



Scientists Francesca Casadio and Gianluca Pastorelli non-invasively analyze the bronze sculptures of Pablo Picasso in the storage vaults of the Picasso Museum, Paris, as part of a NU- Access project.

Los científicos Francesca Casadio y Gianluca Pastorelli analizan de forma no invasiva las esculturas de bronce de Pablo Picasso en la reserva del Museo Picasso de París, como parte de un proyecto NU-Access.

AN ECOSYSTEM FOR DIAGNOSIS: CREATING SYNERGIES IN ACADEMIC AND MUSEUM RESEARCH

UN ECOSISTEMA PARA EL DIAGNÓSTICO: CREANDO SINERGIAS EN LA INVESTIGACIÓN ACADÉMICA Y MUSEÍSTICA

Francesca Casadio  ^{a*}, Marc Walton ^b, Giovanni Verri ^a

^a*The Art Institute of Chicago, United States*

^b*Center for Scientific Studies in the Arts, Northwestern University, United States*

**fcasadio@artic.edu*

Introduction

Scientific Laboratories Inside and Outside the Museum

The birth of the modern scientific laboratory in an art museum can be traced to 1888 with the establishment of the Chemical Laboratory at the Berlin Museums (now Rathgen-Forschungslabor) (Riederer, 1976). Seven years later, in 1895, German physicist Wilhelm Roentgen discovered X-rays. Just a short year following the first X-ray of the hand of Roentgen's wife Bertha, the art world adopted X-ray imaging for paintings, now a staple for art diagnostics in nearly every museum and auction house, gradually supplemented with an increasing array of imaging techniques and portable and lab-based instrumentation for scientific analysis (Cardinali et al., 2002). In the 1920s and '30s several more laboratories for the scientific study of art objects followed. Focused on both

Introducción

Laboratorios científicos dentro y fuera del museo

El nacimiento del laboratorio científico moderno en un museo de arte se remonta a 1888 con el establecimiento del Laboratorio de Química en los Museos de Berlín (ahora Rathgen-Forschungslabor) (Riederer, 1976). Siete años más tarde, en 1895, el físico alemán Wilhelm Roentgen descubrió los rayos X. Apenas un año después de que se realizará la primera radiografía de la mano de la esposa de Roentgen, Bertha, el mundo del arte adoptó el uso de las imágenes de rayos X para obras pictóricas, hoy en día un elemento básico en el diagnóstico de obras de arte en casi todos los museos y casas de subastas, complementadas gradualmente con una gama cada vez mayor de técnicas de imagen e instrumentación portátil y de laboratorio para el análisis científico (Cardinali et al., 2002). En las décadas de 1920 y 1930 continuó la creación de laboratorios para

understanding decay and deterioration and assisting with the preservation of heritage collections, in Europe these included the laboratories of the British Museum in London (established in 1919), the Louvre in Paris¹ (1931), the National Gallery of Art in London (1934) (Thomson, 1977), the Doerner Institut in Munich (1937) and the Istituto Centrale del Restauro in Rome (1939) among others. In the United States, it was Edward Waldo Forbes who recognized the importance of scientific analysis to advance the knowledge and preservation of original works of art and founded the Fogg Museum's Department of Technical Research at Harvard, the first of its kind on the American continent, in 1928 (Bewer, 2010).

Over the past several decades, robust growth in the establishment of scientific laboratories within cultural heritage institutions globally, has led to the emergence of a mature field around the scientific study of heritage objects. The impact of this research is indisputable: the application of science has deepened conservators' understanding of material properties and provided new data on how to treat, display, store and preserve visual culture in better ways for future generations. Likewise, the joint presence of scientists, conservators and curators in museums and the development of interdisciplinary pedagogy in academia has catalyzed the field of objects-based art history to enhance traditional formal analysis with deeper explorations of the underlying materials, structure, and design of art and artifacts. Art historians are increasingly adopting the knowledge generated by scientific analysis and interpreting it within new theoretical frameworks that allow them to reach beyond established views of style, material history,

el estudio científico de obras de arte. Destinados tanto a comprender la degradación como en el deterioro como a ayudar a preservar las colecciones patrimoniales, en Europa se crearon los laboratorios del Museo Británico de Londres (establecidos en 1919), el Louvre de París¹ (1931), la Galería Nacional de Arte de Londres (1934) (Thomson, 1977), el Doerner Institut de Munich (1937) y el Istituto Centrale del Restauro de Roma (1939) entre otros. En los Estados Unidos, fue Edward Waldo Forbes quien supo ver la importancia del análisis científico para avanzar en el conocimiento y la preservación de obras de arte originales y fundó el Departamento de Investigación Técnica del Museo Fogg en Harvard en 1928, el primero de su tipo en el continente americano (Bewer, 2010).

Durante las últimas décadas, el significativo crecimiento en el establecimiento de laboratorios científicos dentro de las instituciones del patrimonio cultural a nivel mundial, ha llevado al nacimiento de un campo definido en torno al estudio científico de los objetos de patrimonio. El impacto de esta área de investigación es indiscutible: la aplicación de la ciencia ha agudizado la comprensión de los conservadores-restauradores con respecto a las propiedades de los materiales y ha proporcionado nuevos datos sobre cómo tratar, exponer, almacenar y preservar la cultura visual de la mejor manera para las futuras generaciones. Asimismo, la presencia conjunta de científicos, conservadores-restauradores y comisarios en museos y el desarrollo de la pedagogía interdisciplinar en la academia ha catalizado el área de la historia del arte basada en objetos para mejorar el análisis formal tradicional con exámenes más profundos de los materiales subyacentes, la estructura, el diseño del arte y de objetos. Los historiadores del arte adoptan cada vez más el conocimiento generado por el análisis científico y lo incluyen dentro de nuevos marcos teóricos que les

¹ The scientific laboratory located within the Louvre campus was founded in 1931 as the Institut Manini and has since evolved to serve all the museums in France as the Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France (C2RMF).

¹ El laboratorio científico ubicado dentro del campus del Louvre fue fundado en 1931 como el Institut Manini y desde entonces ha evolucionado para servir a todos los museos de Francia como el Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France (C2RMF).

and socio-economical context in fresh and exciting ways. Though a gap still exists between the sciences and the humanities, the divide is rapidly shrinking and there's been much progress to report since C.P. Snow's critique of the gulf separating "the two cultures" (Snow, 1963).

For much of the 20th century, art objects or samples needed to be brought to the museum lab in order to receive advanced diagnostic investigation. To this day, creating scientific laboratories remains an expensive venture and it is an investment that not all cultural institutions can make or sustain over the long term. Therefore, starting in the 1970s new models emerged for museums that were not equipped with their own scientific laboratory. In addition to a variety of commercial enterprises of variable reputation, pioneering examples of institutional mobile labs were established. Among those with a national focus, the French mobile lab Labobus was established in the 1970s by Madeleine Hours (Hours, 1976). The volume *"L'oeuvre de Picasso à Antibes: A travers Picasso"* (Hours & Giraudy, 1982) records the trip of the Labobus from Paris to the South of France in the 1980s to perform imaging and analysis of an important corpus of paintings created by Pablo Picasso (1881-1973) on the top floor of the Château Grimaldi between 1946 and 1947, and now part of the collection of the Picasso Museum in Antibes. Roughly thirty years later, the transnational mobile lab of the Molab (a European-Union funded initiative led by an Italian team) (Miliani et al., 2010) was onsite in Antibes again with portable diagnostic techniques such as Reflectance Fourier Transform Infrared Spectroscopy (R-FTIR), and Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectroscopy to further advance current knowledge of Picasso's use of unconventional paint materials and supports (Casadio et al., 2013). The transatlantic equivalent of these European research teams bringing science to a museum's doorsteps is the mobile

permiten ir más allá de las visiones establecidas en cuanto al estilo, la historia material y el contexto socioeconómico de forma natural y emocionante. Aunque todavía existe una brecha entre las ciencias y las humanidades, la separación está reduciendo rápidamente y hay mucho progreso que reportar desde la crítica de C.P. Snow al golfo que separa "las dos culturas" (Snow, 1963).

Durante gran parte del siglo XX, los objetos de arte o muestras debían llevarse al laboratorio del museo si se quería obtener un diagnóstico de investigación avanzado. A día de hoy, la creación de laboratorios científicos sigue siendo una empresa costosa y es una inversión que no todas las instituciones culturales pueden realizar o sostener a largo plazo. Por tanto, a partir de la década de 1970 surgieron nuevos modelos de museos que no contaban con un laboratorio científico propio. Además de una variedad de empresas comerciales de reputación variable, se establecieron ejemplos pioneros de laboratorios móviles institucionales. Entre los que tienen un enfoque nacional, el laboratorio móvil francés Labobus fue establecido en la década de 1970 por Madeleine Hours (Hours, 1976). El libro *"L'oeuvre de Picasso à Antibes: A travers Picasso"* (Hours & Giraudy, 1982) documenta el viaje del Labobus desde París al sur de Francia en la década de 1980 para documentar y analizar a un importante corpus de pinturas creadas por Pablo Picasso (1881-1973) en la última planta del Château Grimaldi entre 1946 y 1947, y que ahora forma parte de la colección del Museo Picasso de Antibes. Aproximadamente treinta años después, el laboratorio móvil transnacional de Molab (una iniciativa financiada por la Unión Europea y dirigida por un equipo italiano) (Miliani et al., 2010) visitaron nuevamente el Antibes con técnicas de diagnóstico portátiles como la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier de reflectancia (R-FTIR) y espectroscopía ultravioleta-visible (UV-Vis) para avanzar en el conocimiento actual sobre la forma en que Picasso utilizaba materiales y soportes de pintura no convencionales (Casadio et al., 2013). El equivalente transatlántico de estos equipos de investigación

laboratory established in 1979 by the Canadian Conservation Institute to support Canadian collections (McCawley & Stone, 1983).

Inspired by these earlier examples of excellence in the practice of networked diagnosis for art, the Center for Scientific Studies in the Arts, a partnership between the Art Institute of Chicago and Northwestern University (NU-ACCESS, also herein referred to as “the Center”) is the focus of this paper. The program, which started in the early 2000s, was designed to meet a national and international need for scientific analysis of objects outside the infrastructure of large and well-resourced cultural heritage institutions.

The Center for Scientific Studies in the Arts

The Center for Scientific Studies in the Arts was officially established in December 2012 after almost a decade of pilot collaborations of increasing scope between Northwestern University and the Art Institute of Chicago. By combining the infrastructure and broad expertise of a highly ranked research university with those of a world-class museum and through generous funding from the Andrew W. Mellon Foundation, the Center was founded with the vision to expand and democratize the reach of science within conservation.

As an academic center, NU-ACCESS has its mission firmly defined by the three pillars of research, education, and outreach, and articulated in five main streams:

- 1) scientifically investigating artworks in partnership with museums and cultural institutions in the US and abroad, engaged through a system of peer-reviewed, external research proposals;

- 2) catalyzing innovation in analytical methods and techniques applied to art, in partnership with

Europeos, que llevan la ciencia a las puertas del museo, es el laboratorio móvil establecido en 1979 por el *Canadian Conservation Institute* para apoyar las colecciones canadienses (McCawley & Stone, 1983).

Inspirado por los ejemplos anteriores de excelencia en la práctica del diagnóstico en red para el arte, el *Center for Scientific Studies in the Arts*, una colaboración entre el Art Institute of Chicago y Northwestern University (NU-ACCESS, también denominado en este documento como “el Centro”) es el tema central de este artículo. El programa, que comenzó a principios de la década de 2000, fue diseñado para satisfacer una necesidad nacional e internacional de análisis científico de objetos de arte más allá de la infraestructura de grandes instituciones de patrimonio cultural que cuentan con recursos suficientes.

El Center for Scientific Studies in the Arts

El Center for Scientific Studies in the Arts se estableció oficialmente en diciembre de 2012 después de casi una década de colaboraciones piloto de alto impacto entre Northwestern University y el Art Institute of Chicago. Al combinar la infraestructura y la amplia experiencia de investigación de una universidad altamente calificada con las de un museo de nivel mundial y a través de la generosa financiación de la Fundación Andrew W. Mellon, el Centro se fundó con la visión de expandir y democratizar el alcance de la ciencia dentro de la conservación.

Como centro académico, NU-ACCESS tiene su misión firmemente definida por los tres pilares de investigación, educación y divulgación, y se articula a través de cinco áreas principales:

- 1) investigación científica de obras de arte en colaboración con museos e instituciones culturales en los EE. UU. y en el extranjero, comprometidos a través de un sistema de propuestas de investigación externas revisadas por pares;

faculty who are at the leading edge in their respective domain areas through a combination of undergraduate, graduate, and postgraduate research. This work is supported by internal catalyst grants, enriched by international collaborations and supplemented through federal grants administered by the National Science Foundation (NSF) and the National Endowment for the Humanities (NEH);

3) teaching and training through a combination of coursework and hands-on projects paired with internships and fellowships at all levels of a student's academic arc, from high school to postgraduate, with varied topics to meet student demand for additional curricular offerings at the interface of art and science;

4) supporting a visiting scholars and seminar program that brings new energy to the Center's initiatives of applied scientific research in the arts and cross-pollinates faculty and students at the university and the museum;

5) dissemination and advocacy: through publications and presentations in professional scholarly contexts; through news-media coverage in collaboration with Northwestern University's Medill School of Journalism, Media, Integrated Marketing Communications that produce stories about the value of the arts and sciences in society; and through robust visitor engagement and school programs that allow the Center to play a major civic role in outreach thanks to the partnership with the Learning and Public Engagement Department at the Art Institute of Chicago.

The structure of the Center is nimble, thus enabling its leaders to learn from its environment, incorporate suggestions and stimuli from its multiple stakeholders, and implement guidance from its internal and external advisory committees.

2) catalización de la innovación en métodos y técnicas analíticas y técnicas aplicadas al arte, en colaboración con profesores que están a la vanguardia en sus respectivas áreas de dominio a través de una combinación de investigaciones de grado, máster y doctorado. Trabajo respaldado por becas como catalizador interno, enriquecidas por colaboraciones internacionales y complementadas con subvenciones federales administradas por la National Science Foundation (NSF) y la National Endowment for the Humanities (NEH);

3) enseñanza y capacitación a través de una combinación de cursos y proyectos de aplicación práctica junto con estancias y becas en todos los niveles del arco académico de un estudiante, desde la escuela secundaria hasta posgrado, con temas variados para satisfacer la demanda de los estudiantes con ofertas curriculares adicionales en la interfaz arte - ciencia;

4) apoyo de un programa de visitas académicas y seminarios que aporta nueva energía a las iniciativas de investigación científica aplicada en las artes del Centro en forma de polinización cruzada entre profesores y estudiantes de la universidad y del museo;

5) difusión y promoción: a través de publicaciones y presentaciones en contextos académicos profesionales; a través de la cobertura de los medios de comunicación en colaboración con la Escuela de Periodismo, Medios, Comunicaciones Integradas de Marketing de Northwestern University, que producen historias sobre el valor de las artes y las ciencias en la sociedad; y a través de la participación de visitantes y programas escolares sólidos que permiten que el Centro desempeñe un papel cívico importante en la divulgación gracias a la asociación con el Departamento de Aprendizaje y Participación Pública del Art Institute of Chicago.

La estructura del Centro es ágil, lo que permite a sus líderes aprender de su entorno, incorporar sugerencias y estímulos de las múltiples partes interesadas

The scope of NU-ACCESS bridges three main spheres of influence:

a) *Local*: over the years the Center has become an established and lasting presence at the University, connecting faculty and inspiring students across campus through research in art and science. Undergraduate seminars, offered through NU-ACCESS in collaboration with the Departments of Art History and of Materials Science and Engineering, explore how the materiality of art can augment art-historical inquiry and, conversely, how art-historical inquiry can push new boundaries in engineering by engaging materials scientists with the complexity inherent in works of art. At the Art Institute of Chicago, students come to learn from objects, while museum staff are the first to benefit from innovations in computational imaging and new instrumentation developed by NU-ACCESS researchers and affiliate faculty.

b) *National*: the Center is filling a gap in the capacity for scientific analysis at cultural institutions, at a time when enhancing curatorial practice and studying museum collections with scientific analysis and analytical imaging has become a mark of distinction for 21st century museums.

c) *International*: through our federally funded partnerships in international research and education, we seek to leverage global excellence in cultural heritage science and train a new generation of US-based students and researchers who are not constrained by rigid disciplinary or national boundaries. While only some of these students will go on to become the next generation of cultural heritage scientists, all benefit from their exposure to visual art and the humanities, expanding their scientific pursuits through critical inquiry.

e implementar la dirección de sus comités asesores internos y externos.

El alcance de NU-ACCESS une tres esferas principales de influencia:

a) *Local*: a lo largo de los años, el Centro ha creado una presencia estable y duradera en la Universidad, conectando a los profesores e inspirando a los estudiantes en todo el campus a través de la investigación en arte y ciencia. Los seminarios del grado, ofrecidos a través de NU-ACCESS en colaboración con los Departamentos de Historia del Arte y de Ciencia e Ingeniería de Materiales, exploran cómo la materialidad del arte puede reforzar la investigación histórica del arte y, a la inversa, cómo la investigación histórica del arte puede promover nuevos límites en la ingeniería al involucrar a los científicos de materiales con la complejidad inherente de las obras de arte. En el Art Institute of Chicago, los estudiantes aprenden de los objetos, mientras que el personal del museo es el primero en beneficiarse de las innovaciones en imágenes computacionales y nueva instrumentación desarrollada por investigadores de NU-ACCESS y profesores afiliados.

b) *Nacional*: el Centro está llenando un vacío en la capacidad de análisis científico de las instituciones culturales, en un momento en el que la práctica curatorial y el estudio de las colecciones de los museos con el análisis científico y la imagen analítica se ha convertido en una marca de distinción para los museos del siglo XXI.

c) *Internacional*: a través de nuestros socios financiados con fondos federales en investigación y educación internacionales, buscamos aprovechar la excelencia global en la ciencia del patrimonio cultural y capacitar a una nueva generación de estudiantes e investigadores con sede en los EEUU que no están limitados por fronteras disciplinarias o nacionales rígidas. Si bien solo algunos de estos estudiantes se convertirán en la próxima generación de científicos del patrimonio cultural, todos se beneficiarán de su exposición a las artes visuales y las

Museums and cultural institutions gain access to the human and instrumental resources of the Center at no cost through a peer-review proposal system. Over the years, external collaborations have covered a range of projects that are both diverse in subject matter (tackling topics from the characterization of paintings from ancient Egypt (Rönkkö, 2019; Salvant et al., 2018) to the paints and polymeric supports in the work of pioneering Bauhaus artist László Moholy-Nagy (Salvant et al., 2016; Salvant et al., 2017),² and span a broad geographic reach (from collaborations in the local Chicago area to a project focused on a coastal archaeological site in Ghana).

