

La nanotecnología, la arquitectura y el arte

Adriana Lira Oliver¹ y Alicia Oliver²

RESUMEN: La nanotecnología ha recibido en las últimas tres décadas mucha atención. Mediáticamente se han generado numerosas expectativas con pocas probabilidades de ser cumplidas, sin embargo, en la actualidad existen aplicaciones importantes en muchas áreas tecnológicas. Desafortunadamente el mundo nano como tal no ha encontrado un nicho en la construcción de edificaciones con productos comerciales, no obstante, las nanopartículas metálicas, por tener propiedades ópticas muy diferentes a las del metal en grandes volúmenes, han deleitado a la gente desde la antigüedad. Conociendo el origen de estas propiedades ópticas y haciendo uso de la tecnología actual, se pueden manipular dichas nanopartículas para construir paletas de colores que, en dispositivos micrométricos permiten hacer fotoimpresión con muy buena resolución.

PALABRAS CLAVE: Nanopartículas metálicas, plasmónica, fotoimpresión.

ABSTRACT: Nanotechnology has received much attention during the last three decades. Through media, many expectations have been generated around nanotechnology. Although several of these expectations are unlikely to be accomplished, some have important contemporary technological applications. Unfortunately, the nano world as it is now, has not yet found a niche of opportunity in the building construction industry. However, metallic nanoparticles have been used since ancient times due to their optical properties that greatly differ from those proper of metals with big volumes. By knowing the origin of these optical properties and by using contemporary technology, today we can manipulate these metallic nanoparticles to construct color pallets that allow high resolution photo printing using micrometric devices.

KEYWORDS: Metallic nanoparticles, plasmonics, photoprinting.

Introducción

En la última década la palabra *nanotecnología* ha aparecido escrita y hablada en innumerables ocasiones, para referirse a grandes inventos que cambiarán nuestras vidas. Desafortunadamente, en algunos casos, vivimos un fenómeno meramente de distorsión de comunicación principalmente por los medios masivos de comunicación. Esta trivialización de la palabra nanotecnología se

Recibido: 23 de septiembre de 2016. Aceptado: 29 de octubre de 2016.

¹ Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, Av. Universidad 3000, Delegación Coyoacán. C.P. 04510, Ciudad de México. Página electrónica: <<http://arquitectura.unam.mx>>. Correspondencia: (adrianalira@post.harvard.edu).

² Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, Av. Universidad 3000, Delegación Coyoacán. C.P. 04510 Ciudad de México.

debe, creemos, a dos factores fundamentales: por un lado a los científicos, que ante un hallazgo importante después de duros trabajos, la emoción los embarga al darlo a conocer y ponderan, a veces, con altas expectativas las aplicaciones futuras, y, por otro lado, los medios de comunicación exageran, con miras de la nota periodística sobre el tema. Así, los nuevos descubrimientos que la ciencia va concretando, al transmitirse al resto de la población, el significado para la vida de las sociedades se distorsiona, creando grandes expectativas muchas veces difíciles de concretar. Así fue como al demostrarse la gran potencialidad de la energía nuclear al terminar la segunda guerra mundial, mucho se dijo que esta nueva fuente de energía resolvería en esta materia los problemas de la humanidad. Cosa que no ha sucedido. En los años 80's, al descubrirse los superconductores de alta temperatura, es decir, materiales que presentan superconductividad arriba de la temperatura del He líquido, por encima de los -269°C , se dijo también que en gran medida se resolvería el problema de la energía: tendríamos conductores en nuestra vida cotidiana donde la corriente eléctrica se mantendría indefinidamente. Lo cual tampoco ha sucedido. Sin embargo, no se puede negar que la energía nuclear, aparte de sus usos negativos, ha sido beneficiosa en nuestras vidas en muchos aspectos. Por otro lado, la superconductividad a temperaturas más accesibles, como la temperatura del nitrógeno líquido de -196°C , ha abierto nuevos campos de investigación. Lo mismo está sucediendo con la nanotecnología. Es indudable que la nanotecnología está aportando grandes beneficios a la biomedicina, la energía, el medio ambiente y la fotónica (que se pretende sustituya a la electrónica), entre otros.

