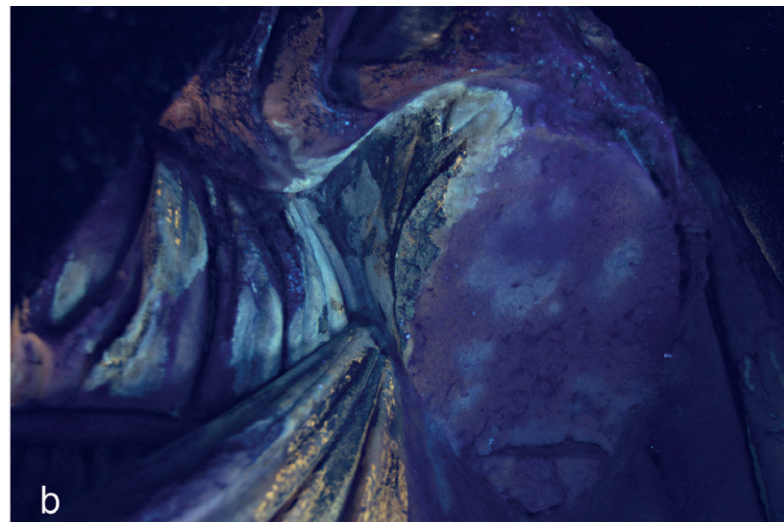
Ministerio de Educación, Universidad e Investigación de Italia, ilustran bien este tema. Siguiendo un enfoque multidisciplinar, el proyecto buscó reconstruir las estrategias de adquisición de piedra de la construcción adoptadas en la ciudad de Hierápolis en Frigia (Turquía) (Ismaelli y Scardozi, 2016). Se llevaron a cabo investigaciones arqueométricas para identificar las piedras de construcción, determinar su procedencia y evaluar el estado de conservación de los monumentos. Los objetos examinados y presentados aquí son los relieves y las estatuas decorativas del Teatro Severan, así como otros materiales del Santuario de Apolo y el Ágora del Norte.

Los resultados obtenidos para las superficies de los relieves, sobre el friso de los podios en el teatro, son de particular interés. Concretamente, las imágenes de UVL



**Figure 7 |** Reliefs on the frieze of the podia in the Severan Theatre of Hierapolis in Phrygia. South versura, crowning block: VIS and UVL images (a and b, respectively).

**Figura 7 |** Relieves en el friso de la podia en el Teatro Severan de Hierapolis en Frigia. Versura sur, bloque de coronación: imágenes VIS y UVL (a y b, respectivamente).



**Figure 8 |** Detail of the traces of patinas on a statue of Demeter displayed on the podium south of the Porta Regia in the Severan Theatre at Hierapolis in Phrygia. VIS and UVL images (a and b, respectively).

**Figura 8 |** Detalle de los restos de pátinas en una estatua de Demetrio expuesta en el podio al sur de la Porta Regia en el Teatro Severan en Hierapolis en Frigia. Imágenes VIS y UVL (a y b, respectivamente).



**Figure 9** | Detail from the from the headless cuirassed emperor statue from the imperial cycle of the Augusteum of Rusellae (1st cent. CE).Museum of Archaeology and Art of Maremma, Grosseto. VIS and UVL images (a and b, respectively)

**Figura 9** | Detalle de la estatua del emperador con coraza, sin cabeza, del ciclo imperial del Augusteum de Rusellae (siglo I d.C.) Museo de Arqueología y Arte de Maremma, Grosseto. Imágenes VIS y UVL (a y b, respectivamente).

traces of luminescence on the palmettes of the crowning block of the frieze of the south versura (Fig. 7).

On one of the sculptures, UVL analyses identified the remains of a patina on the garment near the left breast (Fig. 8).

The traces are not evenly distributed but just appear in some areas. However, as these traces were found on surfaces exposed due to breakages, as visible on the left arm of the sculpture in Figure 8, it is clear that the materials cannot be considered original. FT-IR analyses performed on micro-samples highlighted that they consist almost exclusively of calcium oxalate in the form of weddellite ( $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), together with traces of nitrates. The absence of organic material and the high amount of oxalate suggests that the traces were not added in the recent past. Since the organic component had mostly or entirely degraded, with the formation of

mostraron trazas de luminiscencia en las palmetas del bloque del canto del friso de la versura sur (Fig. 7).

En una de las esculturas, los análisis obtenidos mediante UVL identificaron rastros de una pátina en la prenda cerca del pecho izquierdo (Fig. 8).