The Center benefits from its position in a research university ecosystem through an internal catalyst grant program that was designed for NU-ACCESS to harness the culture of innovation at Northwestern. By engaging with its faculty, the Center is able to undertake cutting-edge scientific research that can be successfully translated to meet the needs of the cultural heritage community. Over the years, developments in analytical techniques such as Surface Enhanced Raman Spectroscopy (Brosseau et al., 2009; Casadio et al., 2010; Kurouski et al., 2014), advanced mass spectrometric analysis of polysaccharides (Granzotto & Sutherland, 2017), spectral imaging microscopy (Oakley et al., 2020), macro-X-Ray Fluorescence scanning (Dai et al., 2016; Pouyet et al., 2020a; Pouyet et al., 2017), and enhanced computational imaging approaches applied to hyperspectral datasets and the metrology of surfaces have all been borne out of the Center (Rohani et al., 2018; Yeh et al., 2016; Yeh et al., 2017).

humanidades, expandiendo sus búsquedas científicas a través de la investigación crítica.

Los museos y las instituciones culturales obtienen acceso a los recursos humanos e instrumentales del Centro sin coste a través de un sistema de propuestas de revisión por pares. A lo largo de los años, las colaboraciones externas han cubierto una gama de proyectos diversos en materia de temas (abordando temas desde la caracterización de pinturas del antiguo Egipto (Rönkkö, 2019; Salvant et al., 2018) hasta las pinturas y soportes poliméricos en la obra del artista pionero de la Bauhaus László Moholy-Nagy (Salvant et al., 2016; Salvant et al., 2017),² y abarcan un amplio alcance geográfico (desde colaboraciones en el área local de Chicago hasta un proyecto centrado en un sitio arqueológico costero en Ghana).

El Centro se beneficia de su posición al estar en un ecosistema universitario de investigación a través de un programa catalizador interno de subvenciones que fue diseñado para NU-ACCESS aprovechando la cultura de innovación en Northwestern. Al interactuar con su cuerpo docente, el Centro puede emprender investigaciones científicas de vanguardia para satisfacer las necesidades de la comunidad del patrimonio cultural que pueden traducirse con éxito. A lo largo de los años, avances en técnicas analíticas como la espectroscopía Raman mejorada de superficie (Brosseau et al., 2009; Casadio et al., 2010; Kurouski et al., 2014), análisis de espectrometría de masas avanzada de polisacáridos (Granzotto & Sutherland, 2017), microscopía de imágenes espectrales (Oakley et al., 2020), macro escaneo de fluorescencia rayos X (Dai et al., 2016; Pouyet et al., 2020a; Pouyet et al., 2017), e imágenes computacionales mejoradas con enfoques aplicados a conjuntos de datos hiperespectrales y la metrología de superficies todos han sido llevados a cabo en el Centro (Rohani et al., 2018; Yeh et al., 2016; Yeh et al., 2017).

² A full list of publications that have emerged from these projects over the years is available on the Center's website: <https://scienceforart.northwestern.edu/publications/index.html>, accessed 10/13/2020.

² Puede encontrarse una lista completa de las publicaciones que han surgido de estos proyectos a lo largo de los años en el sitio web del Centro: <https://scienceforart.northwestern.edu/publications/index.html>, consultado el 13/10/2020.

Notably, in the next few years, this trajectory will be carried forward with a program called “Idea Labs” that will catalyze innovative and creative applications of physical and biological sciences to the arts by drawing on research and collecting institutions in the wider Chicago area. The intention of these workshops is to incubate project ideas that have the potential to transform research paradigms and solve intractable problems in cultural heritage.

In summary, through its diverse and interconnected array of programs, the Center is now recognized as a hub for materials-based art history and technological innovation,³ pushing the field of cultural heritage forward in meaningful and tangible ways.

En particular, en los próximos años, esta trayectoria continuará con un programa llamado “Laboratorios de ideas” que catalizará aplicaciones innovadoras y creativas de las ciencias físicas y biológicas a las artes basándose en instituciones de investigación y recolección en un área más amplia de Chicago. La intención de estos talleres es incubar ideas de proyectos que tengan el potencial de transformar paradigmas de investigación y resolver problemas intratables en el patrimonio cultural.

En resumen, a través de una variedad de programas diversos e interconectados, el Centro ahora es reconocido como un centro para la historia del arte y la innovación tecnológica³ basadas en materiales, impulsando el campo del patrimonio cultural de manera significativa y tangible.

³ NU-ACCESS achievements in numbers (2012-2021):

- 88 proposals from 18 countries: External proposals (8 in 2013; 12 in 2014; 10 in 2015; 11 in 2016; 9 in 2017; 19 in 2018; 13 in 2019; 6 in 2020); US 51; Europe 21; Egypt 2; Canada 2; Estonia 1; China 1; Malta 1; South Africa 1; Ghana 1; Argentina 1; Cyprus 1; UK 1, Nigeria 1; Puerto Rico 1; Iran 1; Mexico 1)
- 7 seed, internal proposals (2014-2018): Microfluidics/SERS (2014); Photometric Stereo for Gauguin (2014); Wide field X-ray imaging (2015); Microkinetic models of aging of oils (2016); Atom Probe Tomography of art and archeology (2017); New advances in saccharide mass fingerprinting (2018); Toward a Mechanistic Understanding of Metal Soap formation (2018)
- 105 Publications: 18 (2014), 15 (2015), 21 (2016), 12 (2017), 12 (2018), 13 (2019), 8 (2020), 6 (2021) as of April 18
- 18 Visiting Scholars: 2 (2014), 1 (2015), 1 (2016), 1 (2017), 6 (2018), 6 (2019), 1 (2020), 0 (2021) due to the pandemic
- 4 undergraduate seminars, cross listed between Art History, Materials Science, and Classics
- 1 co-curated exhibition
- 2 journalism fellows (2021)
- \$4.9M in federal funding raised: NSF-IRES (US-Netherlands Research Collaboration in Cultural Heritage Science PI: M. Walton (NU-ACCESS), Co-PI F. Casadio and Prof. K. Shull (Northwestern University) (2014-2018). OIA 1460143. Amount awarded: \$247,034); NSF-PIRE (PIRE: Computationally-Based Imaging of Structure in Materials (CuBISM). PI Ken Shull (NU) Co-PIs F. Casadio (AIC); O. Cossairt (NU); A. Katsaggelos (NU); M.Walton (NU) (2017-2022) NSF- OISE. Amount Awarded: \$4,246,240)
- it is important to note that this grant constitutes the largest federal grant ever awarded to research in Conservation Science in the United States since the establishment of the first laboratory dedicated to this type of research at the Straus Center for Conservation in 1928; NEH-Research and Development (Metal Soap Protrusions on Georgia O’Keeffe’s

³ Logros de NU-ACCESS en cifras (2012-2021):

- 88 propuestas de 18 países: propuestas externas (8 en 2013; 12 en 2014; 10 en 2015; 11 en 2016; 9 en 2017; 19 en 2018; 13 en 2019; 6 en 2020); US 51; Europa 21; Egipto 2; Canadá 2; Estonia 1; China 1; Malta 1; Sudáfrica 1; Ghana 1; Argentina 1; Chipre 1; Reino Unido 1, Nigeria 1; Puerto Rico 1; Irán 1; México 1)
- 7 propuestas internas (2014-2018): Microfluidics/SERS (2014); Estéreo fotométrico para Gauguin (2014); Imágenes de rayos X de campo amplio (2015); Modelos microcinéticos de envejecimiento de aceites (2016); Tomografía Atom Probe de arte y arqueología (2017); Nuevos avances en la toma de huellas dactilares en masa de sacáridos (2018); Hacia una comprensión mecanicista de la formación de jabón metálico (2018)
- 105 Publicaciones: 18 (2014), 15 (2015), 21 (2016), 12 (2017), 12 (2018), 13 (2019), 8 (2020), 6 (2021) al 18 de abril
- 18 becarios visitantes: 2 (2014), 1 (2015), 1 (2016), 1 (2017), 6 (2018), 6 (2019), 1 (2020), 0 (2021) debido a la pandemia
- 4 seminarios de grado, listados cruzados entre Historia del Arte, Ciencia de Materiales y Clásicos
- 1 exposición co-comisariada
- 2 becarios de periodismo (2021)
- \$ 4.9M en fondos federales recaudados: NSF-IRES (Colaboración de investigación entre los Estados Unidos y los Países Bajos en ciencia del patrimonio cultural PI: M. Walton (NU-ACCESS), Co-PI F. Casadio y Prof. K. Shull (Northwestern University) (2014 -2018). OIA 1460143. Cantidad concedida: \$ 247,034); NSF-PIRE (PIRE: Imagen computacional de estructuras en materiales (CuBISM). PI Ken Shull (NU) Co-PIs F. Casadio (AIC); O. Cossairt (NU); A. Katsaggelos (NU); M. Walton (NU) (2017-2022) NSF- OISE. Cantidad concedida: \$ 4.246.240) - es importante señalar que esta subvención constituye la subvención federal más grande jamás otorgada a la investigación en Ciencias de la Conservación en los Estados Unidos desde el establecimiento del primer laboratorio dedicado a este tipo de investigación en el Centro Strauss para la Conservación en 1928; NEH-Research and Development (Protuberancias de jabón metálico en las pinturas de Georgia O’Keeffe;

Tracing the Diagnostic Arc - Knowledge Co-Creation and Sharing

The Museum's Point of View: Advancing Art History and Conservation Through Material Studies

Through NU-ACCESS an experienced and diverse team of scientists is brought on site at partner museums. This model creates a culture of collaboration internally in the institutions visited and encourages the Center's partners to think boldly, increasing dissemination of conservation science research conducted in collaboration with curatorial and conservation colleagues in exhibitions, exhibition catalogs, peer-reviewed publications, presentations, and the press. This approach has also effectively met the demand of the institutions visited by relieving the burden on them to create local contacts with scientists lacking previous experience in cultural heritage science; having to equip a full in-house lab; or require conservators to learn the rudimentary use of equipment such as the now widespread portable X-ray fluorescence (XRF) analyzer.

Following a peer-review evaluation system, successful external project proposals are typically those that match in-house expertise and demonstrate high impact potential for the field and the proposing institution. The proposed projects also need to show promise for enhancing the scholarly output (qualitatively and quantitatively) of scientific studies in the arts, foster lasting national and international scientific cooperation, and include

Siguiendo la trayectoria de diagnóstico - co-creación e intercambio de conocimientos

El punto de vista del museo: avanzar en la historia del arte y la conservación a través del estudio de materiales

A través de NU-ACCESS, un equipo diverso y experimentado de científicos es trasladado a los museos asociados. Este modelo crea una cultura de colaboración interna en las instituciones visitadas y alienta a los socios del Centro a pensar con audacia, aumentando la difusión de la investigación en ciencias de la conservación realizada en colaboración con curadores y conservadores en exposiciones, catálogos de exposiciones, publicaciones revisadas por pares, presentaciones y la prensa. Este enfoque también ha satisfecho efectivamente la demanda de las instituciones visitadas al relevarlos de la carga de crear contactos locales con científicos que carecen de experiencia previa en la ciencia del patrimonio cultural; tener que equipar un laboratorio interno completo; o exigir a los conservadores que aprendan el uso rudimentario de equipos como el ahora bien conocido analizador portátil de fluorescencia de rayos X (XRF).

Siguiendo un sistema de evaluación de revisión por pares, las propuestas de proyectos externos exitosos suelen ser aquellas que coinciden con la experiencia interna y demuestran tener un alto potencial de impacto tanto en el campo y como en la institución proponente. Los proyectos propuestos también deben ser de interés para mejorar la producción académica (cualitativa y cuantitativamente) de los estudios científicos en las artes, fomentar la cooperación científica nacional e

Paintings: Establishing a New Quantitative Imaging Paradigm for Linking Scientific Research and Preservation. PI M. Walton (NU-ACCESS), co-PIs A. Katsaggelos, O. Cossairt (NU), F. Casadio (AIC). (2018/2019). Amount Awarded: \$349,988). Lounsbery Foundation (Immunochemistry of African Works of Art. PI M. Walton (NU-ACCESS) (2019/2020). Amount Awarded \$100,000)

Establecimiento de un nuevo paradigma de imágenes cuantitativas para vincular la investigación científica y la preservación. PI M. Walton (NU-ACCESS), co-PIs A. Katsaggelos, O. Cossairt (NU), F. Casadio (AIC). (2018/2019). Cantidad concedida: \$ 349.988). Fundación Lounsbery (Inmunología de obras de arte africanas. PI M. Walton (NU-ACCESS) (2019/2020). Cantidad concedida: \$ 100.000)

elements of outreach to broader audiences across disciplinary boundaries.

Over the years, the work has crystallized around specific axes of art production or diagnostic tools that are now perceived as strengths of the Center. This is what distinguishes an academic center for diagnosis from the 20th-century model of a scientific laboratory situated inside individual art museums: by centralizing scientific research expertise while de-centralizing art-historical and conservation expertise, access to diagnostic tools can be leveraged and focused in powerful ways.

One successful example of this networked approach is the Center's ongoing engagement with the study of 19th- and early 20th-century bronzes. Starting with the rich collections at the Art Institute of Chicago (Young et al., 2009), over the years selected research projects have focused on *bronze d'art* in partnership with several institutions including the Smart Museum of Art at the University of Chicago, the Philadelphia Museum of Art and the Rodin Museum in Philadelphia, the Cantor Museum at Stanford University and the Field Museum of Natural History in Chicago. This intentional strategy has allowed us to accumulate a wealth of knowledge on the copper alloys and patination used by such artists as Honoré-Victorin Daumier (1808–1879), Auguste Rodin (1840–1917), Malvina Hoffman (1885–1966), Jacques Lipchitz (1891–1974), and Henri Matisse (1869–1954), to name a few. Amassing compositional data ranges for nearly 200 bronzes, both sand cast and lost wax cast between the late 19th century and the 20th century, a robust material knowledge has been built that goes well beyond any single museum collection (Ganio et al., 2014; Pouyet et al., 2019) and complements published archival sources chronicling the golden age of the Parisian art foundries that dominated the market for over a century (Lebon, 2014).

internacional a largo plazo e incluir elementos de divulgación para un público más amplio a través de las fronteras disciplinarias.

A lo largo de los años, el trabajo ha cristalizado en torno a ejes específicos de producción de arte o herramientas de diagnóstico que ahora se perciben como fortalezas del Centro. Esto es lo que distingue a un centro académico de diagnóstico del modelo de laboratorio científico del siglo XX situado dentro de museos de arte: al centralizar la experiencia en investigación científica y al mismo tiempo descentralizar la experiencia en conservación e historia del arte, el acceso a herramientas de diagnóstico puede aprovecharse y optimizarse enormemente.

Un ejemplo exitoso de este enfoque en red es el compromiso continuo del Centro con el estudio de los bronzes del siglo XIX y principios del XX. Comenzando con las ricas colecciones del Art Institute of Chicago (Young et al., 2009), a lo largo de los años, los proyectos de investigación seleccionados se han centrado en el *bronze d'art* en asociación con varias instituciones, incluido el Smart Museum of Art de la University of Chicago, el Philadelphia Museum of Art and the Rodin Museum en Filadelfia, el Cantor Museum at Stanford University y el Field Museum of Natural History en Chicago. Esta estrategia nos ha permitido acumular una gran cantidad de conocimiento sobre las aleaciones de cobre y el patinado utilizado por artistas como Honoré-Victorin Daumier (1808–1879), Auguste Rodin (1840–1917), Malvina Hoffman (1885–1966), Jacques Lipchitz (1891–1974) y Henri Matisse (1869–1954), por nombrar algunos. Acumulando datos sobre la composición de casi 200 bronzes, tanto en fundición de arena como fundición a la cera entre finales del siglo XIX y el siglo XX, se ha construido un conocimiento material sólido que va mucho más allá de cualquier colección de museo (Ganio et al., 2014; Pouyet et al., 2019) y complementa las crónicas de fuentes de archivo publicadas la edad de oro sobre

Endowed with this compelling knowledge and database, the Center partnered with the Musée National Picasso – Paris, to examine select bronzes from its collection. With over 50 metal sculptures analyzed, the NU-ACCESS work constitutes the most complete and extensive scientific survey of Picasso’s sculptural oeuvre in metal. In particular, analysis of the metal alloys conducted in a non-invasive manner using primarily X-ray fluorescence spectroscopy with a portable hand-held instrument, has produced a database of material signatures for the main elements (copper, tin, zinc, and lead) composing Picasso bronzes created from plaster, wood and clay sculptures made between 1906 and 1958. The casting dates of this exceptionally well-provenanced group, both presenting foundry marks and un-marked, range from 1910 to 1981. Many different Parisian foundries were engaged to cast the work of the artist during his lifetime: Florentin, Désiré and Emile Godard; Claude Valsuani; Georges Rudier; F. Guastini; Emile Robecchi, as well as the Susse foundry. Select posthumous casts have also been realized by the Coubertin Foundry at the request of the Musée National Picasso – Paris. By combining the material evidence from the sculptures themselves and archival information (Finn, 2020), lost histories of Picasso’s engagement with various foundrymen have been reconstructed, for example elucidating the practice of art foundries in Paris during the occupation in the Second World War. In a few cases, potential casting dates and foundries for un-marked sculptures have been proposed, thus significantly advancing Picasso’s scholarship in an area that has been largely unexplored until recently. This body of objective compositional data, with its known limitations in terms of accuracy and dependability of the handheld XRF results to the specific experimental conditions used (Heginbotham et al., 2019; Heginbotham & Solé, 2017; Shugar & Mass, 2013), is increasingly used by other researchers to answer the “where, when

las fundiciones de arte parisinas que dominaron el mercado durante más de un siglo (Lebon, 2014).