Las nanopartículas metálicas, por presentar lo que se conoce como la resonancia del plasmón de superficie, que se describirá más adelante, producen campos eléctricos muy intensos cercanos a la nanopartícula, a distancias de nanómetros, lo que las ha convertido en sensores de alta sensibilidad y resolución en los sistemas biológicos y en la fotónica (Heydari *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2016).

Para entender un poco de lo que vamos a escribir con respecto a la arquitectura y el arte, primero debemos entender qué es la nanotecnología.

La nanotecnología

La nanotecnología surge de lo que en las nanociencias se va entendiendo sobre las estructuras nano. Desde el punto de vista dimensional, una estructura nano es un conglomerado de átomos o moléculas cuyas dimensiones pertenecen a la escala nomométrica ($1 \text{ nanómetro} = 10^{-9} \text{ m}$, mil veces menor a una micra). Una célula, que mide entre 5 y 50 micras, es del orden de decenas de miles de veces más grande que las estructuras nano a las que nos referimos. Ahora bien, siempre han existido y se han producido estructuras nano. Pero es hasta hace pocos años que estas estructuras se están entendiendo. Para las nanociencias, las estructuras nano que conforman la nanotecnología

son aquéllas cuyo elemento fundamental, ya sea un átomo o una celda básica cristalina, en conglomerados de dimensiones nano, presentan propiedades diferentes a las propiedades en grandes volúmenes a las que estamos acostumbrados en nuestra vida cotidiana. No todas las estructuras nano presentan propiedades diferentes a las que se tienen en grandes volúmenes y por lo tanto no se consideran dentro de la nanotecnología. Pero actualmente, sustancias en dimensiones nano, tengan o no propiedades diferentes a las que tienen cuando forman grandes volúmenes, se pretende que forman parte de productos nanotecnológicos. En el ámbito de la construcción y de la arquitectura son casi inexistentes los productos verdaderamente nanotecnológicos comercializados y que tengan uso masivo. En este artículo se describen materiales verdaderamente nanotecnológicos utilizados en la arquitectura y los que actualmente se están desarrollando para la fotoimpresión.

Las nanopartículas metálicas y la plasmónica

La plasmónica es una nueva rama de la ciencia y el término fue creado en el año 2000 por un grupo de científicos del Instituto de Tecnología de California en Estados Unidos (Atwater, 2007). La plasmónica se refiere al plasmón de superficie que genera luz al incidir sobre una partícula metálica. Sabemos que la luz es una onda electromagnética compuesta por campos eléctricos y magnéticos oscilantes. Cuando el campo eléctrico de la onda incide sobre la nanopartícula metálica, los electrones libres del metal que están en la superficie oscilan con el campo eléctrico de la onda y por ciertos mecanismos físicos esta nanopartícula absorbe una buena cantidad de luz. Existen ciertas longitudes de onda para las cuales esta absorción se da en forma privilegiada, y a este fenómeno se le llama la resonancia del plasmón de superficie. Este fenómeno sólo se da cuando la partícula metálica tiene dimensiones mucho menores a la longitud de onda de la luz incidente, desde algunos nanómetros hasta 100 nm, y por lo tanto no se da en grandes volúmenes del material (Kelly *et al.*, 2003). Esta particularidad le da a estas nanopartículas propiedades ópticas interesantes para la óptica no lineal (Torres-Torres *et al.*, 2008), la fotónica (Gramotnev *et al.*, 2010) y la biomedicina (Heydari *et al.*, 2016; Barsan *et al.*, 2016).

Pues bien, lo interesante de este fenómeno es que provoca que las nanopartículas metálicas absorban en la región ultravioleta y visible, y en casos especiales de nanopartículas mayores a 100 nm, en el infrarrojo del espectro electromagnético (Langhammer, 2006).