Dichos rastros no están distribuidos uniformemente, sino que solo aparecen en algunas áreas. Sin embargo, como estas trazas se encontraron en las superficies expuestas debido a roturas, -como se puede ver en el brazo izquierdo de la escultura en la Figura 8-, está claro que los materiales no pueden considerarse originales. Los análisis de FT-IR realizados en micro-muestras destacaron que se trata casi exclusivamente de oxalato de calcio en forma de weddellita ( $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), junto con trazas de nitratos. La ausencia de material orgánico y la alta cantidad de oxalato sugieren que las trazas no se añadieron en el pasado reciente. Dado que el componente orgánico se había degradado en su mayor parte o en su totalidad, con la formación de oxalato, es probable

oxalate, it is likely that the traces could be linked to ancient conservation procedures on the reliefs and statues of the theater.

The last example is the statue of a headless cuirassed emperor, tentatively identified as Domitian, discovered during excavations in the Etrusco-Roman town of Rusellae (today Roselle in Tuscany). The statue consists of several fragments and, as highlighted in Figure 9, the fragments show a different response to the UVL. This could be ascribed to a different conservation treatment applied to some fragments before reconstruction.

## Conclusions

The examples here presented describe a multi-technique approach to archaeological artefacts beginning with multi-band imaging techniques to obtain as much information as possible about polychromy in a non-invasive way. The implementation of new technology related to imaging techniques, both regarding digital cameras and lighting, has opened up new possibilities to improve techniques and control the parameters.

The use of the well-known UVL technique in combination with this new technology provides a wide range of information that can quickly answer a number of questions regarding materials and earlier treatments. Furthermore, integration of multi-band imaging with single spot non-invasive portable techniques, such as fiber optic reflectance spectroscopy (FORS), X-ray fluorescence spectroscopy (XRF), mid-Infrared spectroscopy in total reflection mode (FT-IR TR), is certainly an added value because it allows to confirm the hypotheses made and to expand the information obtainable from a totally non-invasive campaign, with the advantage of limiting and making more targeted sampling (when allowed).

que estos rastros puedan relacionarse con antiguos procedimientos de conservación en los relieves y las estatuas del teatro.

El último ejemplo es la estatua de un emperador sin cabeza, identificado provisionalmente como Domiciano, descubierta durante las excavaciones en la ciudad etrusco-romana de Rusellae (hoy Roselle en la Toscana). La estatua consta de varios fragmentos y, como se destaca en la Figura 9, los fragmentos muestran una respuesta diferente a la UVL. Esto podría atribuirse a un tratamiento de conservación diferente aplicado a algunos fragmentos antes de la reconstrucción.

## Conclusiones

Los ejemplos presentados anteriormente, describen un enfoque multitécnico de los objetos arqueológicos, comenzando con técnicas de imágenes multi-banda para obtener la mayor cantidad de información posible sobre la policromía de una manera no invasiva. La implementación de nuevas tecnologías relacionadas con las técnicas de imagen, tanto en cámaras digitales como en iluminación, ha abierto nuevas posibilidades para mejorar las técnicas y controlar los parámetros.

El uso de la conocida técnica UVL en combinación con esta nueva tecnología proporciona una amplia variedad de información que puede responder rápidamente a una serie de preguntas relacionadas con los materiales y los tratamientos anteriores. Además, la integración de imágenes multi-banda con técnicas portátiles no invasivas de análisis por puntos, como la espectroscopía de reflectancia de fibra óptica (FORS), la espectroscopía de fluorescencia de rayos X (XRF), y la espectroscopía de infrarrojo medio en modo de reflexión total (FT-IR TR), es sin duda un valor añadido, ya que permite confirmar las hipótesis planteadas y ampliar la información que se puede obtener a partir de una campaña totalmente no invasiva, con la ventaja de limitar y hacer un muestreo más específico (cuando esté permitido).

