

# Aplicaciones de los nanodiamantes fluorescentes

## Applications of fluorescent nanodiamonds

Ana Carolina Rodríguez-Báez,\* Nayeli Pérez-Morales,\*  
Santos Adriana Martel Estrada\*\*,<sup>†</sup>

**ABSTRACT:** Nanodiamonds are carbon-based particles that exhibit characteristics that open the opportunity to various application areas such as drug transport, cell tracking, cell biomarkers, etc. The properties of these nanostructures allow their use in a wide selection of industries, thanks to the fluorescence they produce. The fluorescence of nanodiamonds is related to color centers. The objective of this work is to collect documentary information on fluorescent nanodiamonds. In conclusion, these nanoparticles have various challenges, such as particle size, the formation of functional crystallographic defects in their nucleus, as well as the homogeneity of their surface.

**KEYWORDS:** nanodiamonds, fluorescent nanodiamonds, carbon-based nanomaterials, color centers, vacancies.

**RESUMEN:** Los nanodiamantes son partículas basadas en carbono cuyas características abren la oportunidad a una gran variedad de áreas de aplicación como transporte de fármacos, rastreo celular, biomarcadores celulares, etc. Las propiedades que presentan estas nanoestructuras permiten su uso en una amplia selección de industrias, gracias a la fluorescencia que producen. La fluorescencia de los nanodiamantes está relacionada con centros de color, originados en vacancias en el mismo. El objetivo de este trabajo es recopilar información documental sobre los nanodiamantes fluorescentes. Estas nanopartículas plantean diversos retos, tales como el tamaño de partícula, la formación de defectos cristalográficos funcionales en su núcleo, así como la homogeneidad de su superficie.

**PALABRAS CLAVE:** nanodiamantes, nanodiamantes fluorescentes, nanomateriales a base carbono, centros de color, vacancias.

## Introducción

Los diamantes son una estructura cristalina consistente de dos entramados cúbicos centrados en la cara. Un entramado se desplaza con respecto al otro a lo largo de un espacio diagonal cúbico elemental en una cuarta parte de su longitud (Preston, 1945). Es considerado una forma alotrópica metaestable del carbono con los átomos arreglados en una variación de la estructura cristalina cúbica centrada en la cara (Zhang *et al.*, 2018).

El carbón elemental puede ser considerado químicamente inerte debido a su estabilidad termodinámica, por lo que usualmente el grafito sólido es utilizado como estado de referencia en las mediciones termodinámicas (Chang,

---

Recibido: 24 de abril, 2020. Aceptado: 14 de noviembre, 2022. Publicado: 21 de febrero 2023.

\* Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez.

\*\* Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

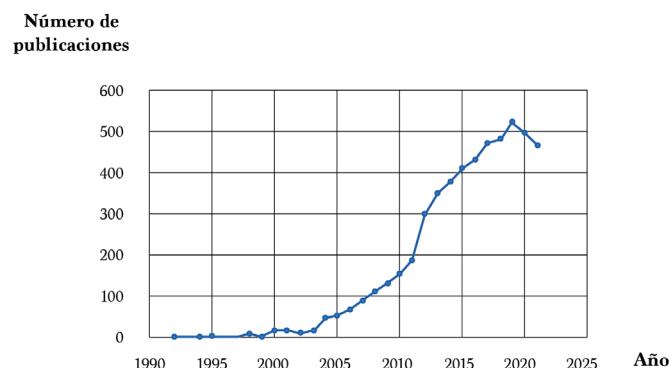
<sup>†</sup> Autora de correspondencia: adriana.martel@uacj.mx



Hsiao y Su, 2018). Esta propiedad también le pertenece a los nanodiamantes (NDs) que, a diferencia de otras nanopartículas fluorescentes que contienen metales pesados, como los puntos cuánticos, los NDs consisten de carbón en  $sp^3$  el cual es no reactivo (Ikliptikawati *et al.*, 2021).

Los NDs pueden ser sintetizados por eventos como la detonación o los impactos de meteoritos (Zhang *et al.*, 2018). En la escala nano, las aportaciones han sido muy significativas desde que en la década de 1960, se reportó que se produjeron NDs por ondas de choque en materiales de carbono y la producción de polvos ultra dispersos por detonación de explosivos contenido carbono (Decarli y Jamieson, 1961; Volkov, Danilenko y Elin, 1990; Schrand, Hens y Shenderova, 2009; Neverovskaya, Voznyakovskii y Dolmatov, 2004; Badziag *et al.*, 1990). Estos descubrimientos implicaron un creciente interés en investigación desde 1990 (figura 1). Los NDs son partículas que pertenecen a la familia de carbono que han sido investigados ampliamente desde 1990 (Laube *et al.*, 2019). Generalmente, son clasificados de acuerdo con el contenido de impurezas, tales como átomos de boro y hierro (Wee *et al.*, 2009). Poseen extraordinarias propiedades luminiscentes y biocompatibles (Havlik *et al.*, 2013; Haziza *et al.*, 2017; Hasan *et al.*, 2017).

**FIGURA 1.** Número de artículos publicados relacionados con NDs desde 1990.



Fuente: Base de datos Scopus (Scopus, 2022).