La luz y los colores

Como ya dijimos, la luz es una onda electromagnética y forma parte de lo que conocemos como el espectro electromagnético. El espectro electromagnético es muy amplio, comprende longitudes de onda que van desde los picómetros

hasta kilómetros. En este gran intervalo la luz ocupa lo que se llama la región del visible que es una pequeñísima región del espectro electromagnético. La luz visible blanca, al descomponerla por medio de un prisma presenta los colores del arco iris. Los colores se deben a que la luz visible está compuesta de ondas que tienen longitudes comprendidas entre los 380 y 780 nm y el ojo percibe estas longitudes de onda que en nuestro cerebro se detectan como colores. Sabemos que el color de los objetos se debe a las diferentes longitudes que absorben y otras que reflejan y son detectadas por el ojo. Por lo tanto, las nanopartículas de un metal de hasta 100 nm que absorben una banda del visible presentan coloraciones que el metal no tiene en grandes volúmenes.

El maravilloso mundo del color en las nanopartículas metálicas

En secciones anteriores se ha dicho que las nanopartículas metálicas absorben selectivamente en ciertas longitudes de onda del visible. Específicamente esta absorción se realiza en estructuras del orden de algunos nanómetros hasta los 100 nm. Las nanopartículas pueden, además, tener diferentes formas. Dependiendo del tamaño y forma de la nanopartícula, la resonancia del plasmón de superficie, es decir, cuando se lleva a cabo la mayor absorción de la luz que le llega, se puede desplazar y desdoblarse en el espectro y por lo tanto cambiar de color. Sabemos que si hay absorción en el azul, la coloración será en el amarillo. Es por esto que nanopartículas de plata, de forma esférica y con un diámetro del orden de 10 nm, embebidas en vidrio, tienen la resonancia del plasmón de superficie en los 380 nm, con una anchura que se extiende al azul. Esto es, la absorción se lleva a cabo en el violeta-azul y es por eso que estas nanopartículas presentan el color amarillo. Si cambian de tamaño y forma estas partículas, la resonancia del plasmón de superficie se puede correr a longitudes de onda mayores o menores, o bien desdoblarse, dependiendo del caso, dando diferentes coloraciones. Si hay un corrimiento hacia el verde, la coloración será roja. Otro ejemplo son las nanopartículas de oro. Estas nanopartículas, si son esféricas y de entre 4 y 20 nm, su resonancia del plasmón de superficie está en los 520 nm, y por lo tanto tiene una fuerte absorción en el verde lo cual hace que se vean rojas. Si aumentan de tamaño hasta unos 90 nm, presentan una coloración azul. Dependiendo de la forma y el tamaño, las nanopartículas pueden tener toda una gama de colores brillantes. La figura 1 muestra una serie de soluciones con nanopartículas metálicas de diferentes elementos de diferentes formas y tamaños. Cuando estas nanopartículas están embebidas en vidrio le dan a éste diferentes coloraciones según sea la nanopartícula de que se trate.

FIGURA 1. Nanopartículas metálicas en solución.



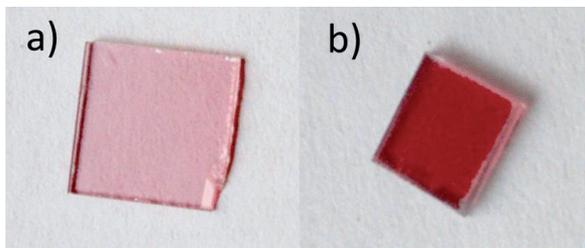
Fuente: José I. García Laureiro, ISQCH. Blog de divulgación del Instituto de Síntesis Química y Catálisis Homogénea. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y la Universidad de Zaragoza (UZ), España.

El diseño de los dispositivos nanoestructurados

La síntesis de nanopartículas metálicas se puede llevar a cabo por métodos químicos o físicos. La síntesis en soluciones acuosas por medios químicos es relativamente sencilla. Los colores son verdaderamente brillantes. Ya en 1875, Michael Faraday obtenía estas soluciones, y por primera vez dio una descripción científica de estos colores refiriéndose a partículas extremadamente pequeñas cuyas propiedades ópticas eran diferentes a los del metal en gran volumen. Un método físico es el de la implantación de iones. Por medio de un acelerador de partículas se introducen uno a uno los átomos del metal que se desee en un dieléctrico (Oliver *et al.*, 2002). El material resultante, posteriormente, se somete a tratamientos térmicos a temperaturas altas y en atmósferas especiales. En la figura 2 se muestran dos pedazos de sílice de alta pureza implantados con oro en diferentes cantidades. Estos materiales se obtuvieron en el Laboratorio del Acelerador Pelletron del Instituto de Física de la UNAM.