A partir de este sólido conocimiento y base de datos, el Centro se asoció con el Musée National Picasso - Paris para examinar bronzes seleccionados de su colección. Con más de 50 esculturas de metal analizadas, el trabajo de NU-ACCESS constituye el estudio científico más completo y extenso de la obra escultórica de Picasso en metal. En particular, el análisis de las aleaciones metálicas realizado de manera no invasiva utilizando principalmente espectroscopía de fluorescencia de rayos X con un instrumento de mano y portátil, ha producido una base de datos de materiales insignia para los elementos principales (cobre, estaño, zinc y plomo) que componen los bronzes de Picasso creados a partir de esculturas de yeso, madera y arcilla realizadas entre 1906 y 1958. Las fechas de fundición de este grupo de proveniencia excepcional, tanto con marcas de fundición como sin marcar, van desde 1910 a 1981. Numerosas fundiciones parisinas estuvieron involucradas en la producción de la obra del artista estando él en vida: Florentin, Désiré y Emile Godard; Claude Valsuani; Georges Rudier; F. Guastini; Emile Robecchi, así como la fundición Susse. La Fundición Coubertin también ha realizado una serie de moldes póstumos seleccionados a petición del Musée National Picasso - Paris. Al combinar la evidencia material de las esculturas en sí y la información de archivo (Finn, 2020), se pudo reconstruir las historias perdidas sobre el compromiso de Picasso con varios fundidores, por ejemplo, dilucidar la práctica de las fundiciones de arte en París durante la ocupación en la Segunda Guerra Mundial. En algunos casos, se han propuesto posibles fechas de fundición y fundiciones para esculturas sin marcar, lo que ha hecho avanzar significativamente la erudición de Picasso en un área que ha sido en gran parte inexplorada hasta hace poco. Este conjunto de datos de composición objetiva, con sus limitaciones conocidas en términos de precisión y fiabilidad de los resultados de XRF para las condiciones experimentales específicas utilizadas (Heginbotham et al., 2019; Heginbotham & Solé,

and by whom” questions raised by artistic bronzes cast during this time period.⁴

As part of this unprecedented scientific survey of Pablo Picasso’s work in three dimensions, ten painted sheet metal sculptures (dated 1915-62) in the collection of the Musée National Picasso – Paris and six privately owned examples (dated 1959-61) were also analyzed with mobile XRF instrumentation, along with reflectance FTIR spectroscopy and Raman spectroscopy. Never afraid to disrupt convention, Picasso applied color onto metal sculptures effectively turning them into “3-D paintings” (Karmel, 2016). The examples surveyed include the use of commercial enamel paint, artist’s tube paints, and even crayons, often on the same surfaces. Analysis revealed the use of the precious metal silver to render the details of the hair, eyes and other facial features on *Head of a Woman* (Mougins, late 1962), and the presence of manganese violet, an artist’s pigment that has been rarely documented in published literature, on *Footballeur* (1961). Having analyzed 15 out of approximately 120 sheet-metal sculptures (12.5%) created by the artist in 18 months from 1960 to 1963, all with excellent provenance, makes the findings significant. This research in fact benchmarks the artist’s production by establishing a database of white paints applied on the metal surfaces. The findings may assist with answering the art historical questions of which paint was applied by Picasso, which paint was applied by craftsmen in the south of France with whom the artist established increasingly fruitful partnerships, and which paint may represent later conservation treatments or a tell-tale sign of

2017; Shugar & Mass, 2013), es cada vez más utilizado por otros investigadores para responder a preguntas tales como “dónde, cuándo y por quién” que plantean los bronzes artísticos realizados durante este período de tiempo.⁴

Como parte de este estudio científico sin precedentes sobre la obra tridimensional de Pablo Picasso, también se analizaron diez esculturas de plancha metálica pintada (fechadas entre 1915 y 62) en la colección del Musée National Picasso - París y seis ejemplares de propiedad privada (fechadas entre 1959 y 61) con instrumentación XRF portátil, junto con espectroscopía FTIR de reflectancia y espectroscopía Raman. Sin miedo por romper con las tendencias, Picasso aplicó color a las esculturas de metal convirtiéndolas efectivamente en “pinturas 3-D” (Karmel, 2016). Los ejemplos analizados incluyen el uso de pintura de esmalte comercial, tubos de pinturas e incluso crayones, a menudo en una misma superficie. El análisis reveló el uso de la plata como metal precioso para resaltar detalles del cabello, los ojos y otros rasgos faciales en *Head of a Woman* (Mougins, finales de 1962), y la presencia de violeta de manganeso, un pigmento rara vez documentado en literatura publicada, sobre *Footballeur* (1961). El análisis de 15 de las aproximadamente 120 esculturas en chapa (12,5%) creadas por el artista en 18 meses desde 1960 a 1963, todas con excelente procedencia, hace que los hallazgos sean significativos. Esta investigación, de hecho, establece puntos de referencia sobre la producción del artista al crear una base de datos de pinturas blancas aplicadas en superficies metálicas. Los hallazgos pueden ayudar a responder preguntas sobre historia del arte con respecto a qué pintura aplicó Picasso, qué pintura fue aplicada por artesanos en el sur de Francia con quienes el artista

⁴ See for example the case of the sculpture *Bird-Head (Oiseau-tête)*, 1934–35 by Max Ernst for which a determination needed to be made whether it was cast at the Modern Art Foundry in New York or possibly at Susse Frères in France, as reported in the MOMA blog “Casting histories, Part 2” by Megan Randall; <https://stories.moma.org/casting-histories-part-2-700af9b3e712>, accessed on 10/12/2020.

⁴ Véase, por ejemplo, el caso de la escultura *Bird-Head (Oiseau-tête)*, 1934-1935 de Max Ernst para la que fue necesario determinar si se fundó en la Modern Art Foundry de Nueva York o posiblemente en Susse Frères en Francia, como se explica en el blog del MOMA “Casting Histories, Part 2” de Megan Randall; <https://stories.moma.org/casting-histories-part-2-700af9b3e712>, consultado el 12/10/2020.

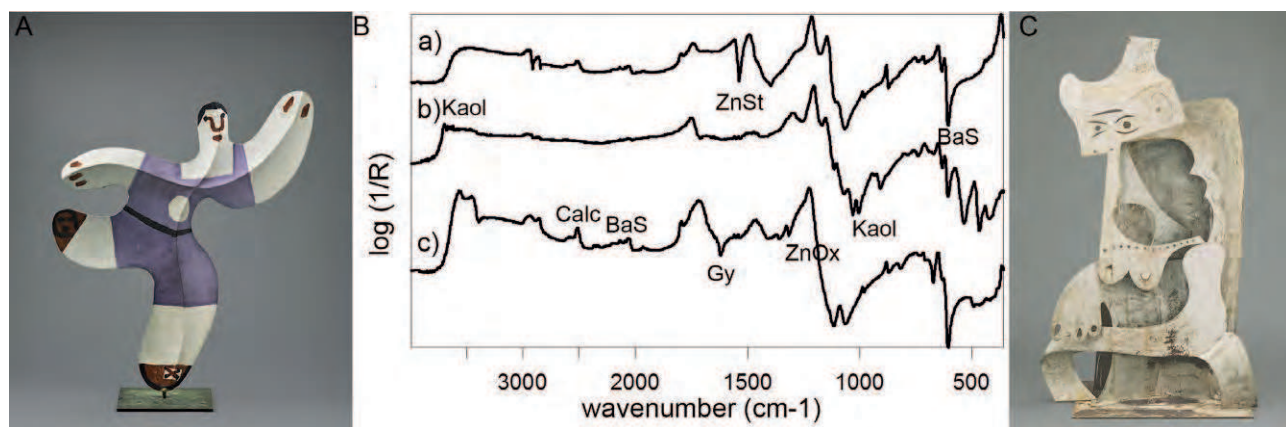


Figure 1 | A) Pablo Picasso, *Footballeur*, Cannes, printemps 1961, sheet-metal sculpture, 58.3×49×14.5 cm, Musée National Picasso – Paris (MP362), ©RMN-Grand Palais (Musée national Picasso-Paris), ©Succession Pablo Picasso, VEGAP, Madrid, 2022. **B)** White paints were shown through XRF analysis to have a consistent composition of Zn, Ba, Sr, Ca, indicating a base paint pigmented with Lithopone (as identified with Raman *in-situ*) with strontium and calcium-based compounds as extenders. R-FTIR analysis allowed to highlight compositional variations that correlated well with visual observation of surface finish: a) Glossy finish as observed on the *Footballeur* – R-FTIR identified barium sulfate, calcite, oil with some zinc stearate. b) Flat – R-FTIR identified barium sulfate, oil, a little gypsum, kaolinite. c) Matte finish as observed on the *Femme au chapeau* – R-FTIR identified barium sulfate, calcite, gypsum, oil, zinc oxalate, a little zinc stearate. **C)** Pablo Picasso, *Femme au chapeau*, Cannes, 1961, sheet-metal sculpture, 127×74×40 cm Musée National Picasso – Paris (MP365) ©RMN-Grand Palais (Musée National Picasso-Paris), ©Succession Pablo Picasso, VEGAP, Madrid, 2022.

Figura 1 | A) Pablo Picasso, *Footballeur*, Cannes, primavera 1961, escultura en plancha metálica, 58,3×49×14,5 cm, Musée National Picasso – Paris (MP362), © RMN-Grand Palais (Musée national Picasso- Paris), ©Succession Pablo Picasso, VEGAP, Madrid, 2022. **B)** Se demostró mediante análisis XRF que las pinturas blancas presentan una composición consistente de Zn, Ba, Sr, Ca, lo que indica una pintura base pigmentada con litopón (como se identificó con Raman *in situ*) con compuestos a base de estroncio y calcio como carga. El análisis R-FTIR permitió identificar las variaciones de composición que se correlacionaron bien con la observación visual del acabado de la superficie: a) Acabado brillante como se observa en *Footballeur*: El R-FTIR identificó sulfato de bario, calcita, aceite con algo de estearato de zinc. b) Plano: El R-FTIR identificó sulfato de bario, aceite, un poco de yeso, caolinita. c) Acabado mate como se observa en *Femme au chapeau*: El R-FTIR identificó sulfato de bario, calcita, yeso, aceite, oxalato de zinc, un poco de estearato de zinc. **C)** Pablo Picasso, *Femme au chapeau*, Cannes, 1961, escultura en plancha metálica, 127×74×40 cm Musée National Picasso – Paris (MP365) © RMN-Grand Palais (Musée National Picasso-Paris), ©Succession Pablo Picasso, VEGAP, Madrid, 2022.

un-authentic surfaces (Fig. 1). This work highlights the value of portable scientific tools in advancing discoveries on the artistic practice of this prolific giant of modern art, Picasso. Portable equipment also facilitates collaboration with curators, scholars, and private collectors, to assist with questions of process and authenticity, using scientific evidence considered together with connoisseurship, provenance, and art historical research.

estableció asociaciones cada vez más fructíferas y qué pintura puede representar tratamientos de conservación posteriores o el indicio de superficies no auténticas (Fig. 1). Este trabajo destaca el valor de las herramientas científicas portátiles para promover el descubrimiento de la práctica artística de este prolífico gigante del arte moderno, Picasso. El equipo portátil también facilita la colaboración con comisarios, académicos y coleccionistas privados, para ayudar con cuestiones de proceso y autenticidad, utilizando evidencia científica considerada

Working with a broad range of different museums exposes NU-ACCESS researchers to a wider variety of challenges and problems than scientists at a single institution may otherwise face. In turn, members of such an academic center for diagnosis can draw from the ecosystem of innovation of the materials science and engineering department at the University to propose novel solutions to seemingly intractable problems. One such example is represented by the collaboration with the Van Gogh Museum in Amsterdam for the conservation of the painting *Beach at Scheveningen in Stormy Weather* (1882), by Vincent Van Gogh (1853-1890). The painting was stolen from the museum in 1989 and was recovered in 2016 with a substantial loss in the lower left corner of the composition that required infilling. Working with conservator Saskia van Oudheusden, the Center's team developed a novel computational texture-recovery algorithm, trained from the surrounding areas of paint as well as images of the painting before it was stolen, and 3D printing techniques to compensate for the loss. As outlined in the extensive documentation of the project released by the Van Gogh Museum in 2019,⁵ a 3D printed mold was made following Optical Coherence Tomography scans performed by NU-ACCESS. This mold was ultimately incorporated into the painting during its restoration through application with reversible adhesives and sensitive in-painting for a complete recovery of the integrity of the composition (Fig. 2).

junto con conocimiento, procedencia e investigación histórica del arte.

Trabajar con una amplia gama de museos diferentes expone a los investigadores de NU-ACCESS a una amplia variedad de retos y problemas a los que científicos trabajando en una única institución no suelen tener que enfrentarse. A su vez, los miembros de dicho centro académico de diagnóstico pueden aprovechar el ecosistema de innovación del departamento de ciencia e ingeniería de materiales de la Universidad para proponer soluciones novedosas a problemas aparentemente sin solución. Un ejemplo de ello es la colaboración con el Van Gogh Museum en Ámsterdam durante la conservación del cuadro *Beach at Scheveningen in Stormy Weather* (1882), de Vincent Van Gogh (1853-1890). La pintura fue robada del museo en 1989 y se recuperó en 2016 con una pérdida sustancial en la esquina inferior izquierda de la composición que requirió la aplicación de una masilla de relleno. Trabajando con la conservadora Saskia van Oudheusden, el equipo del Centro desarrolló un novedoso algoritmo computacional de recuperación de texturas, entrenado a partir de las áreas circundantes de pintura, así como imágenes de la obra antes de que fuera robada, y técnicas de impresión 3D para compensar la pérdida. Como se describe en la extensa documentación del proyecto publicada por el Van Gogh Museum en 2019,⁵ se hizo un molde impreso en 3D utilizando los escaneos de tomografía de coherencia óptica realizados por NU-ACCESS. Este molde se incorporó finalmente a la pintura durante su restauración mediante el uso de adhesivos reversibles y una reintegración sutil que permitió la recuperación completa de la integridad de la composición (Fig. 2).

⁵ For additional information on this project see the blog <https://www.vangoghmuseum.nl/en/about/knowledge-and-research/academy/restorations/conservation-treatment-of-view-of-the-sea-at-scheveningen>; and the interactive feature <https://ontrafel.vangogh.nl/en/story/169/conservation-treatment-using-a-3d-printer/> as well as the video: <https://bit.ly/2Bcp8Aj> all produced by the Van Gogh Museum. Accessed on 10/13/2020.

⁵ Para obtener información adicional sobre este proyecto, consulte el blog <https://www.vangoghmuseum.nl/en/about/knowledge-and-research/academy/restorations/conservation-treatment-of-view-of-the-sea-at-scheveningen>; y la función interactiva <https://ontrafel.vangogh.nl/en/story/169/conservation-treatment-using-a-3d-printer/> así como el video: <https://bit.ly/2Bcp8Aj> todos producidos por el Museo Van Gogh. Consultado el 13/10/2020.

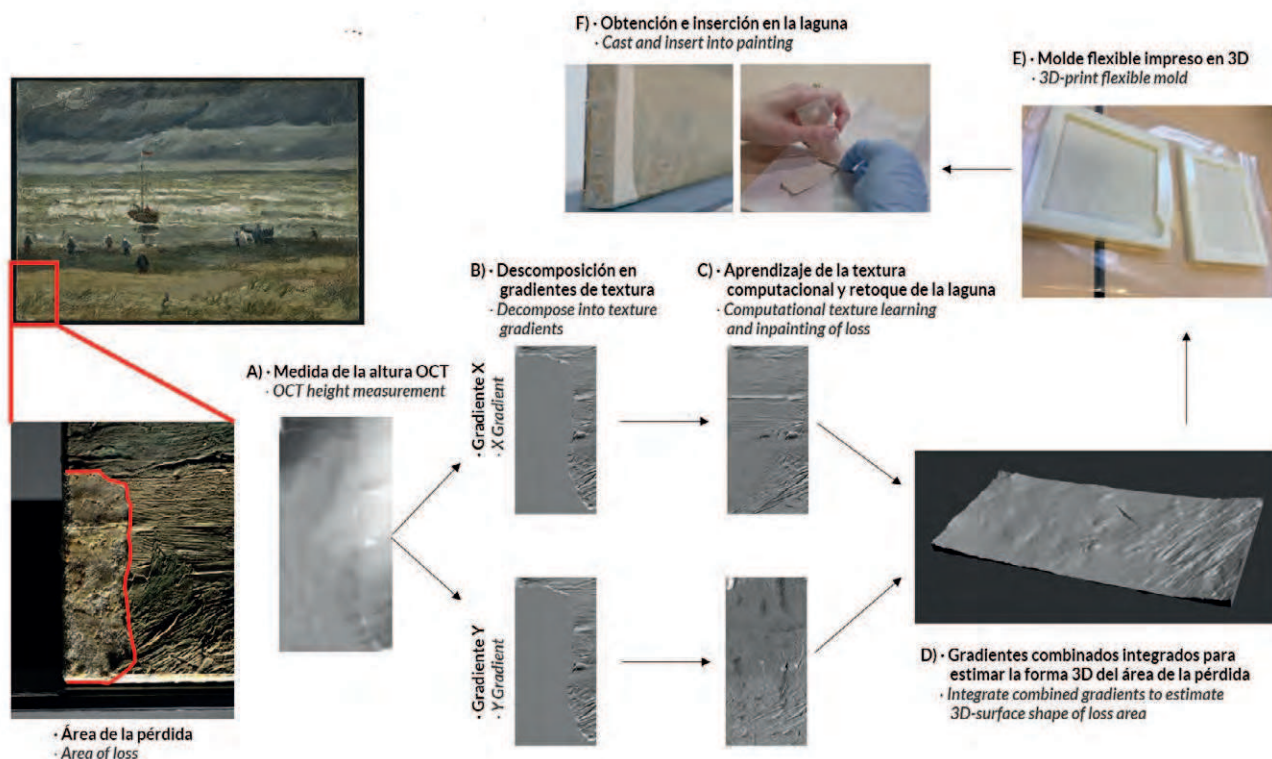


Figure 2 | Vincent Van Gogh, *View of the Sea at Scheveningen*, August 1882, oil on paper on canvas, 36.4 cm×51.9 cm, Van Gogh Museum, Amsterdam (F-0004). A-F Steps involved in creating a 3D printed fill for loss compensation.