Los NDs pueden ser elaborados también a partir de las técnicas de detonación (Osipov, Romanov y Takai, 2021; Shenderova, 2014; Claveau, Bertrand y Treussart 2018), alta temperatura, alta presión (Liang *et al.*, 2020; Ekimov y Kondrin, 2020; Perevedentseva, 2013), deposición química de vapor (Shankar *et al.*, 2008; Tanaka, Okubo y Harada, 2021), síntesis ultrasónico (Neverovskaya, Voznyakovskii y Dolmatov, 2004), síntesis hidrotermal (Yu *et al.*, 2019), síntesis de iones y bombardeo láser (Chauhan, Jain y Nagaich, 2020; Stehlík *et al.*, 2021; Reineck *et al.*, 2017).

El nitrógeno es la impureza más conocida en la estructura del diamante natural. De hecho, la clasificación de los diamantes está asociada con la can-



tidad de nitrógeno que contiene. El diamante tipo I contiene arriba de 0.3 % de nitrógeno. El tipo II no lo contiene o lo contiene muy poco. El tipo I se divide en Ia e Ib, dependiendo del contenido de nitrógeno y cómo los átomos están incorporados en el diamante. En el tipo Ia, los átomos de hidrógeno existen como agregados, y en el tipo Ib el nitrógeno está atómicamente disperso (Chang, Hsiao y Su 2018). Se ha visto que los métodos de preparación influencian la calidad, cantidad y química de superficie del ND (Reina *et al.*, 2019). Por eso, algunos de sus mayores retos son el tamaño de las partículas, la formación de defectos cristalográficos funcionales en su núcleo (Shenderova y Nunn, 2017), la formación de productos ácidos por degradación (Rehman, Houshyar y Wang, 2020), la homogeneidad de su superficie y el comportamiento coloidal (Krueger, 2017). En este sentido, ciertas modificaciones de superficie aumentan la toxicidad de los mismos (Karpeta-Kaczmarek *et al.*, 2018; Villalba *et al.*, 2012; Silbajoris *et al.*, 2015), por lo cual se requiere de una selección cuidadosa de la funcionalización y dosis apropiada para su uso seguro (Tinwala y Waikar, 2019). Además, la alta estabilidad de los NDs por comprimir carbonos  $sp^3$ , puede afectar su biodegradabilidad en el medio ambiente del cuerpo; dado lo anterior, es necesario evaluar el mecanismo de excreción o su bioacumulación (Reina *et al.*, 2019). Aunado al descubrimiento de los NDs, han surgido los denominados NDs fluorescentes (Boudou, Tisler *et al.*, 2013) que han permitido una nueva ola de investigaciones e innovación en el etiquetado de células (Lien *et al.*, 2012; Ikliptikawati *et al.*, 2021), imagen (Su *et al.*, 2019; Huang *et al.*, 2019) y rastreo (Torelli *et al.*, 2019; Hui *et al.*, 2017), utilizando partículas de carbono con una excelente biocompatibilidad (Vaijayanthimala *et al.*, 2012b; Berdichevskiy *et al.*, 2021) y propiedades ópticas únicas (Raj y Manoj, 2022; Głowacki *et al.*, 2022). Son partículas prometedoras como vehículos de liberación de fármacos (Torelli *et al.*, 2019; Gvozdev *et al.*, 2021; Martel-Estrada *et al.*, 2021), marcadores fluorescentes (Wilson *et al.*, 2019; Huang *et al.*, 2019; Boudou, David *et al.*, 2013; Dong *et al.*, 2020; Suarez-Kelly *et al.*, 2017; Ma *et al.*, 2021), probeta para imagen guiada (Chang *et al.*, 2019; Jung *et al.*, 2019; Prabhakar y Rosenholm, 2019; Kang *et al.*, 2018), transporte de proteínas (Kuo *et al.*, 2013), ingeniería tisular (Zhang *et al.*, 2011; Fox *et al.*, 2016; Houshyar *et al.*, 2020), así como en aplicaciones tecnológicas tales como los sensores basados en fibra óptica y en el monitoreo de partículas biológicas de interés (Reineck *et al.*, 2019; Bilal *et al.*, 2021). Debido a las prometedoras aplicaciones y retos que presentan los NDs, este documento pretende realizar una revisión del estado del arte de los mismos, enfatizando el uso de los NDs fluorescentes, con la finalidad de proveer al lector de una visión general de sus posibilidades y aplicaciones.

## Metodología

Este trabajo fue realizado con base en la investigación de material bibliográfico consultado en bases de datos con el objetivo de obtener publicaciones re-



lacionadas con NDs, NDs fluorescentes y sus aplicaciones. Para la selección de estos artículos o libros se utilizaron como criterios que las fuentes estuvieran escritas en inglés o en español. Debido a la necesidad de aportar información de las fuentes originales, se recurrió a la búsqueda de los autores que hubieran reportado los primeros hallazgos en diamantes y NDs, así como NDs fluorescentes. En total se realizó una selección de 207 títulos con temas relacionados con los NDs y sus aplicaciones.

## El ND

El grafito es la forma más estable del carbono a temperatura y presión ambiental. En cambio el diamante es metaestable. La diferencia de energía en las dos fases es 0.02 eV por átomo, pero están separadas por una alta barrera de energía de aproximadamente 0.4 eV por átomo. No obstante, a nanoscalas, la energía libre de Gibbs está relacionada con la energía de superficie y por ende del tamaño de los clústeres (Mochalin *et al.*, 2012).