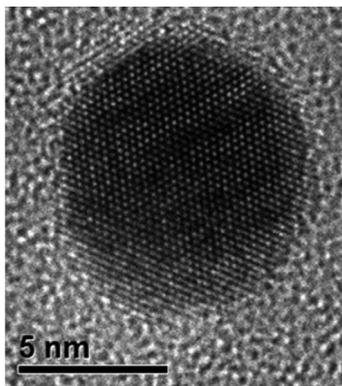
Aunque en el siglo XIX ya se pudieron sintetizar y explicar las propiedades de las nanopartículas metálicas, las nanociencias y la nanotecnología, con métodos de síntesis y de análisis totalmente reproducibles, son de

FIGURA 2. Sílice de alta pureza con nanopartículas de oro esféricas con diámetro promedio de 10 nm, a) con afluencia baja de iones de oro, y, b) con afluencia alta de iones de oro.



Fuente: Propia.

FIGURA 3. Micrografía de microscopía electrónica de transmisión de alta resolución de una nanopartícula de oro en sílice, nucleada por implantación de iones.



Fuente: Propia.

reciente creación. Esto se debe a los avances tanto de la ciencia como de la tecnología. Los métodos de síntesis de estos sistemas, tanto físicos como químicos han evolucionado mucho y hoy en día se diseña el tipo de partícula que se quiere fabricar. Si a esto se agrega que la instrumentación científica se desarrolló extraordinariamente en el siglo XX, dando lugar a instrumentos que permiten tener una serie de métodos de análisis para caracterizar materiales microscópicamente, los científicos tuvieron acceso al mundo nano. En el caso de las nanopartículas, el desarrollo de la microscopía electrónica de transmisión de ultra alta resolución ha sido definitiva. Esta técnica nos permite “ver” las nanopartículas y las posiciones de los átomos en ellas (figura 3). Por otro lado, la computación actual logra hacer cálculos verdaderamente complicados en computadoras de escritorio, lo que ha permitido modelar y predecir a qué formas corresponden qué resonancias de plasmón de superficie y por tanto sus propiedades ópticas particulares. Esto hace posible diseñar materiales con propiedades muy específicas.

Así pues, actualmente, tanto la ciencia como la tecnología permiten diseñar, manipular y en algunos casos, construir dispositivos para diferentes aplicaciones con estructuras nanométricas (Bornacelli *et al.*, 2016).

No hay nada nuevo bajo el Sol

Los vidrios y cuentas de vidrio de colores siempre han fascinado al hombre, y desde tiempos remotos aprendió a producir vidrios coloreados. Los primeros objetos de vidrio fabricados fueron cuentas coloreadas para collares. Ya para el año 1,200 aC, en Egipto se producía vidrio claro de color azul o verde. Seguramente fue también en Egipto donde se descubrió que al agregar ciertos óxidos metálicos al vidrio fundido se producían hermosas coloraciones. Sin embargo, los artífices del vidrio soplado fueron los fenicios. Durante la

FIGURA 4. Copa romana de Licurgo, Museo Británico. a) Iluminación del lado del observador, y b) Iluminación por detrás con respecto al observador.



Fuente: Figura (a) Johnbod (fotógrafo), y figura (b) Marie-Lan Nguyen (fotógrafa).

época del Imperio Romano la fabricación de artefactos de vidrio se extendió por todo el Imperio hasta Alemania.

Es claro que en la antigüedad los artesanos, al producir sus objetos de vidrio con ciertas coloraciones, estaban ya haciendo nanotecnología. Un ejemplo indiscutible es la hermosa copa romana de Licurgo. Esta copa, fabricada en el siglo IV dC, por mucho tiempo debió dejar perplejos a sus dueños por los efectos de la luz sobre la copa. Cuando se le ilumina del lado del observador muestra un color verde-jade (figura 4a), y el vidrio parece opaco, pero cuando se ilumina por detrás con respecto al observador se muestra traslúcida y de color rojo claro brillante (figura 4b). El secreto fue descubierto en 1990. Se analizaron al microscopio electrónico pequeños pedazos de la copa y resultó que el vidrio contenía una mezcla muy precisa de partículas de oro y plata menores a 50 nm. En esta copa se practicó una nanotecnología refinada.