## References | Bibliografía

- Bacci, M. (1995). Fiber optics applications to works of art. In *Sensors and Actuators B*, 29(1-3), pp. 190–196. [https://doi.org/10.1016/0925-4005\(95\)01682-1](https://doi.org/10.1016/0925-4005(95)01682-1)
- Bacci, M. (2000). UV-VIS-NIR, FT-IR, FORS Spectroscopies. In E. Ciliberto and G. Spoto (Ed.), *Modern Analytical Methods in Art and Archaeology* (pp. 321–362). New York: John Wiley & Sons.
- Baldia, C.M., and Jakes, K.A. (2007). Photographic methods to detect colourants in archaeological textiles. *Journal of Archaeological Science*, 34(4), pp. 519-525. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2006.06.010>
- Bisulca, C., Picollo, M., Bacci, M., and Kunzelman, D. (May, 2008). *UV-vis-NIR reflectance spectroscopy of red lakes in paintings*. In 9<sup>th</sup> International Conference on NDT of Art Jerusalem, pp. 25–30.
- Bracci, S., Iannaccone, R., Lenzi, S., and Liverani, P. (2014). *Non-invasive characterization of pigments on “monochromes on marble” from Herculaneum and Pompeii: new researches*. In Art 2014. 11<sup>th</sup> International Conference on Non-Destructive Investigations and Microanalysis for the Diagnostics and Conservation of Cultural and Environmental Heritage. Madrid, Museo Arqueológico Nacional.
- Brinkmann, V., Kellner, S., Koch-Brinkmann, U., and Østergaard, J.S. (2004). La colorazione del ritratto di Caligola. In P. Liverani. (Ed.), *I colori del bianco. Policromia nella scultura antica*, pp. 263-268. Roma: De Luca Editori d'Arte.
- Brinkmann, V., and Koch-Brinkmann, U. (2010). On the reconstruction of antique polychromy techniques. In V. Brinkmann, O. Primavesi and M. Hollein (Ed.), *Circumlitio. The Polychromy of Antique and Mediaeval Sculpture*, pp. 115-135. Frankfurt: Proceedings of the Johann David Passavant Colloquium, Frankfurt 10–12 December 2008
- Buzzegoli, E., and Keller, A. (2010). Ultraviolet fluorescence imaging. In D. Pinna, M. Galeotti and R. Mazzeo (Ed.), *Scientific Examination for the Investigation of Paintings: A Handbook for Conservators-restorers*, pp. 204-206. Firenze, Italy: Centro Di Edifici sr.
- Combs, M. (2012). *The Polychromy of Greek and Roman Art; An Investigation of Museum Practices* (Master's Thesis). New York: City University of New York (CUNY), Academic Works.
- Dyer, J., and Sotiropoulou, S. (June, 2017). A technical step forward in the integration of visible-induced luminescence imaging methods for the study of ancient polychromy. *Heritage Science*, 5(24). <https://doi.org/10.1186/s40494-017-0137-2>
- Dyer, J., Verri, G., and Cupitt, J. (2013). *Multispectral imaging in reflectance and photo-induced luminescence modes: a user manual*. Retrieved from <http://www.britishmuseum.org/pdf/charisma-multispectral-imaging-manual-2013.pdf>, Accessed 15 January 2020.
- Fischer, C., and Kakoulli, I. (2006). Multispectral and hyperspectral imaging technologies in conservation: current research and potential applications. *Reviews in Conservation*, 7, pp. 3-16. <https://doi.org/10.1179/sic.2006.51.supplement-1.3>
- Hain, M., Bartl, J., and Jacko, V. (2003). Multispectral analysis of cultural heritage artefacts. *Measurement Science Review*, 3(3), pp. 9-12. Retrieved from [http://academicworks.cuny.edu/cc\\_etds\\_theses/148](http://academicworks.cuny.edu/cc_etds_theses/148), Accessed 26 Sept 2018
- Iannaccone, R., Bracci, S., Cantisani, E., and Mazzei, B. (2015). An integrated multi methodological approach for characterizing the materials and pigments on a sarcophagus in St. Mark, Marcellian and Damasus catacombs. *Journal of Applied Physics A*, 121, pp. 1235-1242. <https://doi.org/10.1007/s00339-015-9515-3>
- Ismaelli, T., and Scardozzi, G. (2016) *Ancient quarries and building sites in Asia minor. Research on Hierapolis in Phrygia and other cities in south-western Anatolia: archaeology, archaeometry, conservation*. Italy: Edipuglia.
- Kakoulli, I. (2001). Scientific investigations of three Graeco-Roman painted stone slabs. In *Nécropolis 1, Études Alexandrines*, 5, pp. 215- 224. Cairo: Institute Français D'Archéologie Orientale.