La estructura cristalina del diamante es simétrica en sus tres dimensiones, conocida como estructura cúbica de diamante. Una manera de ver la estructura del cristal es dividir la celda unitaria en ocho pequeños cubos, que pueden ser separados en dos grupos. El cubo del primer grupo consiste de cinco átomos de carbono en una configuración tetraédrica  $sp^3$  con cuatro átomos de carbono ocupando las cuatro esquinas y el último el centro de cubo. Estos átomos de carbono están conectados por dos pares de átomos de carbono. Un par localizado en la mitad inferior de la celda unitaria alineado diagonalmente, y el otro en la mitad superior alineado de la misma forma. El cubo del otro grupo no contiene átomos de carbono en el centro y como resultado la celda unitaria tiene 8 átomos de carbono. Por este motivo el diamante tiene una densidad de masa de 3.515 g/cm<sup>3</sup> a temperatura ambiente y una densidad numérica de  $1.76 \times 10^{23}$  átomos/cm<sup>3</sup>, resultando en la más alta para cualquier material. Esto le da al diamante su excepcional dureza, cerca de 40 veces más alta que el acero inoxidable, la más alta conductividad térmica de cualquier material en bulto 200 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> a 300 K, así como el más alto índice de refracción de los materiales dieléctricos ( $n = 2.41$ ). El diamante tiene un *bandgap* semiconductor con una energía (*energy gap*) de  $E_g = 5.45$  eV entre la banda de valencia y la de conducción (Chang, Hsiao y Su, 2018).

Los NDs hacen referencia a diamantes monocrystalinos, generalmente con tamaño de partícula menor a 10 nm, que a diferencia de otros materiales de carbono están hechos principalmente de clúster tetraédricos de carbono  $sp^3$  (Medina-Cruz *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2018). Por ejemplo, los cuánticos de carbono contienen átomos de carbono hibridizados de tipo  $sp^3$  y  $sp^2$  en varias proporciones (Taherpour y Mousavi, 2018). En cambio, los NDs son estructuras complejas consistentes en un núcleo de diamante y una coraza de carbón amorfo (Zhang *et al.*, 2018), arreglados en una estructura cristalina tipo diamante (Budama-Kilinc *et al.*, 2020). Los NDs producidos por detona-



ción contienen, típicamente, un 90% de carbono y un 2% de impurezas de nitrógeno (Williams 2014). Generalmente, la mitad de los átomos de carbono en el ND se encuentra en la superficie y son capaces de formar enlaces con hidrógeno y otros grupos funcionales que afectan la estabilidad de su estructura (Taherpour y Mousavi, 2018). Se pueden clasificar de manera general como: nanocristalinos (10-100nm) o ultrananocristalinos (< 10nm).

Los NDs producidos por detonación pertenecen a la segunda clasificación (Williams, 2014). Algunas de las estructuras en las que se pueden encontrar los NDs incluyen: películas delgadas de diamantes de fase pura, partículas de diamantes, nanorrodillos 1-D, nanoplaquetas de diamantes 2-D, y el denominado ultracristalino que tiene el tamaño característico básico de los constituyentes del diamante (Schrand, Hens y Shenderova 2009). Cada proceso de síntesis produce diferentes tipos de NDs. Los diamantes de deposición química de vapor crecen en forma de películas delgadas; los producidos por detonación son nanopartículas tipo núcleo-coraza, los cuales crecen en forma de clúster tipo cebolla; los NDs producidos por alta presión y alta temperatura, normalmente contienen 300 ppm de nitrógeno, lo cual les permite emitir fluorescencia (Vaijayanthimala, 2009; Schrand, Hens y Shenderova, 2009; Chang, Hsiao y Su, 2018; Butler y Sumant, 2008). Una de las impurezas más comunes que presenta la estructura de los NDs es el nitrógeno que genera defectos de vacancia-nitrógeno (V-N), este elemento es responsable de la fluorescencia roja/infrarroja cercana de los diamantes, mientras que el defecto nitrógeno-vacancia-nitrógeno (N-V-N) genera una fluorescencia verde (Boudou *et al.*, 2009). Esto será explicado con más detalle más adelante.

El tamaño de partícula de los NDs ha sido determinado utilizando difracción por rayos X, y por dispersión de rayos X en ángulos pequeños (Zhang *et al.*, 2018). Se ha propuesto también la espectroscopía Raman como una técnica para caracterizar la estructura de películas de NDs con o sin nitrógeno (Ferrari y Robertson, 2004). Se considera que tienen propiedades excepcionales de biocompatibilidad, fluorescencia, estabilidad química, fácil modificación de superficie, buena conductividad térmica y tolerancia a condiciones agresivas (Bilal *et al.*, 2021).

Otras investigaciones han utilizado, además, espectroscopía por energía dispersiva, infrarrojo por transformada de Fourier, microscopía electrónica de transmisión de alta resolución y calorimetría diferencial de barrido. Con estas técnicas se ha podido evaluar que los NDs producidos por detonación tienen una forma esférica con un tamaño de grano de aproximadamente 5 nm, en cuya superficie se pueden encontrar grupos hidroxi, carbonilo, carboxilo y otros grupos funcionales. De igual manera, se ha encontrado que su temperatura de oxidación inicial en aire es cercana a 550 °C (Ferraris *et al.*, 2021).