Tal vez lo más conocido en arquitectura de esta nanotecnología temprana sean los vitrales de las catedrales góticas. La arquitectura gótica nace al norte de Francia en Normandía en el siglo XII, de donde se difundió primero al reino de Francia y posteriormente al Sacro Imperio Romano Germánico. Este nuevo estilo de construcción dio paso a edificios con proporciones diferentes al románico: mucho más esbeltos y con bóvedas altas. Para soportar el empuje del peso de las bóvedas, los arquitectos idearon los contrafuertes con arbotantes. Esto permitió tener fachadas con enormes huecos, produciéndose una mayor luminosidad al interior. Es aquí donde los artesanos medievales del vidrio plasman su magia en los interiores. Un magnífico ejemplo es la Santa Capilla en el centro de París. En este edificio, construido a principios del siglo XIII, las paredes prácticamente desaparecen, y en su lugar se yerguen enormes ventanales cubiertos de vitrales (figura 5). El

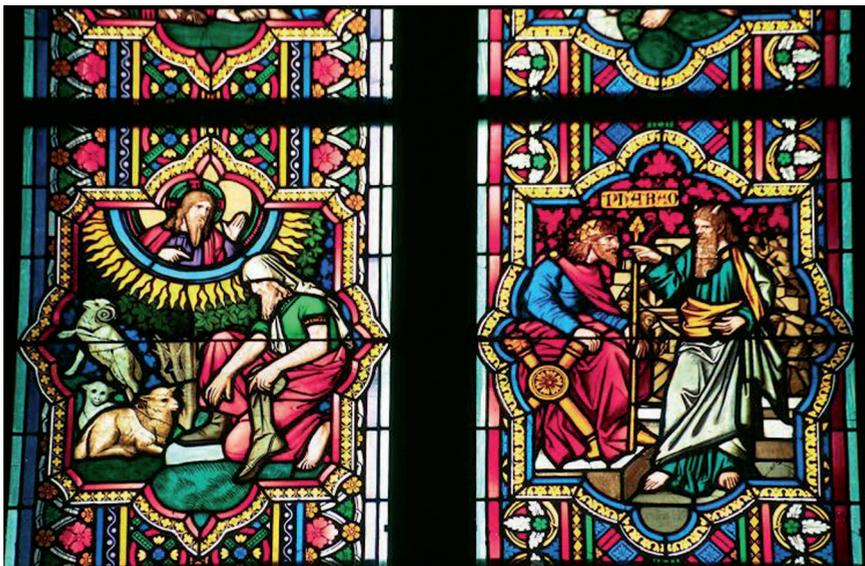
FIGURA 5. Santa Capilla de París.



Fuente: B. Didier (fotógrafo).

ambiente luminoso al interior da a la atmósfera un efecto muy especial y diferente al que se obtendría con un ventanal que dejara pasar toda la luz blanca de la radiación solar. Estos artesanos, nanotecnólogos primitivos, sabían muy bien qué sales poner en el vidrio fundido y las proporciones adecuadas para obtener toda la gama de colores para sus vitrales. Aún hoy en día nos admira el colorido de semejantes obras de arte (figura 6).

FIGURA 6. Vitrales de la Catedral de Colonia.



Fuente: Jan van der Crabben (fotógrafo).

La nanotecnología moderna y la paleta de color

Los sistemas de reproducción de imágenes a color utilizan filtros y prismas para dispersar la luz de diferentes longitudes de onda. Con la miniaturización de los dispositivos integrados, la investigación en los sensores de la reproducción de imágenes ha crecido exponencialmente, buscando alta eficiencia, bajo consumo de energía y dimensiones pequeñas, lo que representa retos enormes a los sistemas convencionales.