Figura 2 | Vincent Van Gogh, *Vista del mar en Scheveningen*, agosto de 1882, óleo sobre papel sobre lienzo, 36,4 cm×51,9 cm, Museo Van Gogh, Ámsterdam (F-0004). A-F Fases en la creación de un relleno impreso en 3D para el tratamiento de pérdidas.

Developing Tools for and with Museums

Over the years, the Center has been able to design, engineer, and build instrumentation and software for non-invasive analysis. Several portable non-invasive tools for the humanities have been developed, with spectral imaging having become a primary area of expertise. Of particular note, the NU-ACCESS team has created a state-of-the-art Macro X-ray Fluorescence spectroscopy instrument (MA-XRF) (Pouyet et al., 2020a), and constructed systems for hyperspectral imaging

Desarrollar herramientas para y con los museos

A lo largo de los años, el Centro ha podido diseñar y construir instrumentación y software para análisis no invasivos. Se han desarrollado varias herramientas portátiles no invasivas para las humanidades, y las imágenes espectrales se han convertido en el área principal de especialización. Cabe destacar que el equipo de NU-ACCESS ha creado un instrumento de espectroscopía de fluorescencia de rayos X macro de última generación (MA-XRF) (Pouyet et al., 2020a), y ha construido sistemas

(Oakley et al. 2020) and optical-coherence tomography (Xu et al., 2019).

Having the capabilities at NU-ACCESS to capture wide-field X-ray images with equipment that is lightweight enough to be shipped to collaborators and easily assembled has improved the ability to undertake sophisticated non-invasive investigation of paintings, analysis that previously required either synchrotron radiation or expensive instrumentation beyond the reach of most cultural heritage institutions. The first MA-XRF model 1.0 instrument traveled to the Harvard Art Museums, to scan Paul Gauguin's *Poèmes Barbares*, 1896 (Vermeulen et al., 2021) and to the Art Gallery of Ontario (AGO) in Canada for the analysis of two Picasso's Blue Period paintings, *La Soupe* and *La Miséreuse Accroupie*, both painted in 1902⁶ (Pouyet et al., 2020b). The scientific data collected during the course of the study and its major discoveries were included by curator Kenneth Brummel of the AGO in the exhibition *Picasso: Painting the Blue Period* (October 6, 2021 – January 16, 2022; Brummel and Franks, 2021), continuing in a tradition where results of analysis performed by the Center are not only incorporated in scholarly publications but also communicated with broader communities thorough public displays in museums.

The close ties with the Art Institute of Chicago, the premier partner in this collaborative endeavor, allow successful testing of these non-invasive methodologies of investigation and their successive improvements, before, during and after being deployed to other institutions. The advantage is that the most suitable works of art are able to be

para imágenes hiperespectrales (Oakley et al. 2020) y tomografía de coherencia óptica (Xu et al., 2019).

Tener la infraestructura en NU-ACCESS para capturar imágenes de rayos X de campo amplio con equipo que es lo suficientemente liviano como para ser enviado a los colaboradores y montado fácilmente ha mejorado la capacidad de llevar a cabo la investigación sofisticada no invasiva de pinturas. Análisis que anteriormente requería el uso de sincrotrones, radiación o instrumentación costosa fuera del alcance de la mayoría de las instituciones del patrimonio cultural. El primer instrumento MA-XRF modelo 1.0 viajó al Harvard Art Museums, para escanear *Poèmes Barbares*, 1896 de Paul Gauguin (Vermeulen et al., 2021) y a la Art Gallery of Ontario (AGO) en Canadá para el análisis de dos obras de Picasso pertenecientes a la época azul, *La Soupe* y *La Miséreuse Accroupie*, ambas pintadas en 1902⁶ (Pouyet et al., 2020b). Los datos científicos recogidos durante el estudio y sus principales descubrimientos fueron incluidos por el comisario Kenneth Brummel de la AGO en la exposición *Picasso: Pintando el periodo azul* (6 de octubre de 2021 - 16 de enero de 2022; Brummel y Franks, 2021), continuando con la tradición en la que los resultados de los análisis realizados por el Centro no solo se incorporan en publicaciones académicas, sino que también difunden entre un público más amplio a través de exposiciones en los museos.

El estrecho vínculo con el Art Institute of Chicago, el socio principal en esta aventura colaborativa, permite probar con éxito estas metodologías de investigación no invasivas y sus sucesivas mejoras, antes, durante y después de su implementación en otras instituciones. La ventaja es que se pueden elegir las obras de arte más

⁶ This project received considerable media attention from major new outlets around the world, including, but not limited to the BBC <https://www.bbc.com/news/science-environment-43088339> and a spread in the New York Times arts section, <https://www.nytimes.com/2018/02/20/science/picasso-blue-period-scans.html>. Media coverage contributes to building awareness of the importance of heritage science for society.

⁶ Este proyecto recibió una considerable atención de los medios de comunicación de los principales medios nuevos de todo el mundo, incluidos, entre otros, la BBC <https://www.bbc.com/news/science-environment-43088339> y una difusión en la sección de artes del New York Times. <https://www.nytimes.com/2018/02/20/science/picasso-blue-period-scans.html>. La cobertura de los medios contribuye a crear conciencia sobre la importancia de la ciencia del patrimonio para la sociedad.

chosen for testing among a collection of more than 300,000 objects, in consultation with the conservation scientists, conservators and curators working at the Institute. Whenever possible, an approach that allows for the integration of complementary, non-invasive and non-contact analytical investigations, paired with visual observations, strategic, non-invasive point analysis, minimal extraction of samples, and advanced statistical data processing, maximizes the chances of success for the characterization of particularly complex objects, such as those with pigment mixtures and layering. In order to maximize information and minimize the allocation of scarce resources (for example time, expertise, and samples), a collaborative, iterative and incremental approach to data gathering and interpretation is followed. In this approach, each step informs the next and provides clues for the interpretation of previous ones. This experience points to another interesting aspect of the networked model of diagnostics offered by a Center like NU-ACCESS: even large institutions such as the Harvard Art Museums and the Art Institute of Chicago can elect to avoid acquiring their own system for MA-XRF or hyperspectral imaging, for example, but rather can call on the Center's instrument when needed, representing significant savings of human and financial resources.

In the following, some examples of projects between the Center and the Art Institute of Chicago are described. These illustrate the advances possible through the mutual sharing of equipment and expertise.

MA-XRF model 1.0 was used in 2017 to conduct in-depth studies of watercolors by John Singer Sargent in preparation for the exhibition *John Singer Sargent and Chicago's Gilded Age* (July 1, 2018–September 30, 2018) (Madsen et al., 2018),

adecuadas para analizar una colección que cuenta con más de 300.000 objetos, tras consultarlo con los científicos especialistas en conservación, conservadores y comisarios que trabajan en el Instituto. Siempre que es posible, las posibilidades de éxito para la caracterización de objetos particularmente complejos, como aquellos con mezclas de pigmentos y estratificación, se maximizan a partir de un enfoque que permite la integración de investigaciones analíticas complementarias, no invasivas y sin contacto, junto con el análisis visual, el análisis de puntos estratégicos y no invasivos, la extracción mínima de muestras y el procesamiento avanzado de datos estadísticos. Para maximizar la información y minimizar la asignación de escasos recursos (por ejemplo, tiempo, experiencia y muestras), se sigue un enfoque colaborativo, iterativo e incremental para la recopilación e interpretación de datos. Con este enfoque, cada paso informa al siguiente y proporciona claves para la interpretación de los anteriores. Esta experiencia apunta a otro aspecto interesante del modelo de diagnóstico en red que ofrece un centro como NU-ACCESS: incluso las grandes instituciones como el Harvard Art Museums y el Art Institute of Chicago pueden, por ejemplo, optar por evitar adquirir su propio sistema para MA-XRF o imagen hiperespectral, y recurrir al instrumento del Centro cuando sea necesario, lo que representa un ahorro significativo de recursos humanos y económicos.

A continuación, se describen algunos ejemplos de proyectos entre el Centro y el Art Institute of Chicago, para ilustrar los avances realizados a través del intercambio mutuo de equipos y experiencia.

El modelo MA-XRF 1.0 se utilizó en 2017 para realizar un estudio en profundidad de las acuarelas de John Singer Sargent para la exposición *John Singer Sargent and Chicago's Gilded Age* (1 de julio de 2018 - 30 de septiembre de 2018) (Madsen et al., 2018), así como en los

as well as on Mummy portraits,⁷ and Pablo Picasso's 1947 gouache drawing *The Faun Musician* (Dahm & Casadio, 2022). Recently, model 2.0 of the MA-XRF scanner, equipped with improved software and detector technology, was used for the in-depth examination of several watercolors and paintings by Paul Cézanne in preparation for an exhibition in 2022. The aim of the investigation was to add to the knowledge of the artist's painting technique and its development through his career. Following archival, curatorial and conservation research, investigations began with visual observations, with and without the aid of magnification.⁸ High-resolution imaging⁹ in the infrared, ultraviolet and X-ray ranges (Verri & Saunders, 2014) allowed for off-site investigation of details and provided preliminary distribution maps of phenomena (e.g. a particular response during exposure to ultraviolet radiation), which could be studied in more detail in subsequent steps. Hyperspectral imaging in the visible and infrared range (400-1700 nm) provided diffuse reflectance distribution maps (Pouyet et al., 2018), which helped with the chemical identification of a number of painting materials, often otherwise difficult to identify non-invasively.¹⁰ Examples of pigments identified in the Cézanne works examined included both historic pigments, such as ultramarine, indigo, red and yellow ochres, vermilion and natural red organic colorants, as well as

retratos de momias,⁷ y el dibujo en gouache de Pablo Picasso *The Faun Musician*, de 1947 (Dahm & Casadio, 2022). Recientemente, el modelo 2.0 del escáner MA-XRF, equipado con software mejorado y tecnología de detección, se utilizó para el examen detallado de varias acuarelas y pinturas de Paul Cézanne para una exposición en 2022. El objetivo de la investigación era aportar al conocimiento de la técnica pictórica del artista y su desarrollo a lo largo de su carrera. Después de la investigación de archivo, comisariado y conservación, las investigaciones comenzaron con observaciones visuales, con y sin la ayuda de aumentos.⁸ Las imágenes de alta resolución⁹ en los rangos infrarrojo, ultravioleta y de rayos X (Verri & Saunders, 2014) permitieron una investigación más allá del detalle y proporcionaron mapas de distribución preliminares de los fenómenos (por ejemplo, una respuesta particular durante la exposición a la radiación ultravioleta), que podrían ser estudiados con más detalle en fases posteriores. Las imágenes hiperespectrales en el rango visible e infrarrojo (400-1700 nm) proporcionaron mapas de distribución de reflectancia difusa (Pouyet et al., 2018), que ayudaron en la identificación química de varios materiales pictóricos, a menudo difíciles de identificar de manera no invasiva.¹⁰ Algunos ejemplos de pigmentos identificados en las obras de Cézanne examinadas incluyen pigmentos históricos, como ultramar, índigo, ocre rojo y amarillos, bermellón y colorantes orgánicos rojos naturales, así como otros pigmentos sintéticos más recientes, como el azul cobalto y el viridiana

⁷ For more on the MA-XRF analysis of the Art Institute of Chicago Mummy portraits see: Rachel Sabino, "Gilding the Dead: Mummy Portraits in Roman Egypt", October 23, 2019; published online at <https://www.artic.edu/articles/767/gilding-the-dead-mummy-portraits-in-roman-egypt>. Accessed on 10/29/2020.

⁸ For this study a Keyence VHX-7020 digital microscope equipped with a VH-ZST Dual-Objective zoom lens (20-2000×) was used. The authors are grateful to Keyence for lending their equipment.

⁹ High-resolution images were captured using a Sinarback eVolution 86H, equipped with appropriate filters. For details on the filters used see Verri and Saunders (2014).

¹⁰ A Resonon Pika II Pushbroom was used for this study.

⁷ Para obtener más información sobre el análisis MA-XRF de los retratos de momias del Art Institute of Chicago, consultar: Rachel Sabino, "Dorando a los muertos: Retratos de momias en el Egipto romano", 23 de octubre de 2019; publicado en línea en <https://www.artic.edu/articles/767/gilding-the-dead-mummy-portraits-in-roman-egypt>. Consultado el 29/10/2020

⁸ Para este estudio se utilizó un microscopio digital Keyence VHX-7020 equipado con una lente de zoom de doble objetivo VH-ZST (20-2000×). Los autores agradecen a Keyence que les prestase su equipo.

⁹ Las imágenes de alta resolución se capturaron utilizando un Sinarback eVolution 86H, equipado con los filtros adecuados. Para obtener detalles sobre los filtros utilizados, consultar Verri y Saunders (2014).

¹⁰ Para este estudio se utilizó un Resonon Pika II Pushbroom.

more recent synthetic ones, such as cobalt blue, and viridian (Aceto *et al.*, 2014; Bacci & Picollo, 1996). Alongside hyperspectral imaging, XRF mapping was used to complement and augment results by revealing the presence and distribution of elements, some of which may have related to painting materials not detectable with the other techniques listed above.¹¹ Finally, data processing played a crucial role in the interpretation of the massive amount of data collected. Well-established methods, such as false-color imaging, provided clues for further targeted investigations by making features otherwise invisible to the naked eye easier to visualize (Aldrovandi *et al.*, 2005). Similarly, advanced statistical analysis of complex datasets, including in this case hyperspectral and X-ray fluorescence data, provided elaborate interpretations of artists' practice (Delaney *et al.*, 2018). In recent years, the field of statistical analysis of complex datasets has expanded exponentially with exciting results and possibilities. Semi-automated processes allowed hyperspectral data to be analyzed and interpreted by reducing its dimensionality to a manageable number and by creating distribution maps of particular painting materials, crucially shedding light on pigment use and application technique. In recent advances championed by NU-ACCESS researchers, notable was the demonstration by Pouyet and co-authors of the advantages of t-distributed stochastic neighbor embedding (t-SNE) over Principal Component Analysis (PCA) and other statistical techniques inspired by remote sensing applications (Pouyet *et al.*, 2018). Also, Vermeulen and co-authors discussed the computational benefits of using Uniform Manifold Approximation and

(Aceto *et al.*, 2014; Bacci & Picollo, 1996). Junto con las imágenes hiperespectrales, el mapeo con XRF se utilizó para complementar y confirmar los resultados al revelar la presencia y distribución de elementos, algunos de los cuales pueden estar relacionados con materiales pictóricos no detectables con las técnicas enumeradas anteriormente.¹¹ Finalmente, el procesamiento de datos jugó un papel crucial en la interpretación de la enorme cantidad de datos recopilados. Métodos bien establecidos, como las imágenes en falso color, proporcionaron claves para investigaciones más específicas al hacer que las características que de otro modo serían invisibles a simple vista fueran más fáciles de visualizar (Aldrovandi *et al.*, 2005). De manera similar, el análisis estadístico avanzado de conjuntos de datos complejos, incluyendo en este caso datos hiperespectrales y de fluorescencia de rayos X, proporcionó interpretaciones más elaboradas sobre la práctica del artista (Delaney *et al.*, 2018). En los últimos años, el campo del análisis estadístico de conjuntos de datos complejos se ha expandido exponencialmente con interesantes resultados y posibilidades. Los procesos semi-automatizados permiten analizar e interpretar datos hiperespectrales reduciendo su dimensionalidad a un número manejable y creando mapas de distribución de materiales pictóricos particulares, arrojando luz sobre el uso de pigmentos y la técnica de aplicación de manera crucial. Entre los avances más recientes defendidos por los investigadores de NU-ACCESS, cabe destacar la demostración de Pouyet y coautores sobre las ventajas de la agrupación de vecinos estocásticos distribuidos en t (t-SNE) sobre el análisis de componentes principales (PCA) y otras técnicas estadísticas inspiradas en la teledetección aplicada (Pouyet *et al.*, 2018). Además, Vermeulen y sus coautores discutieron los beneficios computacionales de usar la técnica de reducción de dimensionalidad no lineal conocida como aproximación

¹¹ This is for example the case for Prussian blue, which shows a strong but not particularly distinctive absorption in the 400-1000 nm range; however, absorption data combined with spatial information on the presence of iron and potassium can result in its non-invasive identification.

¹¹ Este es, por ejemplo, el caso del azul de Prusia, que muestra una absorción fuerte pero no particularmente distintiva en el rango 400-1000 nm; sin embargo, los datos de absorción combinados con información espacial sobre la presencia de hierro y potasio pueden resultar en su identificación no invasiva.

Projection for Dimension Reduction (UMAP) over t-SNE (Vermeulen et al., 2021).