Con respecto al infrarrojo, se puede decir que el núcleo del diamante está principalmente relacionado con vibraciones de C-C y los tipos de defectos que contiene. La vibración en 1332 cm<sup>-1</sup> corresponde a la banda de primer orden Raman que no es detectada típicamente por FTIR; sin embargo, en los estu-

dios en los que ha sido detectada claramente visible se ha interpretado como resultado de simetría rota en el enlace del diamante C-C cercano a la superficie debido a otros grupos de superficiales. Los grupos superficiales contribuyen principalmente con modos de doblamiento C-O-C de grupos éter, lactonas o ácidos anhídridos, así como grupos hidroxilo o aminos (Petit y Puskar, 2018).

El ND no solo es una partícula sintetizada. En 1987, se descubrió un nuevo tipo de NDs, denominados NDs meteoríticos por provenir del espacio exterior. El diámetro medio de estos NDs fue de 2.7 nm y la concentración de NDs en el meteorito fue de 1,400 ppm y fueron más estables termodinámicamente que el grafito de tamaño similar (Hill *et al.*, 1997; Németh, Garvie y Buseck, 2016; Williams, 2014).

## Procesos de síntesis de ND

Los primeros estudios de la síntesis de ND son de 1963 mediante detonación. Sin embargo, la investigación se detuvo por algunos años y a lo largo de las décadas han ido surgiendo más métodos de síntesis, entre los cuales se encuentran: la síntesis hidrotermal, bombardeo de iones, ablación con láser pulsado, ultrasonido y electrólisis; aunque los más comunes son por detonación, deposición química de vapores, pulso de luz hidrodinámica y alta presión alta temperatura, los cuales se explicarán con más detalle a continuación.

### Detonación

Este fue uno de los primeros métodos de síntesis utilizados para la producción de ND; consiste en una onda de choque creada por un material altamente explosivo comprimido que al calentarse genera una descomposición química, esto causa una liberación de grandes cantidades de energía en fracciones de microsegundos (Danilenko y Shenderova, 2012).

Un grupo de científicos de la unión soviética, en 1963, encontró pequeñas partículas de diamantes como subproducto de la detonación de un compósito de TNT con déficit de oxígeno y hexógeno, en un ambiente inerte, lo cual les dio como resultado partículas con tamaños alrededor de 5 nm (Chang, Hsiao y Su, 2018).

La descomposición de moléculas explosivas con la formación de carbono libre procede de acuerdo con la siguiente reacción (Shenderova y Ciftan Hens 2013):



Un problema que enfrenta este tipo de síntesis es la pureza de los ND; pues se llevan a cabo varios lavados con agua para bajar la acidez, comprobando que esto mejora la calidad de las partículas, al igual que su estabilidad en suspensiones acuosas al utilizar, por ejemplo, agua alcalina como amonio (Kharisov, Kharissova y Chávez-Guerrero, 2010).



## Deposición química de vapor (CVD)

Similar a la síntesis por detonación, los primeros estudios de crecimiento de diamantes datan de 1960. Este método consiste en aplicar presiones bajas sobre sustratos en un ambiente con gases que contengan carbono; sin embargo, la tasa de crecimiento es muy lenta (Chang, Hsiao y Su, 2018), al igual que un rendimiento de reacción bajo, lo cual hace que el método de síntesis no sea el ideal (Alkahtani, Alghannam, Jiang, Almethen *et al.*, 2018). Los sustratos utilizados para la síntesis suelen ser de silicio, pudiendo tener también algún recubrimiento de materiales como dióxido de silicio, carburo de silicio, nitruro de silicio, metales, entre otros. Este método requiere que el sustrato sea sembrado para poder iniciar la nucleación de los NDs. Para el sembrado se han utilizado tratamientos ultrasónicos en un compuesto acuoso de polvo de diamantes con tamaños micrométricos, pulido del sustrato con polvo de diamantes, capas de carbono amorfo inicial o recubrimiento del sustrato con materiales que contengan diamantes; después de esto comienza la nucleación y empieza un crecimiento homoepitaxial de cristales individuales (Butler y Sumant, 2008).

Mediante esta técnica se suelen producir partículas de NDs que son eléctricamente conductores dopados con boro, abriendo paso a aplicaciones en electroanálisis y electroquímica (Danilenko y Shenderova, 2012).

## Pulso de luz hidrodinámica (TLHDP)

Esta tecnología fue desarrollada por Ray Techniques Ltd. Es un enfoque que permite producir NDs creando ondas de choque acústicas por medio de un rayo enfocado en un líquido transparente a una determinada distancia de la superficie de una tarjeta contenido una fuente de carbón de no diamante. Este proceso es altamente controlable y el producto son NDs mono dispersos de un pocos nanómetros de tamaño (Zousman y Levinson, 2012).

## Alta presión, alta temperatura (HPHT)

Este método de síntesis implica tener los precursores a presiones de 20-200GPa y temperaturas mayores a 2000 °K, se suele mezclar polvo de cobre con el grafito para que el calor se disipe de manera más rápida al momento de la explosión, previniendo que los diamantes formados regresen a ser grafito. Con esta técnica se pueden obtener NDs de alrededor de 20nm (Danilenko y Shenderova, 2012; Boudou, Tisler *et al.*, 2009; Nunn *et al.*, 2017).