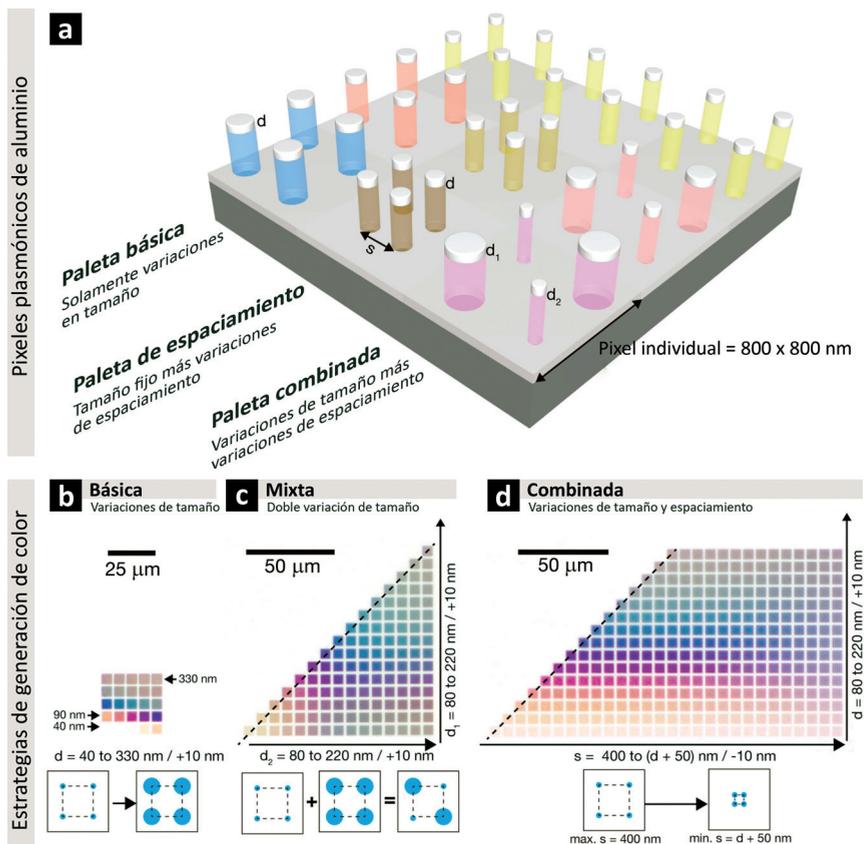
En apartados anteriores se ha explicado que la absorción de la luz por la resonancia del plasmón de superficie de las nanopartículas metálicas hace que estas nanopartículas reflejen un cierto color de la luz. Recientemente, en 2014, científicos de varias instituciones de Singapur construyeron dispositivos conteniendo arreglos específicos de nanodiscos de aluminio de diferentes tamaños acomodados con diferentes arreglos espaciales (Tan *et al.*, 2014). De esta forma establecieron pixeles plasmónicos para conformar una paleta de color. Cada pixel contiene cuatro nanodiscos de diferentes tamaños para crear una paleta de color básica, que al variar las distancias entre ellos y los tamaños de los nanodiscos se crean diferentes colores y tonalidades enriqueciendo en colores y tonalidades dicha paleta. Estas nanoestructuras se obtienen a partir de un sustrato de silicio construyendo nanopilares por medio de litografía con un haz de electrones, sobre los que se deposita aluminio de 20 nm de espesor. Las dimensiones de cada pixel fueron de 800×800 nm.

Como se muestra en la figura 7a, la paleta básica está formada por nanodiscos de aluminio con un mismo espaciamiento pero diferentes tamaños. Con un mismo tamaño y diferentes espaciamientos se generan otros colores y tonalidades. Finalmente, con una combinación de arreglos de tamaños, espaciamientos y geometrías de colocación, se aumenta la paleta de color. La figura 7b muestra los arreglos de la paleta básica donde se varía únicamente el tamaño, discos con diámetros de 40 a 330 nm, en pasos de diámetros de 10 nm y espaciamientos fijos de 400 nm. En la figura 7c se muestra cómo la variación de tamaño intercalado en cada pixel (dos nanodiscos de un tamaño y dos de otro), con variaciones $d_1, d_2 = 80$ a 220 nm en pasos de 10 nm y con un espaciamiento fijo de 400 nm en un mismo pixel de 800×800 nm, enriquece la paleta de color. En la figura 7d, la paleta de color se forma variando los tamaños ($d = 80$ a 220 nm) y variaciones en los espaciamientos ($s = d + 50$ a 400 nm) en arreglos de los cuatro nanodiscos dentro del pixel de 800×800 nm, en pasos de 10 y 20 nm, respectivamente.