Figure 3 shows the application of this multi-pronged methodology to the study of *The Vase of Tulips*, painted by Paul Cézanne around 1890. The background of the painting was of particular interest; the visible image (Fig. 3A) showed a relatively homogeneous cyan hue of varying brightness. However, the infrared false-color image showed some areas as pink-red (Fig. 3B), while others as blue, indicating the presence of pigments with different reflective properties in the infrared range.¹² A magnified detail of one of the areas of the background (Fig. 3C) revealed that a seemingly monochrome cyan hue was in fact the product of a complex mixture of blue, green, red and white pigments. Hyperspectral data was used to further clarify this difference and UMAP data analysis provided an initial assessment of the abundance and distribution of painting materials. Reflectance-absorption spectroscopy of the area that appeared red in the false-color image (Fig. 3B) revealed the presence of ultramarine and viridian (Fig. 3D) (Aceto et al., 2014; Delaney et al., 2018). Both pigments showed high reflectance in the infrared range, hence the red color in the false-color image. The XRF map of chromium (Fig. 3E) confirmed the use of a small amount of the chromium-based pigment viridian in the background—right side of the painting, while the XRF map of zinc (Fig. 3F) indicated the likely use of zinc white to lighten the color. By contrast, areas that appeared blue in the false color image showed the presence of arsenic and copper, suggesting the use of an arsenite pigment, such as emerald or Scheele's green. These areas also contained a blue pigment, probably artificial ultramarine.

y proyección de colector uniforme (UMAP, son sus siglas en inglés) sobre t-SNE (Vermeulen et al., 2021).

La Figura 3 muestra la aplicación de esta metodología multifacética en el estudio de *The Vase of Tulips*, pintado por Paul Cézanne cerca de 1890. El fondo del cuadro es de particular interés; la imagen visible (Fig. 3A) muestra un tono cian relativamente homogéneo de brillo variable. Sin embargo, la imagen infrarroja en falso color muestra algunas áreas en un tono rosa-rojo (Fig. 3B), mientras que otras como el azul, indicaban la presencia de pigmentos con diferentes propiedades reflectantes en el rango infrarrojo.¹² El examen en detalle de una de las áreas del fondo (Fig. 3C) reveló que el tono cian aparentemente monocromático era de hecho el producto de una compleja mezcla de pigmentos azules, verdes, rojos y blancos. Para entender mejor estas diferencias se utilizaron datos hiperespectrales y el análisis de datos con UMAP proporcionó una evaluación inicial de la abundancia y distribución de los materiales pictóricos. La espectroscopía de reflectancia-absorción del área con aspecto rojo en la imagen en falso color (Fig. 3B) reveló la presencia de ultramar y viridiana (Fig. 3D) (Aceto et al., 2014; Delaney et al., 2018). Ambos pigmentos mostraron una alta reflectancia en el rango infrarrojo, de ahí el color rojo en la imagen de falso color. El mapa XRF obtenido para el cromo (Fig. 3E) confirmó el uso de una pequeña cantidad del pigmento a base de cromo, Viridiana, en el lado derecho del fondo. Mientras que el mapa XRF del zinc (Fig. 3F) indicó el uso probable de blanco de zinc para aclarar el color. Por el contrario, las áreas que parecían azules en la imagen en falso color muestran la presencia de arsénico y cobre, lo que sugiere el uso de un pigmento de arsenito, como esmeralda o el verde de Scheele. Estas áreas también contienen un pigmento azul, probablemente ultramarino artificial. Curiosamente, el mapa XRF del cobalto (Fig. 3G),

¹² An infrared false-color image shows the infrared reflectance properties of a painted surface with a red color; the brightness of the red component in the image is proportional to the reflective properties of the surface.

¹² Una imagen infrarroja de falso color muestra las propiedades de reflectancia infrarroja de una superficie pintada con un color rojo; el brillo del componente rojo en la imagen es proporcional a las propiedades reflectantes de la superficie.

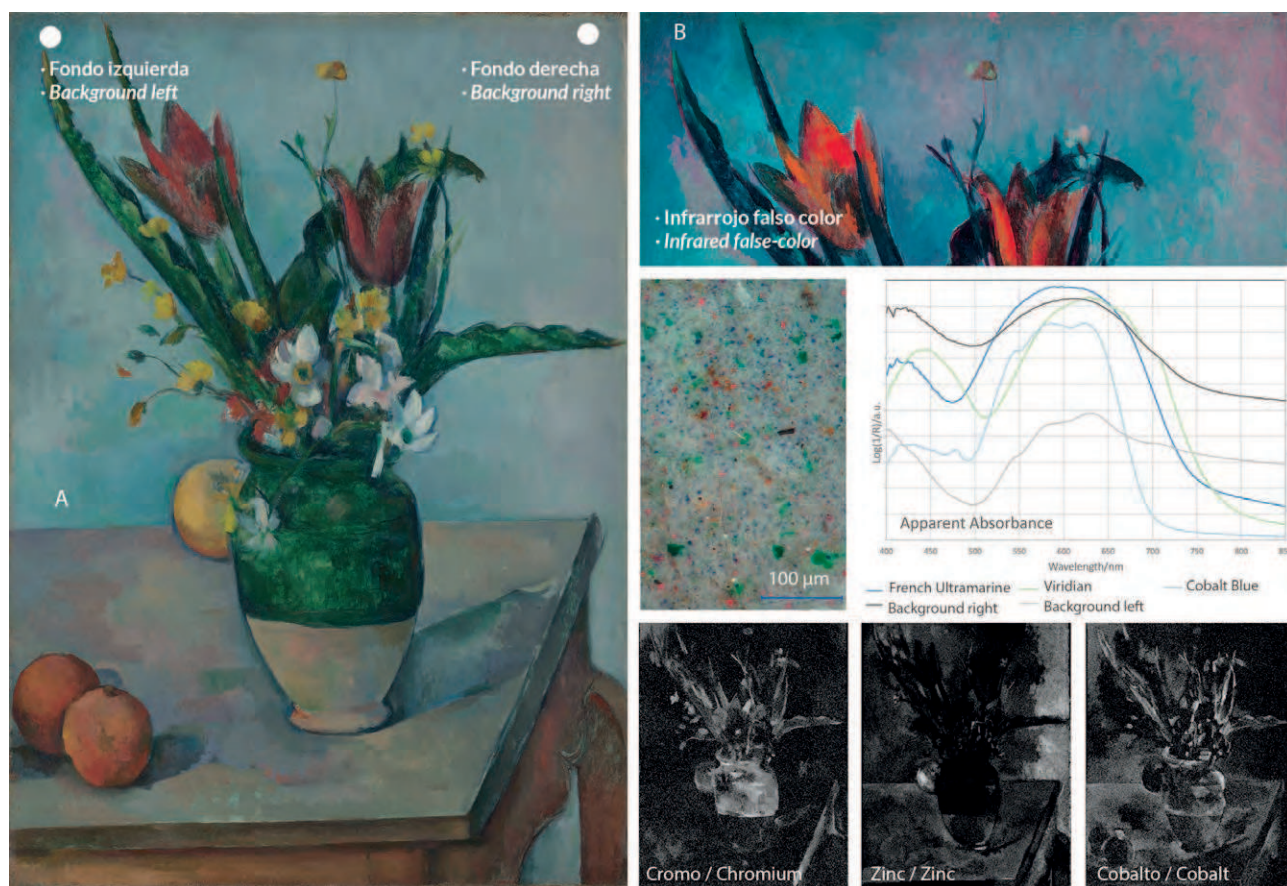


Figure 3 | Paul Cézanne, *The Vase of Tulips*, c. 1890, oil on canvas, 59.6×42.3 cm, Mr. and Mrs. Lewis Larned Coburn Memorial Collection, The Art Institute of Chicago (1933.423). (A): visible image; (B): infrared false-color image; (C): magnified detail showing the microscopic composition of the area Background right, as indicated in (A); (D): apparent absorbance of two areas, as indicated in (A); (E-G): XRF maps of chromium, zinc and cobalt.

Figura 3 | Paul Cézanne, *Jarrón de tulipanes*, c. 1890, óleo sobre lienzo, 59,6×42,3 cm, Sr. y Sra. Lewis Larned Coburn Memorial Collection, The Art Institute of Chicago (1933.423). (A): imagen visible; (B): imagen infrarroja en falso color; (C): detalle ampliado que muestra la composición microscópica del área de fondo a la derecha, como se indica en (A); (D): absorbancia aparente de dos áreas, como se indica en (A); (E-G): Mapas XRF de cromo, zinc y cobalto.

Interestingly, the XRF map of cobalt (Fig. 3G), as well as the hyperspectral data, revealed the use of another blue pigment, cobalt blue, employed on the left hand side of the background. The red particles visible in Figure 3C were identified as vermilion with XRF analysis. Through this work, involving a high-level interdisciplinary, iterative and

así como los datos hiperespectrales, revelaron el uso de otro pigmento azul, azul cobalto, empleado en el lado izquierdo del fondo. El análisis con XRF de las partículas rojas visibles en la Figura 3C se identificaron como bermellón. A través de este trabajo, que involucró un enfoque interdisciplinario, iterativo y colaborativo de alto nivel, se investigó y mapeó el uso ciertamente complejo

collaborative approach, the rather complex use of pigments in Cézanne's works were investigated and fully mapped without removing any samples, revealing that similar hues were achieved through the use of a variety of pigments, making a carefully constructed work of art appear deceptively simple.

The NU-ACCESS hyperspectral imaging set-up, combined with point-XRF analysis and Raman microspectroscopy, was also used for the characterization of pigments in the watercolor entitled *Two Old Men beside a Sled Bearing the Coats of Arms of Amsterdam and Utrecht, 1620/33* by the Dutch artist Hendrick Avercamp (1585-1634) in the collection of the Art Institute of Chicago. This investigation led to the discovery of the extensive use of finely ground smalt mixed with small amounts of carbon black and warmer touches of vermilion and red lake in the cool winter sky, precisely as described a century later in a painter's manual as the specific paint mixture to be used to capture the essence of a cold and crisp winter sky in the Low Countries. Results of this work were included in the publication *"Rubens, Rembrandt and Drawing in the Golden Age"* (Lobis et al., 2019) to accompany the exhibition of the same name at the Art Institute of Chicago (September 28, 2019–January 5, 2020). The volume was intended as a collection catalog for the museum, but also as an essential introductory text to the art historical study of Dutch and Flemish drawings in the 17th century. Including the scientific analysis of materials enabled by NU-ACCESS in the book is an important sign that this interdisciplinary methodology of study is increasingly considered a foundational method of inquiry for art historians, as much as other well-established approaches. Because hyperspectral and MA-XRF data can be presented in graphic form that allow a direct comparison with visual images of the artwork, it is more conducive to interdisciplinary dialogue than other, more visually abstract forms of scientific

de pigmentos en las obras de Cézanne sin tener que tomar ninguna muestra, revelando que se consiguen tonos similares mediante el uso de una variedad de pigmentos, y logrando que una obra de arte cuidadosamente construida parezca engañosamente simple.

Esta configuración de NU-ACCESS que combina el análisis de imagen hiperespectral con análisis de XRF en puntos seleccionados y microspectroscopía Raman, también se utilizó para la caracterización de pigmentos en la acuarela titulada *Two Old Men beside a Sled Bearing the Coats of Arms of Amsterdam and Utrecht, 1620/33* del artista holandés Hendrick Avercamp (1585-1634) en la colección del Art Institute of Chicago. Esta investigación condujo al descubrimiento del amplio uso de esmalte finamente molido mezclado con pequeñas cantidades de negro de carbón y toques más cálidos de bermellón y laca roja en el frío cielo invernal, precisamente como se describe un siglo después en un manual de pintor como la mezcla de pintura específica para capturar la esencia de un cielo de invierno frío y limpio en los Países Bajos. Los resultados de este trabajo se incluyeron en la publicación *"Rubens, Rembrandt and Drawing in the Golden Age"* (Lobis et al., 2019) para acompañar la exposición del mismo nombre en el Art Institute of Chicago (28 de septiembre de 2019 - 5 de enero de 2020). El volumen fue concebido como un catálogo de colección para el museo, pero también como un texto introductorio esencial para el estudio histórico del arte de los dibujos holandeses y flamencos en el siglo XVII. Incluir los resultados del análisis científico habilitados por UN-ACCESS sobre los materiales en el libro es una señal importante de que esta metodología de estudio interdisciplinar se considera cada vez más un método de investigación fundamental para los historiadores de arte, al mismo nivel que otros enfoques plenamente establecidos. Dado que los datos hiperespectrales y de MA-XRF pueden presentarse de forma gráfica y ello permite una comparación directa con imágenes visuales de la obra de arte, es más propicio para el diálogo interdisciplinar que otras

data: a marked advantage for publications in the humanities.

Before, During and After

The impact and benefits of the external proposal system go well beyond the individual institution that submits the proposal. Once ideas are cultivated in the university ecosystem, often unexpected and creative synergies ensue. For example, a project submitted by the Georgia O'Keeffe Museum in Santa Fe in 2014 initially focused on identifying the reason for the occurrence of protrusions likely connected to the formation of metal soaps in a number of the artist's paintings, observed during O'Keeffe's lifetime. The Center's work with the museum subsequently spurred the development of a new computational imaging technique (UV-induced luminescence photometric stereo) to document and monitor such protrusions (Salvant et al., 2019). The work initiated via this external proposal led three years later to the successful submission of an NEH-Research and Development grant to computationally enhance the piloted imaging technique to provide semi-quantitative evaluation of protrusion formation over time and characterize the microchemistry of metal carboxylate soaps in O'Keeffe's works¹³ (Ortiz Miranda et al., 2020). Working with the Northwestern University's McCormick School of Engineering, the Center was then able to translate this prototype, experimental technology into practice by developing and patenting an app for iPad, or other consumer tablets, to make quantitative surface shape measurements of works of art, using a metrological technique known as deflectometry (Willomitzer et al., 2020) (Fig. 4).

formas de datos científicos visualmente más abstractos: una ventaja significativa para las publicaciones en las humanidades.

Antes, durante y después

El impacto y los beneficios del sistema de propuestas externas van mucho más allá de la institución individual que presenta la propuesta. Una vez que las ideas se conciben en el ecosistema universitario, a menudo surgen sinergias inesperadas y creativas. Por ejemplo, un proyecto presentado por el Museo Georgia O'Keeffe en Santa Fe en 2014 que se centraba inicialmente en identificar el motivo de la aparición de protuberancias probablemente relacionadas con la formación de jabones metálicos en varias de las pinturas del artista, observadas en la obra de O'Keeffe. El trabajo del Centro con el museo estimuló posteriormente el desarrollo de una nueva técnica de imágenes computacionales (estéreo fotométrico de luminiscencia inducida por UV) para documentar y monitorizar tales protuberancias (Salvant et al., 2019). El trabajo iniciado a través de esta propuesta externa condujo tres años más tarde a la presentación exitosa de una subvención de NEH-Investigación y Desarrollo para mejorar computacionalmente la técnica de imagen piloto para proporcionar una evaluación semi-cuantitativa de la formación de protuberancias a lo largo del tiempo y la caracterización micro-química de los jabones de carboxilato metálico en obras de O'Keeffe¹³ (Ortiz Miranda et al., 2020). Trabajando en colaboración con la McCormick School of Engineering de la Northwestern University, el Centro pudo trasladar este prototipo, tecnología experimental a la práctica mediante el desarrollo y la patente de una aplicación para iPad u otras tabletas de consumo, para realizar mediciones cuantitativas de la forma de la superficie de las obras de arte, utilizando

¹³ The project was called "Metal Soap Protrusions on Georgia O'Keeffe's Paintings: Establishing a New Quantitative Imaging Paradigm for Linking Scientific Research and Preservation" (NEH grant PR-258900-18; 1/1/2018 – 12/31/2020) and had Dale Kronkright, Head of Conservation at the O'Keeffe Museum, as co-investigator together with NU-ACCESS and Northwestern University PIs.

¹³ El proyecto se denominó "Protuberancias de jabón metálico en las pinturas de Georgia O'Keeffe: establecimiento de un nuevo paradigma de imágenes cuantitativas para vincular la investigación científica y la preservación" (subvención NEH PR-258900-18; 1/1/2018 - 12/31/2020) y tuvo a Dale Kronkright, Jefe de Conservación en el Museo O'Keeffe, como co-investigador junto con NU-ACCESS y los investigadores principales de la Universidad Northwestern.



Figure 4 | A) NU-ACCESS faculty affiliate, Professor O. Cossairt, using the iPad deflectometry app developed by NU-ACCESS and the Northwestern's Computational Imaging Lab at the O'Keeffe Museum in Santa Fe, New Mexico. **B)** Schematic diagram of image capture with structured light for surface metrology.

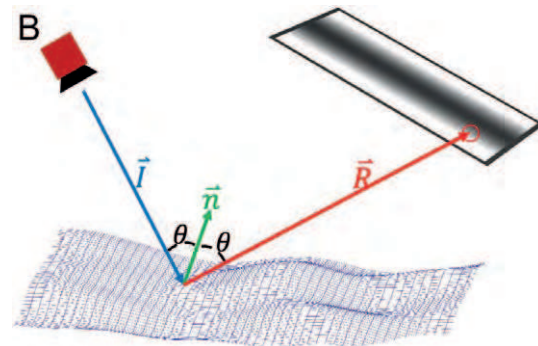


Figura 4 | A) Profesor O. Cossairt, afiliado de la facultad NU-ACCESS, usando la aplicación de deflectometría para iPad desarrollada por NU-ACCESS y el Laboratorio de Imágenes Computacionales de Northwestern en el Museo O'Keeffe en Santa Fe, Nuevo México. **B)** Diagrama esquemático de captura de imágenes con luz estructurada para metrología de superficie.