- Kakoulli, I., Radpour, R., Lin, Y., and Fischer, C. (2017) Application of forensic photography for the detection and mapping of Egyptian blue and madder lake in Hellenistic polychrome terracottas based on their photophysical properties. *Dyes and Pigments*, 136, pp. 104-115. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2016.08.030>
- Karidas, A.G., Brecolaki, H., Bourgeois, B., and Jockey, Ph. (2006). In situ XRF analysis of raw pigments and traces of polychromy on marble sculpture surfaces. Possibilities and limitations. *Non-destructive Examination of Cultural Objects. Advances in X-ray Analysis*, pp. 42- 62.
- Liverani, P. (2003). Die Polychromie des Augustus von Prima Porta, vorläufiger Bericht. In G. Zimmer (Ed.), *Neue Forschungen zur hellenistischen Plastik. Kolloquium zum 70. Geburtstag von Georg Daltrop*, pp. 121-140. Eichstätt – Ingolstadt.
- Liverani, P. (2004). L'Augusto di Prima Porta. In P. Liverani (Ed.), *I colori del bianco. Policromia nella scultura antica, collana di studi e documentazione*, pp. 235-241. Roma, Italy: Musei Vaticani De Luca Editori d'Arte. <https://doi.org/10.1017/s0075426900002366>
- Liverani, P., Bracci, S., Iannaccone, R., and Lenzi, S. (2013). Monochromes on marble from Herculaneum and Pompei: new researches. In J.S. Østergaard (Ed.), *Tracking Colour. The polychromy of Greek and Roman Sculpture in the Ny Carlsberg Glyptotek. Preliminary Report*, 5. Copenhagen: New Carlsberg Glyptotek.
- Liverani, P. and Santamaria, U. (2014). *Diversamente bianco. La policromia della scultura romana*. Roma, Italy: Quasar Edizioni.
- Mairinger, F. (2000). The ultraviolet and fluorescence study of paintings and manuscripts. In D. C. Creagh and D. A. Bradley (Ed.), *Radiation in Art and Archeometry*, pp. 56-75. <https://doi.org/10.1016/B978-044450487-6/50050-X>
- Østergaard, J.S. (2007). Caligula in the Ny Carlsberg Glyptotek, Copenhagen. Reconstructing the Polychromy of a Roman Portrait. In V. Brinkmann and R. Wünsche (Ed.), *Gods in Color. Painted Sculpture of Classical Antiquity* (pp. 178-183). München: Biering & Brinkmann.
- Panzanelli, R., Schmidt, E., and Lapatin, K. (Ed.), (2008). *The Color of Life. Polychromy in Sculpture from Antiquity to the Present*. Los Angeles: Getty Publications.
- Pelagotti, A., Pezzati, L., Bevilacqua, N., Vascotto, V., Reillon, V. and Daffara, C.A. (2005). Study of UV fluorescence emission of painting materials'. In C. Parisi, G. Buzzanca and A. Paradisi (Ed.), *Art'05-8th International Conference on "Non-Destructive Testing and Microanalysis for the Diagnostics and Conservation of the Cultural and Environmental Heritage"*, Lecce, Italy.
- Pelagotti, A., Pezzati, L., Piva, A., and Del Mastio, A. (2006). *Multispectral UV fluorescence analysis of painted surfaces'*. Communication presented in 14th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Firenze, Italy.
- Riederer, J. (1997). Egyptian Blue. In E. West Fitzhugh (Ed.), *Artist's Pigments A Handbook of Their History and Characteristics*, Vol 3, pp 23-45. New York: National Gallery of Art, Oxford University Press.
- Rorimer, J.J. (1931). *Ultraviolet Rays and their Use in the Examination of Works of Art*. New York: Metropolitan Museum of Art.
- Santamaria, U., and Morresi, F. (2004). Le indagini scientifiche per lo studio della cromia dell'Augusto di Prima Porta. In P. Liverani (Ed.), *I colori del bianco. Policromia nella scultura antica, collana di studi e documentazione*, pp. 243-248. Rome, Italy: Musei Vaticani De Luca Editori d'Arte.
- Sargent, M. L., and Therkildsen, R. H. (2010). The technical investigation of sculptural polychromy at the Ny Carlsberg Glyptotek 2009-2010 - An Outline. In J. S. Østergaard (Ed.), *Tracking Colour. The polychromy of Greek and Roman Sculpture in the Ny Carlsberg Glyptotek. Preliminary Report 2*. Copenhagen: New Carlsberg Glyptotek. Retrieved from <http://www.glyptoteket.dk/tracking-colour2.pdf>, Accessed 26 Sept 2018.
- Shugar, A.N. and Mass, J.L. (2013). *Handheld XRF for Art and Archaeology*. Leuven: Leuven University Press. <https://doi.org/10.11116/9789461660695>
- Verri, G. (2009). The spatial characterisation of Egyptian blue, Han blue and Han purple by photo-induced luminescence digital imaging. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 394(4), pp. 1011–1021. <https://doi.org/10.1007/s00216-009-2693-0>

- Verri, G., Saunders, D., Ambers, J., and Sweek, T. (2010). Digital mapping of Egyptian blue: conservation implications. *Journal of Studies in Conservation*, 55(2), pp. 220-224. <https://doi.org/10.1179/sic.2010.55.Supplement-2.220>
- Warda, J., Frey, F., Heller, D., Kusheld., Vitale, T., and Weaver, G. (2011). Ultraviolet photography. In J. Warda (Ed.), *AIC guide to digital photography and conservation documentation*. Washington: American Institute for Conservation of Historic and Artistic Works.