Estas combinaciones de los nanodiscos de aluminio en los pixeles dan plasmones en el visible que forman la paleta de color

Para mostrar la versatilidad de su paleta plasmónica contenida en una microestructura, estos científicos crearon una fotoimpresión de la famosa pintura *Amanecer* del pintor impresionista Monet. En la figura 8a se muestra una reproducción del original. En la figura 8b una fotoimpresión con la

FIGURA 7. Ilustración esquemática de la configuración de los píxeles plasmónicos de nanodiscos de aluminio: a) visualización de las diferentes disposiciones de los nanodiscos en tamaños y espaciamientos; b) paleta de color de la disposición básica de los nanodiscos; c) paleta de colores mixta que dispone diferentes tamaños de nanodiscos, con un espaciamiento en un píxel, y d) paleta de colores con la combinación de tamaños y espaciamientos de los nanodiscos en un píxel.

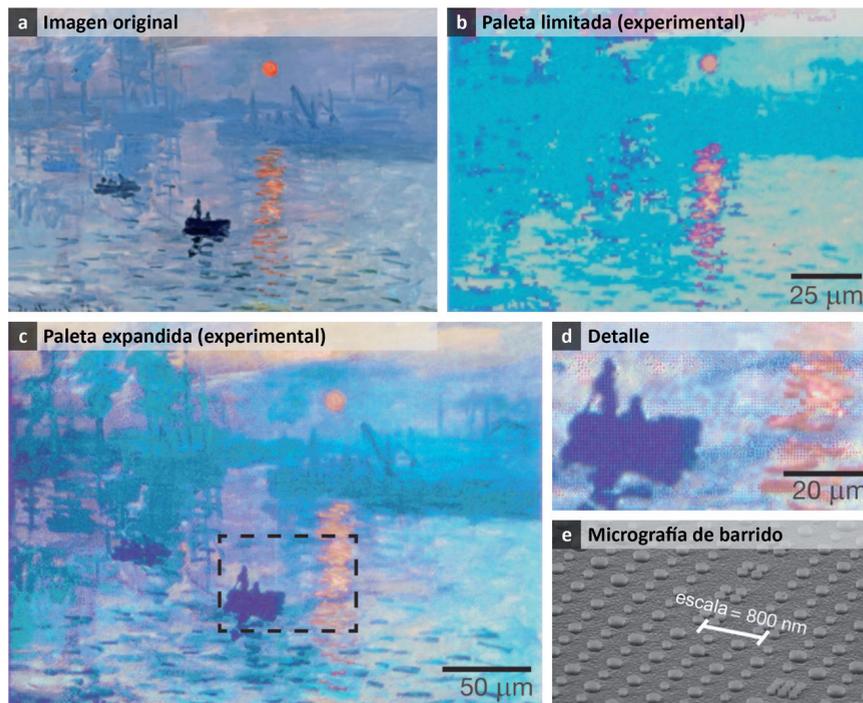


Fuente: Adaptada con el permiso de: Shawn J. Tan, Lei Zhang, Di Zhu, et al. (2014). Plasmonic color palettes for photo-realistic printing with aluminum nanostructures, *Nano Letters*, 14(7): 4023–4029. Copyright © 2014, American Chemical Society.

paleta plasmónica de color limitada (básica). En la figura 8c con la paleta expandida (píxeles con combinaciones de tamaños de nanodiscos y espaciamientos) se obtiene una fotoimpresión con una mayor variedad de colores. El grado de reproducibilidad es impresionante con un dispositivo micrométrico como el obtenido en el trabajo descrito. La figura 8d muestra el detalle y en la 8e se muestra una micrografía de microscopía electrónica de barrido de los píxeles con las diferentes disposiciones de los nanodiscos.

Las nanopartículas de aluminio son muy durables y mucho más baratas comparadas con las de oro o plata, por lo que un microdispositivo con las características descritas tiene amplias posibilidades de comercializarse.