Deflectometry is a computational imaging method that employs structured illumination to measure the surface shape of specularly reflecting materials (like polished metal, glass, varnish). Using off-the-shelf LCD screens sinusoidal patterns of light are projected onto objects and the reflected light is detected using machine vision cameras.¹⁴

This model has had a meaningful impact on students and fills a unique niche that is highly appealing for universities that are trying to straddle the divide between the sciences and the humanities on their campuses. For example, following the above research, Center staff developed a workshop on deflectometry that was offered to students

una técnica metrológica conocida como deflectometría (Willomitzer *et al.*, 2020) (Fig. 4). La deflectometría es un método de imágenes computacionales que emplea iluminación estructurada para medir la forma de la superficie de materiales reflectantes de forma especular (como metal pulido, vidrio, barniz). Utilizando pantallas LCD disponibles en el mercado, se proyectan patrones sinusoidales de luz sobre los objetos y la luz reflejada se detecta mediante cámaras de visión artificial.¹⁴

Este modelo ha tenido un impacto significativo en los estudiantes ya que es muy atractivo y aporta a llenar el vacío para las universidades que están tratando de superar la división entre las ciencias y las humanidades en sus campus. Por ejemplo, siguiendo la investigación

¹⁴ The software developed through the NEH proposal can be found at the NU-ACCESS Github as a beta release: <https://github.com/NU-ACCESS/GhostScan>. Named after Georgia O'Keeffe's Ghost ranch in New Mexico, the software is a Jupyter Notebook that links to an open-source Python library, written by the Center's team, which integrates any generic camera and screen hardware for imaging. An open source plugin for Fiji (ImageJ) was also developed to measure surface shape. This plugin can be found here: <https://github.com/NU-ACCESS/ImageJ-Photometric-Stereo-Tools>.

¹⁴ El software desarrollado a través de la propuesta de NEH se puede encontrar en NU-ACCESS Github como versión beta: <https://github.com/NU-ACCESS/GhostScan>. Nombrado en honor al rancho Ghost de Georgia O'Keeffe en Nuevo México, el software es un Jupyter Notebook que se vincula a una biblioteca de Python de código abierto, escrita por el equipo del Centro, que integra cualquier cámara genérica y hardware de pantalla para imágenes. También se desarrolló un complemento de código abierto para Fiji (ImageJ) para medir la forma de la superficie. Este complemento se puede encontrar aquí: <https://github.com/NU-ACCESS/ImageJ-Photometric-Stereo-Tools>.

from two universities in Chicago (Northwestern University and the University of Chicago) as well as Art Institute of Chicago conservators and scientists, extending the technique and app to capture and document the shape and morphology of surfaces of a wide range of works of art. The workshop was generative in illustrating the process of developing innovative tools for multi-disciplinary research, and stimulated participants (both from the humanities and the sciences) to think about optics and how they could use this new tool in their own art historical research.

Teaching Through Diagnostics

Developing a Pedagogy of Interdisciplinarity

Art is inspirational, and its value as an educational tool has enormous potential to bring undergraduate and graduate students together from diverse academic backgrounds (Smith, 2016). Academia is a locus of training and museums afford access to original objects to connect socio-emotional experiences with inquiry.

Within the scope of NU-ACCESS, new pedagogical approaches were developed through objects-based learning with the aim to teach more effectively across disciplines, in particular in engineering and the humanities (Sochacka et al., 2016). With this work, a strong culture of collaboration is created between museums and academic practitioners in the area of enhanced materials-based scholarship for art history and conservation. To date, NU-ACCESS has developed several courses that address the role of scientific investigation of the production and use of art and artifacts across time and space. As a capstone to courses offered, students have received first-hand experience in examining works of art and have

anterior, el personal del Centro desarrolló un taller sobre deflectometría que se ofreció a estudiantes de dos universidades de Chicago (Northwestern University y University of Chicago), así como a conservadores y científicos del Art Institute of Chicago, ampliando la técnica y su aplicación, para capturar y documentar la forma y morfología de superficies de una amplia gama de obras de arte. El taller permitió generar sinergias al ilustrar el proceso de desarrollo de herramientas innovadoras para la investigación multidisciplinar, y estimuló a los participantes (tanto de las humanidades como de las ciencias) a reflexionar sobre la óptica y cómo podrían utilizar esta nueva herramienta en su propia investigación sobre historia del arte.

Enseñanza mediante el diagnóstico

Desarrollar una pedagogía de la interdisciplinariedad

El arte es inspirador y su valor como herramienta educativa tiene un enorme potencial para reunir a estudiantes de grado y máster con diferente formación previa (Smith, 2016). La academia es un lugar de formación y los museos ofrecen acceso a objetos originales para conectar las experiencias socioemocionales con la indagación.

Dentro del alcance de NU-ACCESS, se desarrollaron nuevos enfoques pedagógicos a través del aprendizaje basado en objetos con el objetivo de enseñar de manera más efectiva en todas las disciplinas, en particular en ingeniería y humanidades (Sochacka et al., 2016). Con este trabajo, se crea una fuerte cultura de colaboración entre los museos y los profesionales académicos generando mejores becas en el este campo inspiradas por los materiales para la historia del arte y la conservación. Hasta la fecha, NU-ACCESS ha desarrollado varios cursos que abordan el papel de la investigación científica sobre la producción y el uso de arte y objetos a través del tiempo y el espacio. Como culminación de

collected meaningful scientific data to aid in art historical inquiries. This approach was epitomized by the undergraduate seminar entitled “Materials Science and Socioeconomics of Portrait Mummies from Ancient Fayum” developed by Marc Walton, in collaboration with Taco Terpstra (Assistant Professor of Classics and History, Northwestern University) and Essi Rönkkö (Associate Curator of Collections at Northwestern’s Block Museum). Stemming from a NU-ACCESS research project launched in 2014 with the Phoebe-Hearst Museum of Art on the University of California, Berkeley campus to study the techniques and materials of Graeco-Roman mummy portraits (Salvant et al., 2018), Terpstra and Walton designed a seminar in which Northwestern students studied and analyzed these objects, contributing to the curation of the exhibition “Paint the Eyes Softer” (Block Museum of Art, January 13 - April 22, 2018). Students from various majors including materials science, environmental and civil engineering, chemistry, classics, art history, and radio/TV/film studied a Roman period mummy using both scientific approaches and critical historical enquiry. The students produced a range of didactic material that was directly integrated into the exhibition, including an original soundscape and an augmented reality experience that allowed visitors to visualize in real time the computed tomography (CT) and synchrotron scanning of the child mummy that was the exhibition’s centerpiece, using a tablet pointed towards the archaeological object (Fig. 5). The class, exhibition, and mummy received national attention, with stories featured on Public Broadcasting Service (PBS), in *The Chicago Tribune* and *The Washington Post*, and in the *Newsweek* and *Forbes* magazines, as well as globally, with a presence on the BBC and in the *Times* magazine (London) among others.

los cursos ofrecidos, los estudiantes han recibido experiencia de primera mano en el examen de obras de arte y han recopilado datos científicos significativos para ayudar en las investigaciones sobre historia del arte. Este enfoque fue personificado por el seminario de grado titulado “Materials Science and Socioeconomics of Portrait Mummies from Ancient Fayum” desarrollado por Marc Walton, en colaboración con Taco Terpstra (profesor asistente de clásicos e historia, Northwestern University) y Essi Rönkkö (comisario asociado de colecciones en el Northwestern’s Block Museum). A partir de un proyecto de investigación de NU-ACCESS lanzado en 2014 con el Phoebe-Hearst Museum of Art en la University of California, en el campus de Berkeley para estudiar las técnicas y materiales de los retratos de momias grecorromanas (Salvant et al., 2018), Terpstra y Walton diseñaron un seminario en el que los estudiantes de Northwestern estudiaban y analizaban estos objetos, contribuyendo al comisariado de la exposición “Paint the Eyes Softer” (Block Museum of Art, 13 de enero - 22 de abril de 2018). Los estudiantes de varias especialidades, incluidas ciencias de los materiales, ingeniería ambiental y civil, química, clásicos, historia del arte y radio / televisión / cine estudiaron una momia de la época romana utilizando enfoques científicos y una investigación histórica crítica. Los estudiantes produjeron una variedad de material didáctico que se integró directamente en la exposición, incluido un paisaje sonoro original y una experiencia de realidad aumentada que permitió a los visitantes visualizar en tiempo real la tomografía computarizada (CT) y el escaneo sincrotrón de la momia infantil que era el centro de la exposición, utilizando una *tablet* proyectada hacia el objeto arqueológico (Fig. 5). La clase, la exposición y la momia recibieron atención nacional, con historias presentadas en *Public Broadcasting Service* (PBS), en *The Chicago Tribune* y *The Washington Post*, y en las revistas *Newsweek* y *Forbes*, así como a nivel mundial, con presencia en la BBC y en la revista *Times* (Londres) entre otros.

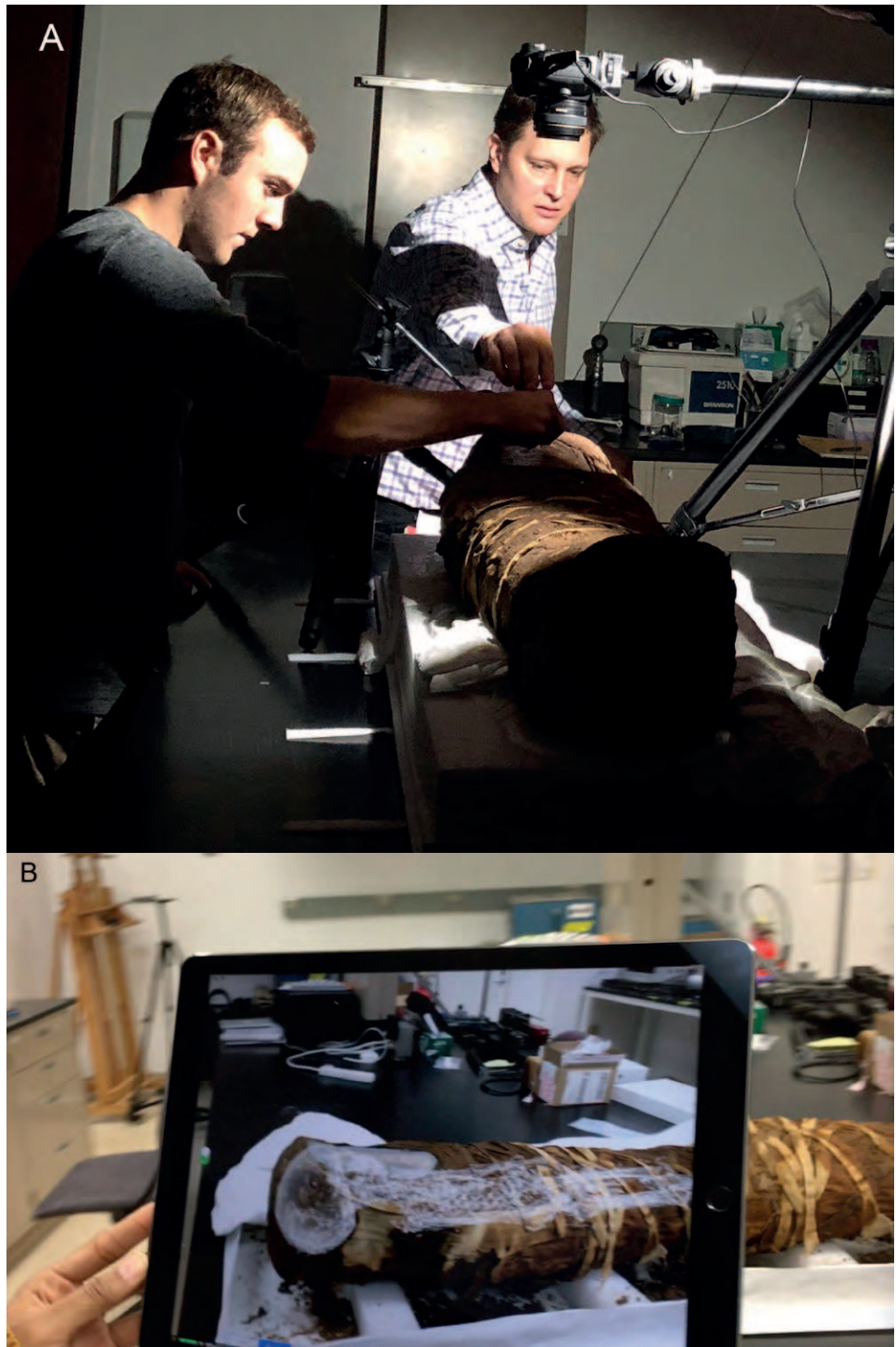


Figure 5 | A) NU-ACCESS co-Director, Marc Walton, works with a student on a Roman-Egyptian portrait Mummy. **B)** An iPad app was developed by students in a course taught by Walton to visualize the skeletal remains inside the wrappings.

Figura 5 | A) El codirector de NU-ACCESS, Marc Walton, trabaja con un estudiante en un retrato de una momia romano-egipcia. **B)** Los estudiantes desarrollaron una aplicación para iPad en un curso impartido por Walton para visualizar los restos óseos dentro del vendaje.

As represented by this case study, teaching at the interface of science and art engages students in creative aspects of both engineering and the humanities that can be further augmented through exhibitions to reach a very broad audience, creating lasting life experiences at every level.

Training the Next Generation

The Center is in an excellent position to mentor the next generation of researchers to think beyond traditional intellectual domains, and with significant depth, about how the humanities and physical sciences can work together for the betterment of human understanding. The field of scientific research in the arts, or “heritage science”, has gained incredible momentum in the 21st century and is experiencing a level of growth and sophistication that is unprecedented. Yet, new generations of humanists need to be trained and educated not only in the methodologies and results of scientific inquiry, but also, and most importantly, in the collaboration and co-creation of knowledge, which is a fundamental practice of scientific research.

The Center is also engaged in broadening opportunities to individuals coming from every economic, social, and racial background, which is a national priority in the United States. The Center has had a good record in the past few years of recruiting and training Black, Indigenous, People of Color (BIPOC) postdocs and students. At the time of writing the Center’s diverse roster includes an African American PhD student in Art History who is supervised jointly with NU-ACCESS; one postdoc from Puerto Rico and one postdoc who graduated from a Historically Black College and University (HBCU). Likewise, one of the NSF-funded programs, in which summer research experiences in the Netherlands were provided for students, inspired an Arab-American student to pursue a career in conservation science and land a prestigious fellowship at the

Como se representa en este caso de estudio, la enseñanza en la interfaz ciencia-arte involucra a los estudiantes en aspectos creativos tanto de la ingeniería como de las humanidades, algo que puede potenciarse aún más a través de exposiciones para llegar a un público más amplio, creando experiencias de vida duraderas a todos los niveles.

Formando a la próxima generación

El Centro está en una excelente posición para guiar a la próxima generación de investigadores más allá de los dominios intelectuales tradicionales, y con una profundidad significativa acerca de cómo las humanidades y las ciencias físicas pueden trabajar juntas para mejorar la comprensión humana. El campo de la investigación científica en las artes, o “ciencia del patrimonio”, ha ganado un impulso increíble en el siglo XXI y está experimentando un nivel de crecimiento y sofisticación sin precedentes. Sin embargo, es necesario formar y educar a las nuevas generaciones de humanistas no solo en las metodologías y los resultados de la investigación científica, sino también, y lo más importante, en la colaboración y co-creación del conocimiento, que es una práctica fundamental de la investigación científica.

El Centro también se dedica a ampliar las oportunidades para personas procedentes de diferentes realidades económicas, sociales y raciales, algo que es una prioridad nacional en los Estados Unidos. El Centro ha tenido un buen historial en los últimos años de reclutamiento y capacitación de postdoctorados y estudiantes negros, indígenas, de la gente de color (BIPOC). Al momento de escribir este artículo, la diversa lista del Centro incluye a un estudiante afroamericano de doctorado en Historia del Arte que es supervisado conjuntamente con NU-ACCESS; un postdoctorado de Puerto Rico y un postdoctorado que se graduó del Historically Black College and University (HBCU). Del mismo modo, uno de los programas financiados por la NSF, con el que se proporcionan experiencias de investigación de verano a los estudiantes en los Países Bajos, inspiró a un

Museum of Modern Art, New York, and led a Latin student to attend the University of Minnesota in Materials Science in her pursuit of conservation science as a career. The Center wants to build on this commitment to bolster preparedness for and awareness of the field of heritage science, which is still relatively unknown in the US, compared to Europe, and build early-career networks for people of color as well as those from economically disadvantaged backgrounds. Ultimately, the Center wishes to offer a program of research and study that would pave the way for these students to enter graduate school in art conservation, conservation science and engineering, and the workforce beyond.

Metrics for Success

Throughout its history, Center's success has been measured based on the following metrics:

- 1) its academic achievements: scientific publications, contributions to museum exhibitions and catalogs; new research advances seeded; the development of portable instruments, and the novel applications of analytical techniques;
- 2) service to the museum community through its competitive outside project grants;
- 3) innovation in teaching and training;
- 4) student research papers that indicate greater understanding of the importance of their research to interpreting cultural heritage materials and preventing the deterioration of works of art;

estudiante árabe-estadounidense a seguir una carrera en ciencias de la conservación y obtener una prestigiosa beca en el Museum of Modern Art, New York y llevó a una estudiante latina a cursar Ciencia de Materiales en la University of Minnesota en su búsqueda de la ciencia de la conservación como carrera. El Centro quiere aprovechar este compromiso para reforzar la preparación y el conocimiento del área de la ciencia del patrimonio, que todavía es relativamente desconocido en los EEUU, en comparación con Europa, y construir redes de profesionales emergentes para personas de color y de entornos económicamente desfavorecidos. En última instancia, el Centro desea ofrecer un programa de investigación y estudio que allane el camino para que estos estudiantes ingresen a la escuela de posgrado en conservación de arte, ciencias de la conservación e ingeniería, y en el posterior mercado laboral.

Métricas para el éxito

A lo largo de su historia, el éxito del Centro se ha medido en función de las siguientes métricas:

- 1) sus logros académicos: publicaciones científicas, contribuciones a exposiciones y catálogos de museos; implementación de nuevos avances en la investigación; el desarrollo de instrumentos portátiles y las nuevas aplicaciones de técnicas analíticas;
- 2) servicio a la comunidad de museos a través de subvenciones competitivas para proyectos externos;
- 3) innovación en la enseñanza y la formación;
- 4) trabajos de investigación de los estudiantes que muestran una mayor comprensión de la importancia de su investigación para interpretar los

- 5) the Center's ability to recruit at least a portion of its students each year from underrepresented minorities (including women in engineering) into the program;
- 6) media coverage and outreach through NSF-funded Art+Science collaborations with the department of Learning and Public Engagement at the Art Institute of Chicago;
- 7) additional funds raised by drawing greater attention to the value of cross-fertilization between the sciences and the humanities fostered by NU-ACCESS on campus and beyond;
- 8) international research collaborations.