Los NDs producidos por HPHT son monocrystalinos con una alta transparencia óptica. Estos materiales son producidos por molienda de cristales de diamante de unos micrómetros, sintetizados por HPHT y luego separados por una fuerza centrípeta. Su tamaño es típicamente de 10-100 nm y contienen menos carbono sp<sup>2</sup> en la superficie, pudiendo ser purificados más fácilmente utilizando ácidos. Además, se les pueden ensamblar > 10 ppm de partículas de centros fluorescentes para aplicaciones (Williams, 2014).

En su mayoría, los NDs fluorescentes son producidos mediante la molienda de diamantes a granel sintetizados HPHT o en algunos casos también se pueden



encontrar casos de síntesis CVD al soler ser más luminosos que los producidos por detonación (Alkahtani, Alghannam, Jiang, Almethen *et al.*, 2018).

## Centros de color

Los centros de color son defectos cristalinos que absorben luz en la región espectral donde el cristal por sí mismo no tiene absorción. Es una vacancia cristalina con un electrón o electrones capturados no apareados que absorben luz en la región visible, dando colores a los cristales. El diamante puro es ópticamente transparente, mostrando absorción infrarroja por la excitación de dos y tres fonones. La ausencia de absorción de un fonón es debida a la alta simetría de la estructura del diamante, en la cual las vibraciones C-C son inactivas en IR. Por este motivo, la absorción y emisión óptica en un diamante con color, debe ser contribuida por impurezas y defectos estructurales en el cristal de la matriz (Williams, 2014). Las impurezas ópticamente activas en el diamante son llamadas centros de color (Neu, 2017). En este sentido, el nitrógeno es la mayor impureza en el diamante. Los centros de color en el diamante son cruciales para la emergencia de fuentes de un solo fotón, tecnologías cuánticas y sensores biológicos (tabla 1). La funcionalidad de una vacancia de centro de color depende de la capacidad para excitar electrones ópticamente entre estados de gap bien definidos (Muruganathan y Mizuta, 2021).

**TABLA 1.** Centros de color y su línea cero fonón reportada.

Centro de color	Línea cero fonón (eV)	Línea cero fonón (nm)	Fuente
BV-1	3.22 eV		Muruganathan y Mizuta (2021).
NV(-)	1.945 eV		Thiering y Gali (2020).
NV(0)	2.156 eV		Thiering y Gali (2020).
Pb-V	2.4 e V		Ditalia Tchernij <i>et al.</i> (2021).
SiV		738 nm	Liu <i>et al.</i> (2022).
SnV		619 nm	Alkahtani, Alghannam, Jiang, Almethen <i>et al.</i> (2018).
GeV		602 nm	Alkahtani, Alghannam, Jiang, Almethen <i>et al.</i> (2018).
gFND con centros N-V-N (F3)		503 nm	Wee <i>et al.</i> (2009).

Fuente: Elaboración de las autoras.

## Vacancias en los NDs

No todos los NDs son fluorescentes. La fluorescencia de los NDs obedece a defectos en la partícula, como una vacancia de nitrógeno cargada negativamente (Nagl, Hemelaar y Schirhagl, 2015) y depende de los estados de su spin (Igarashi *et al.*, 2012; Neu *et al.*, 2011).



Las vacancias producidas por radiación son a temperatura ambiente. Empiezan a migrar cuando el diamante irradiado es calentado arriba de 500 °C, con una energía de activación superior a 2.3 eV.

Los NDs contienen una variedad de defectos que incluyen defectos puntuales intrínsecos como las vacancias de estructura, o las impurezas incidentales, como el nitrógeno, que son el resultado de la síntesis o procesos de purificación. En general, estos defectos son termodinámicamente inestables, pero la estabilidad de los defectos y la probabilidad de que puedan ser removidos dependerá de la localización de los defectos en la partícula. Esto es diferente al caso de los diamantes en bulto, donde todas las estructuras son geométricamente equivalentes. Hay defectos que son introducidos deliberadamente, como los dopantes tipo p y n utilizados en aplicaciones de electrónica. Hay otros defectos que no son dopantes y son referidos como funcionales. Uno de los defectos relacionados con nitrógeno es el complejo paramagnético (N-V) el cual se forma cuando dos carbonos son remplazados por un átomo de nitrógeno y un espacio vacante en la estructura del cristal. Este defecto comúnmente es encontrado en estado negativo (NV-) (Johnstone, Cairns y Patton, 2019). El nivel energético del defecto negativamente cargado N-V resulta en emisiones caracterizadas por la línea cero fonón (ZLP) a 637 nm (Williams, 2014).

La fluorescencia de los NDs puede provenir de centros de color, en donde el centro de vacancia de nitrógeno es el más popular o puede deberse a grupos orgánicos funcionales en la superficie de la partícula (Ikliptikawati *et al.* 2021). Sin embargo, también pueden tener centros de silicio (SiV), vacancias de germanio (GeV), vacancia de estaño (SnV) y centros de color de níquel (Qin *et al.*, 2021). El brillo de los FNDs dependerá también del número promedio de centros de color emitiendo por partícula (Alkahtani, Alghannam, Jiang, Almethen *et al.*, 2018).