FIGURA 8. Reproducción de la pintura de Monet *Amanecer* utilizando las diferentes estrategias de las paletas de color plasmónicas: a) reproducción del original utilizada como imagen de entrada; b) reproducción utilizando solamente la paleta limitada de los “colores plasmónicos primarios”; c) reproducción más realista de la pintura utilizando la paleta expandida; d) magnificación del detalle encuadrado en c, y, e) micrografía de microscopía electrónica de barrido de los pixeles con las diferentes disposiciones de los nanodiscos de aluminio.



Fuente: Adaptada con el permiso de: Shawn J. Tan, Lei Zhang, Di Zhu, *et al.* (2014). Plasmonic color palettes for photo-realistic printing with aluminum nanostructures, *Nano Letters*, 14(7): 4023–4029. Copyright © 2014, American Chemical Society.

Conclusiones

Se ha mostrado cómo, las nanopartículas metálicas, cuyas propiedades ópticas son muy diferentes a las que tienen en grandes volúmenes, han sido utilizadas, primero en objetos de ornamentación, y ahora como microdispositivos fotónicos de alta resolución. Desde el punto de vista de la arquitectura y el arte, la fascinación por los colores y el efecto de la luz siempre han impactado al hombre. El ingenio y las habilidades de los artesanos desde la antigüedad, y ahora de los científicos, muestran que, en este caso, la nanotecnología siempre ha estado presente en la vida humana.

Referencias

- Atwater H.A. (2007). The promise of plasmonics. *Scientific American*, 296: 56-63.
- Barsan M.M., Bret C.M.A. (2016). Recent advances in layer-by-layer strategies for biosensors incorporating metal nanoparticles. *Trac-Trends in Analytical Chemistry*, 79: 286-296.
- Bornacelli J., Silva-Pereyra H., Rodríguez-Fernández L., Avalos-Borja M., Oliver, A. (2016). From photoluminescence emissions to plasmonic properties in platinum nanoparticles embedded in silica by ion implantation. *Journal of Luminescence*, 179: 8-15.
- Gramotnev D.K., S.I. Bozhevolnyi S.I. (2010). Plasmonics beyond the diffraction limit. *Nature Photonics*, 4: 83-91.
- Heydari E., Mabbott S., Thompson D. (2016). Engineering molecularly-active nanoplasmonic surfaces for DNA detection via colorimetry and Raman scattering. *Nanoscale Imaging, Sensing, and Actuation for Biomedical Applications XIII. Book Series: Proceedings of SPIE*, 9721:972105.
- Kelly K.L. Coronado E., Zhao L.L., Schatz G.C. (2003). The optical properties of metal nanoparticles: The influence of size, shape and dielectric environment. *Journal of Physical Chemistry B*, 107: 668-677.
- Kim H.S., Lee B.H., Oh G.Y. (2016). Significantly enhanced sensitivity of surface plasmon resonance sensor with self-assembled metallic nanoparticles. *Journal of Nanophotonics*, 10: 026012.
- Langhammer C., Yuan Z., Zoric I., Kasemo B. (2006). Plasmonic properties of supported Pt and Pd nanostructures. *Nano Letters*, 6: 833-838.
- Oliver A., Chenag-Wong J.C., Roiz J., Rodríguez-Fernández L., Hernández J.M., Crespo A., Muñoz E. (2002). Metallic nanoparticle formation in ion-implanted silica after thermal annealing in reducing or oxidizing atmospheres. *Nuclear Instruments and Methods B*, 191: 333-336.
- Tan S.J., Zhang L., Zhu D., Goh X.M., Wang Y.M., Kumar K., Qiu C.K., Yang J.K.W. (2014). Plasmonic color palettes for photorealistic printing with aluminium nanostructures. *Nano Letters*, 14: 4023-4029.
- Torres-Torres C., Reyes-Esqueda J.A., Cheang-Wong J.C., Crespo-Sosa A., Rodríguez-Fernández L., Oliver A. (2008). Optical third-order nonlinearity by nanosecond and picosecond pulses in Cu nanoparticles in ion-implanted silica. *Journal of Applied Physics*, 104: 014306.