Overall, the experience described here confirms that bringing science from the University to the art museum effectively creates a web of interconnected ecosystems where the final achievements are invariably much more than the sum of their parts.

Conclusions

The scientific study of cultural heritage, in its broader sense, allows a better understanding and protection of diverse human identities through the understanding and preservation of the world's material culture. This study requires using both established techniques and novel methods for non-invasive or minimally invasive analysis at multiple length scales, working with objects that are irreplaceable, heterogeneous, and often multilayered. Heritage scientists must therefore always push the boundaries of their fields to develop new diagnostic methods, for example, new non-invasive imaging approaches and new sampling procedures for extant imaging and scientific analysis techniques.

materiales del patrimonio cultural y prevenir el deterioro de las obras de arte;

- 5) capacidad del Centro para reclutar, cada año, al menos una parte de sus estudiantes de minorías subrepresentadas (incluidas las mujeres en ingeniería) en el programa;
- 6) cobertura de los medios y difusión a través de Arte+Ciencia financiadas por NSF en colaboración con el departamento de Aprendizaje y Participación Pública del Art Institute of Chicago;
- 7) recaudación de fondos adicionales al hacer más llamativo el valor de la fertilización cruzada entre las ciencias y las humanidades fomentada por NU-ACCESS en el campus y más allá;
- 8) colaboraciones internacionales de investigación.

En general, la experiencia descrita aquí confirma que llevar la ciencia de la Universidad al museo de arte crea efectivamente una red de ecosistemas interconectados donde los logros finales son invariablemente mucho más que la suma de sus partes.

Conclusiones

El estudio científico del patrimonio cultural, en su sentido más amplio, permite una mejor comprensión y protección de las diversas identidades humanas mediante la comprensión y la preservación de la cultura material del mundo. Este estudio requiere el uso de técnicas establecidas y métodos novedosos para el análisis no invasivo o mínimamente invasivo en múltiples escalas de longitud, trabajando con objetos que son insustituibles, heterogéneos y, a menudo, de múltiples capas. Por lo tanto, los científicos del patrimonio siempre deben traspasar los límites de sus campos para desarrollar nuevos métodos de diagnóstico, por ejemplo, nuevos enfoques

Only major research universities, together with the larger, research-oriented cultural heritage institutions and networks, have the capacity to meet these research-intensive requirements, with access to both the staff resources and laboratories needed to advance this level of heritage science research. Thus, well-resourced research universities have a responsibility to contribute to scientific research on cultural heritage. Unburdened by the demands of exhibitions, treatment, and collection cataloguing schedules that are typical of museums' operations, research universities are well poised to be the catalysts of technological innovation, with the potential to transform the field. On the other hand, academic research should avoid the risk of extricating the interests of fundamental scientific research from the actual needs of art and archaeological artifacts by working in isolation. The inherently cross-disciplinary nature of the research questions posed by historical and artistic artifacts requires extensive collaboration among scientists, conservators, art historians, and other heritage professionals. Productive partnerships between museums and university scientists must be established and this vision is at the core of NU-ACCESS. Forging research alliances with other museums and institutions not only provides a service to the field of heritage science and art history, but also firmly grounds the scientific research carried out by NU-ACCESS in the real needs of collection objects. In other words, cultural heritage collections are an essential element for inspiration and the main scientific driver for the Center's research.

Since its establishment in 2012, the Center has been committed to making scientific analyses of the world's shared cultural patrimony accessible to a diverse array of cultural heritage institutions, individual scholars, and students. By taking a deep dive into understanding objects presented to the Center, detailed case studies have been produced

de imágenes no invasivas y nuevos procedimientos de muestreo para las técnicas existentes tanto de análisis científico como de imágenes.

Solo las principales universidades de investigación, junto con las instituciones y redes de patrimonio cultural más grandes y orientadas a la investigación, tienen la capacidad para cumplir con estos requisitos de investigación intensiva, con acceso tanto a los recursos de personal como a los laboratorios necesarios para avanzar en este nivel de investigación en ciencias del patrimonio. Por lo tanto, las universidades de investigación que cuentan con recursos suficientes tienen la responsabilidad de contribuir a la investigación científica sobre el patrimonio cultural. Liberadas de las exigencias de las exposiciones, el tratamiento y los programas de catalogación de colecciones que son típicas de las operaciones de los museos, las universidades de investigación están bien preparadas para ser los catalizadores de la innovación tecnológica, con el potencial de transformar la disciplina. Por otro lado, la investigación académica debe evitar el riesgo de desvincular los intereses de la investigación científica fundamental de las necesidades reales del arte y los objetos arqueológicos trabajando de forma aislada. La naturaleza inherentemente interdisciplinar de las preguntas de investigación planteadas por los objetos históricos y artísticos requiere una amplia colaboración entre científicos, conservadores, historiadores del arte y otros profesionales del patrimonio. Se deben establecer asociaciones productivas entre museos y científicos universitarios y esta visión es el núcleo de NU-ACCESS. Forjar alianzas de investigación con otros museos e instituciones no solo proporciona un servicio al campo de la ciencia del patrimonio y la historia del arte, sino que también fundamenta firmemente la investigación científica realizada por NU-ACCESS en las necesidades reales de los objetos de colección. En otras palabras, las colecciones del patrimonio cultural son un elemento esencial de inspiración y el principal motor científico de la investigación del Centro.

that form an invaluable resource for many institutions and individuals beyond NU-ACCESS' immediate network. As the Center has matured within the McCormick School of Engineering at Northwestern University, it has naturally extended the original mandate to expose engineering students to concrete ways that the humanities can help make them better scientists and drive technology to the next level. Likewise, humanities students have sharpened their intellectual skills by learning new scientific approaches toward understanding material culture through the Center. In the nearly ten years of the Center's existence, pipelines have been established to bring science to the cultural heritage world while creating a unique internal environment at Northwestern University for students to explore the humanities through a scientific lens, and at the same time stimulating innovation in data science applied to cultural heritage and the development of new analytical techniques.

Having reached a stage of maturity, the Center is poised to establish itself as a space where new questions can be asked about art through the lens of materials studies, while innovative approaches to materials science and engineering have been fostered through the critical method of art-historical analysis. Only in this way the power of collaboration can be fully harnessed to enable new discoveries that would otherwise be impossible within a single disciplinary domain. A new pedagogy for interdisciplinary training in art and science, as well as recent transformational advances in imaging and data science hold promise for achieving cross-field collaborations that are successful, sustained and generative.

The study of art and archaeological materiality is a global pursuit that requires integration of a diversity of expertise. However, though the field is an exemplar of gender inclusivity in the sciences, it has

Desde su creación en 2012, el Centro se ha comprometido a hacer que el análisis científico del patrimonio cultural que compartimos a nivel mundial sea accesible a un amplio abanico de instituciones de patrimonio cultural, así como a académicos y estudiantes. Al profundizar en la comprensión de los objetos presentados al Centro, se han producido casos de estudio detallados que forman un recurso valiosísimo para muchas instituciones e individuos más allá de la red inmediata de NU-ACCESS. A medida que el Centro ha madurado dentro de la McCormick School of Engineering en Northwestern University, naturalmente ha extendido el mandato original de exponer a los estudiantes de ingeniería a formas concretas en las que las humanidades pueden ayudarles a convertirse en mejores científicos e impulsar la tecnología al siguiente nivel. Así mismo, los estudiantes de humanidades han agudizado sus habilidades intelectuales al aprender nuevos enfoques científicos para comprender la cultura material a través del Centro. En los casi diez años de existencia del Centro, se han establecido canales para llevar la ciencia al mundo del patrimonio cultural mientras se crea un entorno interno único en la Northwestern University para que los estudiantes exploren las humanidades a través de una lente científica y, al mismo tiempo, se estimula la innovación en ciencia de datos aplicada al patrimonio cultural y el desarrollo de nuevas técnicas analíticas.

Habiendo alcanzado una etapa de madurez, el Centro está listo para establecerse como un espacio donde se pueden plantear nuevas preguntas sobre el arte a través de la lente de los estudios de materiales, mientras que los enfoques innovadores de la ciencia y la ingeniería de materiales se han fomentado a través del método crítico del análisis histórico artístico. Solo de esta manera se puede aprovechar completamente el poder de la colaboración para permitir nuevos descubrimientos que de otro modo serían imposibles dentro de un solo dominio disciplinario. Esta nueva pedagogía para la formación interdisciplinar en el arte y la ciencia, así como los recientes avances transformadores en ciencias

remained predominantly white. Through inquiry of artifacts from indigenous groups or from lesser studied places across the globe, the Center could become a portal for engagement of underrepresented communities with both science and the humanities (Barajas-López & Bang, 2018). The wide variety of research projects, collaboration with experts from academia and cultural institutions, and exposure to a diverse range of objects makes NU-ACCESS a remarkable training ground for students and young researchers from all backgrounds, providing ladders to conservation careers through fellowships, internships, and other training opportunities: past interns, postdoctoral fellows and research associates have moved on to positions in museums, national research labs and academia in the United States and abroad.

The success in partnering with the larger cultural heritage community to conduct scientific research in the arts is best expressed by the number of other collaborations sharing similar goals and ambitions that have emerged elsewhere since the Center's founding. In the United States these include, most notably, the Network Initiative for Conservation Science at the Metropolitan Museum of Art (NICS), the Pacific Northwest Consortium for the Science of Cultural Heritage Conservation and the Baltimore-based consortium offering opportunities for scientific research associated with art conservation for diverse cohorts of undergraduate students (SCIART fellowship initiative). These field-changing initiatives are filling the gap between museums' need for scientific analysis and the capacity of conservation scientists to meet demands. Among the University-based centers in the US, the Straus Center for Conservation and Technical Studies at the Harvard Art Museums, the Institute for the Preservation of Cultural Heritage (IPCH) at Yale, the Archaeomaterials group at the University of California, Los Angeles (UCLA), and

de la imagen y los datos son prometedores para lograr colaboraciones exitosas, sostenidas y generadoras de sinergias entre áreas.

El estudio del arte y la materialidad arqueológica es una búsqueda global que requiere la integración de una diversidad de conocimientos. Sin embargo, aunque el área es un ejemplo de inclusión de género en las ciencias, se ha mantenido predominantemente blanca. A través de la investigación de objetos de grupos indígenas o de lugares menos estudiados en todo el mundo, el Centro podría convertirse en un portal para la participación de comunidades subrepresentadas tanto con la ciencia como con las humanidades (Barajas-López & Bang, 2018). La amplia variedad de proyectos de investigación, la colaboración con expertos del mundo académico y las instituciones culturales y la exposición a una amplia gama de objetos hacen de NU-ACCESS un campo de entrenamiento extraordinario para estudiantes e investigadores jóvenes de todos los orígenes, que proporciona una escalera a las carreras de conservación a través de becas y pasantías y otras oportunidades de capacitación: pasantes, becarios postdoctorales y asociados de investigación han alcanzado puestos en museos, laboratorios de investigación nacionales y academias en los Estados Unidos y en el extranjero.

El éxito de la asociación con la comunidad del patrimonio cultural en general para realizar investigaciones científicas en las artes se expresa mejor en el número de otras colaboraciones que comparten objetivos y ambiciones similares que han surgido en otros lugares desde la fundación del Centro. En los Estados Unidos, estos incluyen, en particular, la Iniciativa del Network Initiative for Conservation Science at the Metropolitan Museum of Art (NICS), el Pacific Northwest Consortium for the Science of Cultural Heritage Conservation y el consorcio con sede en Baltimore que ofrece oportunidades para la investigación científica asociada a la conservación del arte para diversos grupos de estudiantes de grado (iniciativa de becas SCIART). Estas iniciativas

the Laboratory for Multiscale Characterization and Materials Design at the Massachusetts Institute of Technology (MIT) are valued peers of NU-ACCESS. Hopefully in the future these centers of excellence will become networked in a national super-structure that will energize, innovate, and sustain the field, and be able to interface with similar European networks for heritage science.

Ultimately, it is the Center's belief that the impact of heterogeneous research methodologies for art diagnosis must be leveraged to open new paths of inquiry, engage students in new endeavors in the humanities, catalyze innovation in the sciences and demonstrate the value of the humanities and science to society through media stories that share research results in a positive and uplifting way.

Acknowledgements

Frank Zuccari, Katherine Faber, Angelica Rudenstine, and Alison Gilchrest were instrumental and visionary in their support of NU-ACCESS since its very beginning.

The Center has grown and thrives because of the energy, dedication and intelligence of Monica Ganio, Alicia McGeachy, Annette Ortiz Miranda, Lindsey Oakley, Gianluca Pastorelli, Emeline Pouyet, Johanna Salvant, Marc Vermeulen and all other previous and current postdocs and research associates, who are thanked for their contributions to the Center's research projects and initiatives.

We are grateful to all our partners in our research projects, at Northwestern University, at the Art Institute of Chicago and at all the institutions visited. In particular, we thank Ludovic Bellot-Gurlet and Virginie Perdrisot for their collaboration on the Picasso's sculpture work; Gloria Groom, Caitlin Haskell, Kim Muir and Robert Lifson for the Cézanne work; and Danielle Duggins, Prof. Maurice

de cambio de área están subsanando la brecha entre la necesidad de análisis científico de los museos y la capacidad de los científicos de la conservación para satisfacer las demandas. Entre los centros universitarios de EEUU, el Straus Center for Conservation and Technical Studies del Harvard Art Museums, el Institute for the Preservation of Cultural Heritage (IPCH) de Yale, el grupo de Arqueomateriales de la University of California, Los Ángeles (UCLA) y el Laboratory for Multiscale Characterization and Materials Design de Massachusetts (MIT) son aliados valiosos de NU-ACCESS. Es de esperar que en el futuro estos centros de excelencia se conecten en red en una superestructura nacional que dinamice, innove y sostenga el área, y sea capaz de interactuar con redes europeas similares para la ciencia del patrimonio.

En última instancia, el Centro cree que el impacto de metodologías de investigación heterogéneas para el diagnóstico del arte debe aprovecharse para abrir nuevos caminos de investigación, involucrar a los estudiantes en nuevos caminos en las humanidades, catalizar la innovación en las ciencias y demostrar el valor de las humanidades y la ciencia a la sociedad a través de historias en los medios que comparten los resultados de la investigación de una manera positiva y edificante.

Agradecimientos

Frank Zuccari, Katherine Faber, Angelica Rudenstine y Alison Gilchrest fueron fundamentales y visionarios en su apoyo a NU-ACCESS desde sus inicios.

El Centro ha crecido y prospera gracias a la energía, la dedicación y la inteligencia de Monica Ganio, Alicia McGeachy, Annette Ortiz Miranda, Lindsey Oakley, Gianluca Pastorelli, Emeline Pouyet, Johanna Salvant, Marc Vermeulen y todos los demás posdoctorados e investigadores asociados anteriores y actuales, a quienes se agradece su contribución a los proyectos e iniciativas de investigación del Centro.

Aalders and the staff at the Van Gogh museum for their work on the Van Gogh project. We are grateful to Ken Sutherland for his contributions to the Center throughout the years and for his critical revision of this manuscript.

Funding from The Andrew W. Mellon Foundation, the National Science Foundation, the National Endowment for the Humanities, and the Lounsbery Foundation is gratefully acknowledged.

Agradecemos a todos nuestros socios en nuestros proyectos de investigación, en la Northwestern University, en el Art Institute of Chicago y en todas las instituciones visitadas. En particular, agradecemos a Ludovic Bellot-Gurlet y Virginie Perdrisot por su colaboración en la obra escultórica de Picasso; Gloria Groom, Caitlin Haskell, Kim Muir y Robert Lifson por la obra de Cézanne; y Danielle Duggins, el profesor Maurice Aalders y el personal del museo Van Gogh por su trabajo en el proyecto Van Gogh. Agradecemos a Ken Sutherland por sus contribuciones al Centro a lo largo de los años y por su revisión crítica de este manuscrito.

Se agradece la financiación de la Fundación Andrew W. Mellon, la Fundación Nacional de Ciencias, la Fundación Nacional para las Humanidades y la Fundación Lounsbery.