Aunque la vacancia de nitrógeno es muy estudiada debido a su largo tiempo de coherencia de spin y su fácilmente manipulable estado base de spin (Qin *et al.*, 2021), no es la única de especial importancia. Por ejemplo, los NDs de 1.5 nm que comprimen alrededor de 400 átomos de carbono son capaces de producir luminiscencia estable en centros de color de vacancias de silicio (SiV) (Vlasov *et al.*, 2014). La vacancia centrada en silicio exhibe una emisión en 738 nm con una línea delgada cero-fonón y un tiempo de vida más corto que la vacancia de nitrógeno. Sin embargo, a diferencia de la vacancia de nitrógeno que puede ser obtenida fácilmente por detonación, la elaboración de NDs SiV de forma sintética sigue siendo un reto. Previamente, este tipo de NDs han sido desarrollados por medio de tratamientos plasma oxígeno (Chen *et al.*, 2018).

Como se explicará más adelante, no todos los NDs son fluorescentes, pues esta propiedad depende de sus vacancias y por ende de sus niveles de Fermi. Los estados cercanos a los niveles de Fermi están localizados en la superficie o interfase de los NDs, por lo cual los estados interfaciales y superficiales atrapan electrones o huecos, permitiendo esto afectar el sistema óptico y eléctrico del ND (Wang *et al.*, 2008).

La estructura de los NDs provee un modo fonón para el carbono enlazado  $sp^3$ , el cual es formado y aislado, y puede ser excitado en un amplio rango de longitudes de onda (Williams, 2014). Los estados de energía de excitación toman en cuenta el confinamiento cuántico, un estado e completa o parcialmente ocupado en la banda de los NDs. Estos estados e están fuertemente localizados en carbonos en los enlaces de defectos, como el SiV. Los estados más bajos de excitación ocurren predominantemente en esos estados ocupados o parcialmente ocupados. Por ejemplo, la línea cero fonón (ZPL) para el SiV- se encuentra entre 1.85 eV y 1.75 eV en NDs de 1.1 nm a 1.8 nm (Vlasov *et al.*, 2014).

## Propiedades de los NDs fluorescentes

No todos los diamantes son fluorescentes, pues para que esto suceda deben ocurrir centros de color que generalmente son producidos por vacancias de nitrógeno. A diferencia de los puntos cuánticos que tienen electrones no localizados cuya función de onda se puede extender a la superficie, los NDs fluorescentes tienen defectos de centros de color que actúan como átomos aislados o moléculas en un sólido huésped (Alkahtani, Alghannam, Jiang, Almethen *et al.*, 2018). Los diamantes son materiales sobresalientes y la mayoría de las propiedades que presentan se transfieren a la nanoscala, como la alta dureza y módulo de Young, biocompatibilidad, estabilidad química, alta resistividad eléctrica, además de algunos otros que se abordarán en los siguientes puntos.

## Propiedades magnéticas

Los NDs con un solo centro NV pueden detectar campos magnéticos con una sensibilidad de los pocos nT/ $\sqrt{Hz}$  (Maze *et al.*, 2008). Utilizando un diamante ultrapuro se alcanzó una detección de 3nT a un kHz de frecuencia después de 100 s. La detección de los campos magnéticos es posible a través del espectro de resonancia magnética ópticamente detectado (Alkahtani, Alghannam, Jiang, Almethen *et al.*, 2018).

## Propiedades ópticas

La fluorescencia de los NDs puede provenir de centros de color, en donde el centro de vacancia de nitrógeno es el más popular o puede deberse a grupos orgánicos funcionales en la superficie de la partícula (Ikliptikawati *et al.*, 2021). Los FNS contienen una vacancia relacionada con centros de color como fluoróporos. Las partículas que contienen centros H3 son llamadas FND verdes, y las partículas que contienen centros NV son denominadas FND rojos. Las dos técnicas para producir FNDs son las irradiaciones de electrones y las irradiaciones iónicas. La dosis depende del tipo y energía de las partículas usadas en el bombardeo. Los procesos involucrados en el daño son la dispersión de Rutherford y los choques en átomos. En el caso de la disper-



sión de Rutherford, el átomo de carbono en el diamante es desplazada por el electrón incidente, si el átomo recibe una energía de alrededor de 35 a 43 eV, conocida como energía de desplazamiento. En la radiación iónica de altas energías (alrededor de 2MeV) se pueden crear defectos en la estructura cristalina del diamante (Chang, Hsiao y Su, 2018).

Los espectros de emisión de fluorescencia del ND son dependientes de la excitación (tabla 2). La emisión azul se observa cuando la longitud de excitación varía de 274 nm a 374 nm, seguida por fluorescencia verde con longitudes de onda de excitación de 394 nm a 474 nm. Cada grupo funcional en el ND tiene excitación óptima y bandas de emisión. De esta manera, se considera que la fluorescencia es una cooperación y competencia entre los grupos funcionales OH y COOH. La cooperación se refleja cuando varía el color de azul a verde cuando es excitado a varios niveles de energía. La competencia se expresa como un desplazamiento en la excitación óptima y la longitud de onda de emisión, es decir, la posición del pico más fuerte (Raj y Manoj, 2022).

Los NDs pueden tener puntos ópticamente activos en su red cristalina (Liu *et al.*, 2016). La actividad óptica es un fenómeno físico asociado con la rotación y luz linealmente polarizada cuando se propaga a través de compuestos quirales. La luz linealmente polarizada puede ser vista como la superposición de luz circularmente polarizada izquierda (L) o derecha (R). Cuando la luz pasa a través de un sistema ópticamente activo, el compuesto quiral absorbe diferente la luz polarizada circularmente izquierda o derecha (tabla 2) (Noguez y Garzón, 2009).