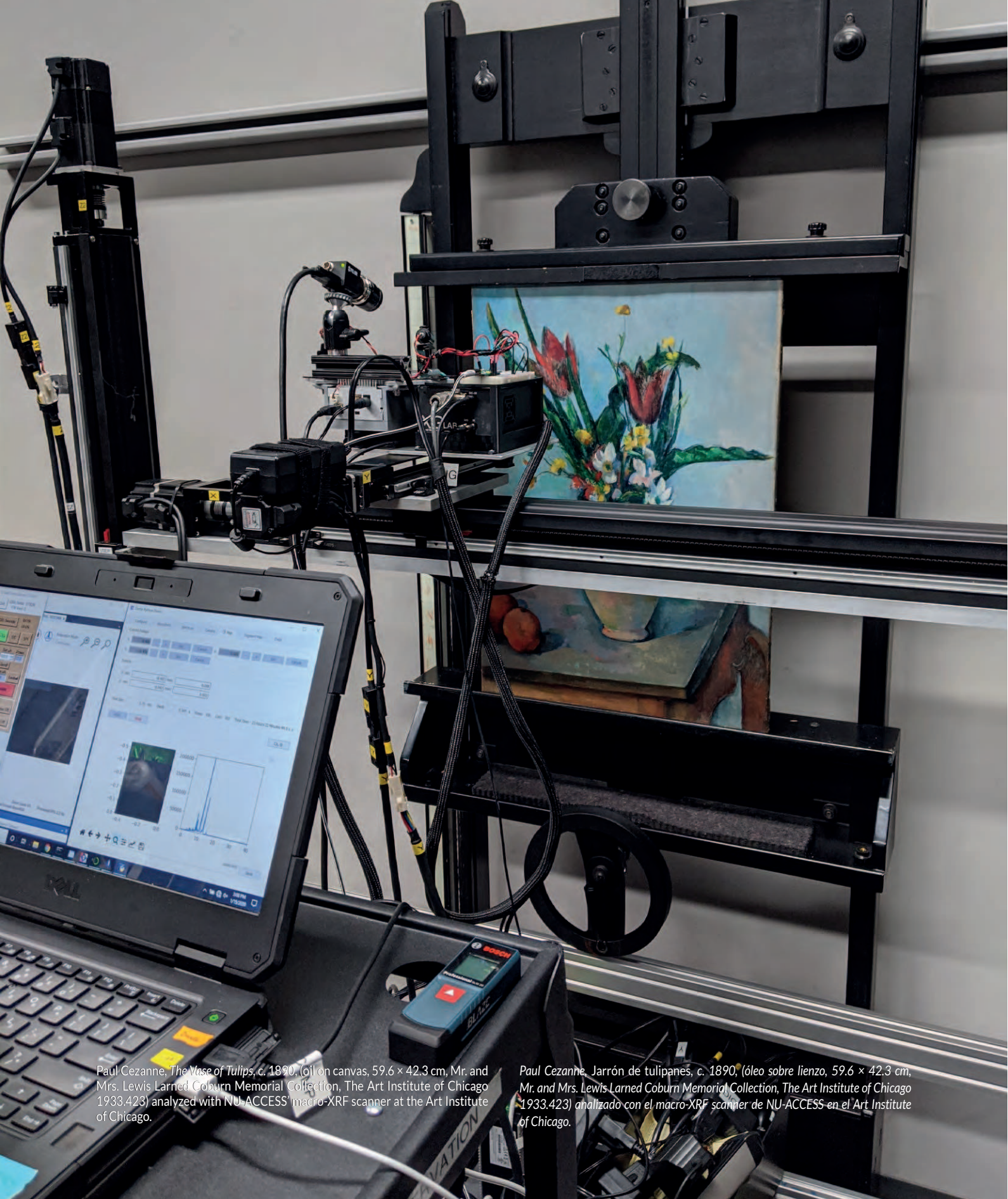
References | Bibliografía

- Aceto, M., Agostino, A., Fenoglio, G., Idone, A., Gulmini, M., Picollo, M., Ricciardi, P., & Delaney, J.K. (2014). Characterisation of Colourants on Illuminated Manuscripts by Portable Fibre Optic UV-Visible-NIR Reflectance Spectrophotometry. *Analytical Methods*, 6(5), 1488–1500. <https://doi.org/10.1039/c3ay41904e>
- Aldrovandi, A., Buzzegoli, E., Keller, A., & Kunzelman, D. (2005). Investigation of Painted Surfaces with a Reflected UV False Color Technique. *Proceedings of the 8th International Conference on Non-destructive investigations and microanalysis for the diagnostics and conservation of the cultural and environmental heritage*, May 15-19 2005, Lecce, Italy.
- Bacci, M., & Picollo, M. (1996). Non-Destructive Spectroscopic Detection of Cobalt (II) in Paintings and Glass. *Studies in Conservation*, 41(3), 136–44. <https://doi.org/10.1179/sic.1996.41.3.136>
- Barajas-López, F., & Bang, M. (2018). Indigenous Making and Sharing: Claywork in an Indigenous STEAM Program. *Equity & Excellence in Education*, 51(1), 7–20. <https://doi.org/10.1080/10665684.2018.1437847>
- Bewer, F.G. (2010). *A Laboratory for Art: Harvard's Fogg Museum and the Emergence of Conservation in America, 1900-1950*. Harvard Art Museum; Yale University Press.

- Brosseau, C.L., Gambardella, A., Casadio, F., Grzywacz, C.M., Wouters, J., & Van Duyne, R.P. (2009). Ad-Hoc Surface-Enhanced Raman Spectroscopy Methodologies for the Detection of Artist Dyestuffs: Thin Layer Chromatography-Surface Enhanced Raman Spectroscopy and in Situ on the Fiber Analysis. *Analytical Chemistry*, 81(8), 3056–3062. <https://doi.org/10.1021/ac802761v>
- Brummel, K., & Frank, S. B. (2021). *Picasso. Painting the blue period*. New York: DelMonico Books.
- Cardinali, M., De Ruggieri, M. B., & Falcucci, C. (2002). *Diagnostica artistica: tracce materiali per la storia dell'arte e per la conservazione*. Palombi.
- Casadio, F., Leona, M., Lombardi, J.R., & Van Duyne, R. (2010). Identification of Organic Colorants in Fibers, Paints, and Glazes by Surface Enhanced Raman Spectroscopy. *Accounts of Chemical Research*, 43(6), 782–791. <https://doi.org/10.1021/ar100019q>
- Casadio, F., Miliani, C., Rosi, F., Romani, A., Anselmi, C., Brunetti, B., Sgamellotti, A., Andral, J-L., & Gautier, G. (2013). Scientific Investigation of an Important Corpus of Picasso Paintings in Antibes: New Insights into Technique, Condition, and Chronological Sequence. *Journal of the American Institute for Conservation*, 52(3), 184–204. <https://doi.org/10.1179/1945233013Y.0000000013>
- Dahm, K., Casadio, F., & Andral, J-L. (2022). Picasso's Faun Musician: Revealing the Making, Contextualizing the Meaning. *Burlington Magazine*, In Press.
- Dai, Q., Pouyet, E., Cossairt, O., Walton, M., Casadio, F., & Katsaggelos, A. (2016). X-Ray Fluorescence Image Super-Resolution Using Dictionary Learning. *Proceedings of the IEEE 12th Image, Video, and Multidimensional Signal Processing Workshop (IVMSP)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/IVMSPW.2016.7528182>
- Delaney, J.K., Conover, D.M., Dooley, K.A., Glinsman, L., Janssens, K., & Loew, M. (2018). Integrated X-Ray Fluorescence and Diffuse Visible-to-near-Infrared Reflectance Scanner for Standoff Elemental and Molecular Spectroscopic Imaging of Paints and Works on Paper. *Heritage Science*, 6(1), 31. <https://doi.org/10.1186/s40494-018-0197-y>
- Finn, Clare. (2020). Picasso and the Foundry of Emile Robecchi during the Second World War. *The Burlington Magazine*, 162(1406), 420–431.
- Ganio, M., Leonard, A., Salvant Plisson, J., & Walton, M. (2014). From Sculptures to Foundries: Elemental Analysis to Determine the Provenance of Modern Bronzes. In *Métal à ciel ouvert: la sculpture métallique d'extérieur du XIXe au début du XXe siècle: identification, conservation, restauratio = Open air metal: outdoor metallic sculpture from the XIXth to the early XXth century: identification, conservation, restoration* (pp.136-145). Champs-sur-Marne: SFIIC.
- Granzotto, C., & Sutherland, K. (2017). Matrix Assisted Laser Desorption Ionization Mass Fingerprinting for Identification of Acacia Gum in Microsamples from Works of Art. *Analytical Chemistry*, 89(5), 3059–3068. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.6b04797>
- Heginbotham, A., & Solé, V. A. (2017). CHARMed PyMca, Part I: A Protocol for Improved Inter-Laboratory Reproducibility in the Quantitative ED-XRF Analysis of Copper Alloys. *Archaeometry*, 59(4), 714–730. <https://doi.org/10.1111/arc.12282>
- Heginbotham, A., Bourgarit, D., Day, J., Dorscheid, J., Godla, J., Lee, L., Pappot, A., & Robcis, D. (2019). CHARMed PyMca, Part II: An Evaluation of Interlaboratory Reproducibility for ED-XRF Analysis of Copper Alloys. *Archaeometry*, 61(6), 1333–1352. <https://doi.org/10.1111/arc.12488>
- Hours, M. (1976). *Conservation and Scientific Analysis of Painting*. Van Nostrand Reinhold Co.
- Hours, M., & Giraudy, D. (1982). *L'oeuvre de Picasso à Antibes: A travers Picasso: [exposition, Antibes, Château Grimaldi, 1981]*. Antibes: Musée Picasso.
- Karmel, P. (2016). “Colorier” la sculpture. In *Picasso. Sculptures* (pp. 244-247). Somogy éditions d'art.

- Kurouski, D., Zaleski, S., Casadio, F., Van Duyne, R.P., & Shah, N.C. (2014). Tip-Enhanced Raman Spectroscopy (TERS) for *in situ* Identification of Indigo and Iron Gall Ink on Paper. *Journal of the American Chemical Society*, 136(24), 8677–8684. <https://doi.org/10.1021/ja5027612>
- Lebon, E. (2014). *Dictionnaire des fondeurs de bronze d'art, France 1890-1950 = Dictionary of art bronze founders, France 1890-1950*. Marjon éditions.
- Lobis, V.S., Owen, A., Casadio, F., Vokt Ziemba, E., & Art Institute of Chicago. (2019). *Rubens, Rembrandt, and Drawing in the Golden Age*. Art Institute of Chicago.
- Madsen, A.K., Broadway, M., Ormond, R & Art Institute of Chicago. (2018). *John Singer Sargent & Chicago's Gilded Age*. Yale University Press.
- McCawley, J.C., & Stone, T.G. (1983). A Mobile Conservation Laboratory Service. *Studies in Conservation*, 28(3), 97–106. <https://doi.org/10.1179/sic.1983.28.3.97>
- Miliani, C., Rosi, F., Brunetti, B.G., & Sgamellotti, A. (2010). In Situ Noninvasive Study of Artworks: The MOLAB Multitechnique Approach. *Accounts of Chemical Research*, 43(6), 728–738. <https://doi.org/10.1021/ar100010t>
- Oakley, L., Zaleski, S., Males, B., Cossairt, O., & Walton, M. (2020). Improved Spectral Imaging Microscopy for Cultural Heritage through Oblique Illumination. *Heritage Science*, 8(1), 27. <https://doi.org/10.1186/s40494-020-00369-0>
- Ortiz Miranda, A.S., Kronkright, D., & Walton, M. (2020). The Influence of Commercial Primed Canvases in the Manifestation of Metal Soaps Protrusions in Georgia O'Keeffe's Oil Paintings. *Heritage Science*, 8(1), 107. <https://doi.org/10.1186/s40494-020-00451-7>
- Pouyet, E., Devine, S., Grafakos, T., Kieckhefer, R., Salvant, J., Smieska, L., Woll, A., Katsaggelos, A., Cossairt, O., & Walton, M. (2017). Revealing the Biography of a Hidden Medieval Manuscript Using Synchrotron and Conventional Imaging Techniques. *Analytica Chimica Acta*, 982, 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2017.06.016>
- Pouyet, E., Rohani, N., Katsaggelos, A.K., Cossairt, O., & Walton, M. (2018). Innovative Data Reduction and Visualization Strategy for Hyperspectral Imaging Datasets Using T-SNE Approach. *Pure and Applied Chemistry*, 90(3), 493–506. <https://doi.org/10.1515/pac-2017-0907>
- Pouyet, E., Ganio, M., Motlani, A., Saboo, A., Casadio, F., & Walton, M. (2019). Casting Light on 20th-Century Parisian Artistic Bronze: Insights from Compositional Studies of Sculptures Using Hand-Held X-Ray Fluorescence Spectroscopy. *Heritage*, 2(1), 732–748. <https://doi.org/10.3390/heritage2010047>
- Pouyet, E., Barbi, N., Chopp, H., Healy, O., Katsaggelos, A., Moak, S., Mott, R., Vermeulen, M., & Walton, M. (2020a). Development of a Highly Mobile and Versatile Large MA-XRF Scanner for *in Situ* Analyses of Painted Work of Arts. *X-Ray Spectrometry*, 50(4), 263–271. <https://doi.org/10.1002/xrs.3173>
- Pouyet, E., Brummel, K., Webster-Cook, S., Delaney, J., Dejoie, C., Pastorelli, G., & Walton, M. (2020b). New Insights into Pablo Picasso's *La Miséreuse Accroupie* (Barcelona, 1902) Using X-Ray Fluorescence Imaging and Reflectance Spectroscopies Combined with Micro-Analyses of Samples. *SN Applied Sciences*, 2(8), 1408. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3130-4>
- Riederer, J. (1976). The Rathgen Research Laboratory at Berlin. *Studies in Conservation*, 21(2), 67–73. <https://doi.org/10.1179/sic.1976.012>
- Rohani, N., Pouyet, E., Walton, M., Cossairt, O., & Katsaggelos, A.K. (2018). Nonlinear Unmixing of Hyperspectral Datasets for the Study of Painted Works of Art. *Angewandte Chemie*, 130(34), 11076–11080. <https://doi.org/10.1002/ange.201805135>
- Rönkkö, E. (2019). *Portrait of a Child: Historical and Scientific Studies of a Roman Egyptian Mummy*. Northwestern University, Mary & Leigh Block Gallery.

- Salvant, J., Sutherland, K., Barten, J., Stringari, C., Casadio, F., & Walton, M. (2016). Two László Moholy-Nagy Paintings on Trolit: Insights into the Condition of an Early Cellulose Nitrate Plastic. *E-Preservation Science*, 13, 15–22.
- Salvant, J., Barten, J., Casadio, F., Kokkori, M., Pozzi, F., Stringari, C., Sutherland, K., & Walton, M. (2017). Laszlo Moholy-Nagy's Painting Materials: From Substance to Light. *Leonardo*, 50(3), 316–320. https://doi.org/10.1162/LEON_a_01430
- Salvant, J., Williams, J., Ganio, M., Casadio, F., Daher, C., Sutherland, K., Monico, L., Vanmeert, F., De Meyer, S., Janssens, K., Cartwright, C., & Walton, M. (2018). A Roman Egyptian Painting Workshop: Technical Investigation of the Portraits from Tebtunis, Egypt. *Archaeometry*, 60(4), 815–833. <https://doi.org/10.1111/arc.12351>
- Salvant, J., Walton, M., Kronkright, D., Yeh, C.K., Cossairt, O., Li, F., & Katsaggelos, A.K. (2019). Photometric Stereo by UV-Induced Fluorescence to Detect Protrusions on Georgia O'Keefe's Paintings. In F. Casadio, K. Keune, P. Noble, A. Van Loon, E. Hendriks, S. A. Centeno, & G. Osmond (Eds.), *Metal soaps in art: conservation and research* (pp. 375–391). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90617-1_22
- Shugar, A.N., & Mass, J.L. (2013). *Handheld XRF for Art and Archaeology*. Leuven University Press. <https://doi.org/10.11116/9789461660695>
- Smith, P.H. (2016). Historians in the Laboratory: Reconstruction of Renaissance Art and Technology in the Making and Knowing Project. *Art History*, 39(2), 210–233. <https://doi.org/10.1111/1467-8365.12235>
- Snow, C.P. (1963). *The Two Cultures and the Scientific Revolution*. Cambridge University Press.
- Sochacka, N.W., Guyotte, K.W., & Walther, J. (2016). Learning Together: A Collaborative Autoethnographic Exploration of STEAM (STEM + the Arts) Education. *Journal of Engineering Education*, 105(1), 15–42. <https://doi.org/10.1002/jee.20112>
- Thomson, G., Mills, J., & Plesters, J. (1977). The Scientific Department of the National Gallery. *National Gallery Technical Bulletin*, 1, 18–28.
- Vermeulen, M., Smith, K., Eremin, K., Rayner, G., & Walton, M. (2021). Application of Uniform Manifold Approximation and Projection, Density Cluster Mapping, and Non-Negative Least Square Fitting for Data Reduction and Visualization of Hyperspectral Imaging in the Field of Cultural Heritage. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 252, 119547. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.119547>
- Verri, G., & Saunders, D. (2014). Xenon Flash for Reflectance and Luminescence (Multispectral) Imaging in Cultural Heritage Applications. *The British Museum Technical Bulletin*, 8, 83–92.
- Willomitzer, F., Yeh, C.-K., Gupta, V., Spies, W., Schiffers, F., Katsaggelos, A., Walton, M., & Cossairt, O. (2020). Hand-Guided Qualitative Deflectometry with a Mobile Device. *Optics Express*, 28(7), 9027–9038. <https://doi.org/10.1364/OE.383475>
- Xu, B., He, K., Hao, P., Gao, J., Willomitzer, F., Katsaggelos, A.K., Tumblin, J.E., Cossairt, O., & Walton, M.S. (2019). Time-Domain Optical Coherence Tomography Can Measure Artworks with High Penetration and High Resolution. In *Optics for Arts, Architecture, and Archaeology* (VII. Vol. 11058). International Society for Optics and Photonics. <https://doi.org/10.1117/12.2525649>
- Yeh, C., Matsuda, N., Huang, X., Li, F., Walton, M., & Cossairt, O. (2016). A Streamlined Photometric Stereo Framework for Cultural Heritage. In *Computer Vision – ECCV 2016 Workshops* (pp. 738–752). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46604-0_51
- Yeh, C., Li, F., Pastorelli, G., Walton, M., Katsaggelos, A.K., & Cossairt, O. (2017). Shape-from-Shifting: Uncalibrated Photometric Stereo with a Mobile Device. In *2017 IEEE 13th International Conference on e-Science, Auckland, New Zealand*, 551–558. <https://doi.org/10.1109/eScience.2017.89>
- Young, M.L., Schnepf, S., Casadio, F., Lins, A., Meighan, M., Lambert, J.B., & Dunand, D.C. (2009). Matisse to Picasso: A Compositional Study of Modern Bronze Sculptures. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 395(1), 171–184. <https://doi.org/10.1007/s00216-009-2938-y>



Paul Cezanne, *The Vase of Tulips*, c. 1890, (oil on canvas, 59.6 × 42.3 cm, Mr. and Mrs. Lewis Larned Coburn Memorial Collection, The Art Institute of Chicago 1933.423) analyzed with NU-ACCESS' macro-XRF scanner at the Art Institute of Chicago.

Paul Cezanne, *Jarrón de tulipanes*, c. 1890, (óleo sobre lienzo, 59.6 × 42.3 cm, Mr. and Mrs. Lewis Larned Coburn Memorial Collection, The Art Institute of Chicago 1933.423) analizado con el macro-XRF scanner de NU-ACCESS en el Art Institute of Chicago.