El defecto de la vacante de nitrógeno es responsable de la fluorescencia roja y cercana al infrarrojo del ND y le confiere una estabilidad importante ante el fotodecolorado bajo las intensidades de alta excitación (Boudou *et al.*, 2009; Boudou, Tisler *et al.*, 2013). Debido a estos defectos pueden emitir fluorescencia en el rojo lejano desde una variedad de defectos ópticamente activos, lo cual les permite ser utilizados *in vivo* (Vaijayanthimala *et al.*, 2012a). Estas vacantes le permiten al ND ser utilizado en imagen fluorescente debido a que tiene una emisión estable resistente al fotodecolorado y un excelente brillo (Chang *et al.*, 2008). Las transiciones ópticas del NV dependen de los estados spin electrónicos, lo anterior implica que la intensidad de fluorescencia puede cambiar en presencia de perturbaciones del estado del spin, como un campo electromagnético (figura 2) (Basso *et al.*, 2020). Por eso, su spin electrónico puede ser fácilmente detectado para estudiar cambios de temperatura, detectar spin de electrones e imagen NMR (Liu *et al.*, 2016). Por otro lado, los defectos de los ND al ser excitados por un láser emiten fotones que son capaces de penetrar tejidos, permitiendo ser adecuados para aplicaciones de imagen (Chang *et al.*, 2008; Hemelaar *et al.*, 2017).

Previamente, se reportó que los estados cercanos a los niveles de Fermi en los NDs están localizados en la superficie, así como en la interface, y se pueden considerar los estados de defectos. La mayoría de los estados de superficie alrededor del nivel de Fermi se ubican en estos sitios, los defectos interfaciales se

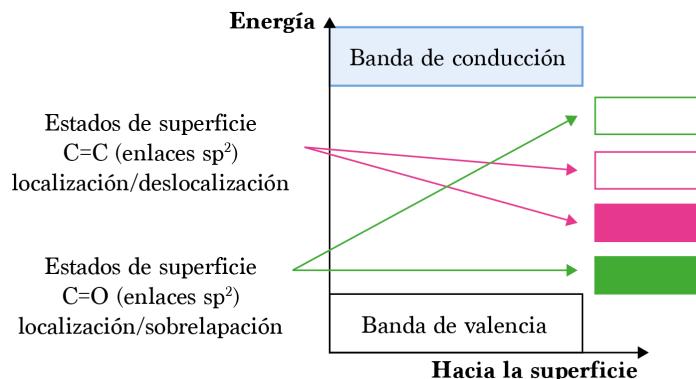


**TABLA 2.** Láseres de excitación utilizados en NDs.

Láser de excitación	Características	Fuente
Láser He-Ne de 633 nm con un límite de 33 kW/cm <sup>2</sup>	Utilizando el láser se logra una grafitización acompañada de luminiscencia verde, que es explicada por una fotoionización de los centros (Ni-N) y (N).	Mikheev <i>et al.</i> (2020).
Láseres de longitudes de onda de 488 nm y 532 nm	Se observó fotoluminiscencia en las partículas de NDs con tamaños de 5-500 nm. La luminiscencia que abarca desde 500 nm hasta 800 nm se puede excitar con láseres de longitudes de onda de 488 nm y 532 nm sin ningún tratamiento de alta energía para crear defectos/impurezas. Los autores reportan que la luminiscencia es dependiente del tamaño de las partículas y de la longitud de onda del láser. De acuerdo con este hallazgo se considera que diferentes tipos de defectos/impurezas sostienen predominantemente la luminiscencia de los NDs de diferentes tamaños.	Chung, Perevedentseva y Cheng (2007).
Láser azul de 474 nm o 588 nm	Los centros del ND con centros N-V-N (o H3) emiten luz verde de 530 nm. Esto permitiría utilizar el material como un marcador fluorescente en microscopía de fluorescencia confocal.	Wee <i>et al.</i> (2009).
Láser YAG de 1064 nm	Se prepararon muestras por medio de ablación láser contenido hollín de carbón con láser de 1064 nm.	Baidakova <i>et al.</i> (2013).
Laser Nd:YAG de 355 nm	Se produce una película de NDs que, posteriormente, es irradiada por el láser bajo condiciones de vacío. Se observa un cambio de color desde semitransparente a negro. El cambio de color visualmente indica a transición de fase de carbono sp <sup>3</sup> a sp <sup>2</sup> , y el resultado de la extinción del bandgap.	Rho <i>et al.</i> (2020).

Fuente: Elaboración de las autoras.

**FIGURA 2.** Estados electrónicos del ND.



Fuente: Basado en el diagrama propuesto por Williams (2014).



pueden encontrar debajo del empaquetado (111). Algunos átomos interfaciales están triplemente coordinados, pero todos estos átomos triplemente coordinados están vinculados con tres 4-átomos en pliegues coordinados, es decir, son 3-átomos en pliegues coordinados aislados. Los orbitales electrónicos de estos átomos no tienen un vecino más cercano al orbital p<sub>z</sub> para formar estados  $\pi$  y  $\pi^*$ , y, finalmente, se convierten en enlaces no apareados. Los electrones desapareados de estos átomos entran en estados de defecto cercanos al nivel de Fermi. Estos estados superficiales e interfaciales atrapan electrones o huecos y afectan el sistema eléctrico y óptico del ND (Wang *et al.*, 2008).

Los centros de las vacancias de nitrógeno (NV) son un punto fluorescente de defecto en el diamante formado por un átomo sustitucional de nitrógeno adyacente a una vacancia de carbono (Karaveli *et al.*, 2016). En los NDs, estas vacancias existen en dos estados electrónicos: los negativamente cargados (NV-) y los neutrales (NV<sub>0</sub>). El estado NV- emite en la región roja con la línea cero del fonón (ZPL) en 637 nm, la cual es seguida por una banda de luminiscencia de réplica del fonón con una intensidad más alta de 700 nm. El estado NV<sub>0</sub> emite luminiscencia naranja con un ZPL alrededor de 575 nm, seguida por bandas similares. Los cambios reversibles entre los estados NV- y NV<sub>0</sub> son permitidos por un desplazamiento en la posición de los niveles de estado NV<sub>0</sub> y NV- con respecto a los niveles de Fermi en la superficie del ND. Es decir, cuando el estado base del NV- es desplazado debajo del nivel de Fermi, un electrón se pierde desde el centro NV y viceversa (Petrakova *et al.*, 2015; Karaveli *et al.*, 2016).

El nivel energético del centro NV neutral está caracterizado por una línea cero-fonón (ZPL) en 575 nm, acompañada por una amplia banda de menor energía debido a la transición del mismo estado excitado, y el defecto ZPL del centro NV negativamente cargado es rojo desplazado a 637 nm. La emisión del centro NV es asistida por fonón, y tiene un pico alrededor de 680 nm-700 nm, lo cual es relevante a las longitudes de onda para aplicaciones biológicas (Ikliptikawati *et al.* 2021).

La luminiscencia depende del tamaño del cristal, con un estado de carga dependiente de la temperatura. Una ventaja del espectro característico de los defectos NV y NV- es que están separados en una región endógena de fluorescencia (Ikliptikawati *et al.*, 2021).

La microscopía por agotamiento de emisiones estimuladas (STED, por sus siglas en inglés) trabaja con dos rayos láser superimpuestos. El primero excita el marcador fluorescente a su estado excitado. El segundo se enfoca en agotar la fluorescencia de todas las moléculas excepto aquellas en la mitad del volumen de excitación. Consecuentemente, esto ocasiona que el volumen fluorescente se haga más pequeño que el límite de difracción (Alkahtani, Alghannam, Jiang, Almethen, *et al.* 2018). Para evitar este problema, se han utilizado NDs con centros de color de vacancia de nitrógeno debido a que poseen una fotoestabilidad a largo plazo, incluso para intensidades mayores. Utilizándolos se han obtenido resoluciones de 10 nm, lo que es incluso menor



que el tamaño de los NDs que oscilan entre 40 y 250 nm (Arroyo-Camejo *et al.*, 2013).

La fotoestabilidad es importante debido a que muchas de las moléculas en las células vivas deben ser estudiadas individualmente. No obstante, para este tipo de análisis se requieren moléculas que tengan alta sensibilidad y emitan fluorescencia sin signos de fotoblanqueo o parpadeo en largos períodos de tiempo con la finalidad de realizar un adecuado monitoreo de las células de interés (Vaijayanthimala y Chang, 2009). Al respecto, los FND han mostrado ser fotoestables después de excitaciones por 20 min a una densidad de 100 W/cm<sup>2</sup>, asimismo, han permitido un rastreo de células vivas por más de 200 s (Chang *et al.*, 2008).

Los centros NV son los más estudiados en los FNDs. No obstante, tienen ciertas limitaciones como la reducción de brillo, conforme el tamaño del ND cae debajo de 50 nm. Con la finalidad de que sean útiles para aplicaciones de imagen, los defectos tienen que ser óptica y termodinámicamente estables (Bradac *et al.*, 2009). Esto es relevante, dado que en las aplicaciones de bioimagen se requieren tamaños pequeños de partícula. Aunque los centros NV emiten fluorescencia entre 630 nm y 800 nm, permitiéndoles utilizarse en la ventana del infrarrojo cercano, son comúnmente excitados con láseres verdes, los cuales no penetran bien los tejidos, ya que los pueden calentar y fotodañar (Hegyi y Yablonovitch, 2013; Alkahtani, Alghannam, Jiang, Ramppersaud *et al.*, 2018). Además, esta banda de absorción puede resultar en auto-fluorescencia del fondo (Liu *et al.*, 2022). Por otro lado, este rango de fluorescencia limita su uso en el multiplexación, usada para generar datos utilizando múltiples probetas, debido a que sus emisiones se pueden sobreapilar a la de otros marcadores.

Es importante señalar que los NDs derivados de diamantes producidos por alta presión, alta temperatura, como los diamantes de nitrógeno tipo 1b, pueden empezar a emitir fluorescencia después de radiación de alta o baja energía (Boudou, Tisler *et al.*, 2013).

## Propiedades químicas

Los NDs son químicamente inertes, estabilidad coloidal, tienen una alta resistencia a líquidos corrosivos (HNO<sub>3</sub>, HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), alta gravedad específica (3.5 g/cm<sup>2</sup>), alta facilidad de funcionalización de la superficie (mediante métodos químicos, fotoquímicos, mecanoquímicos, enzimáticos y asistidos por plasma y láser), son resistentes a la radiación y ozono (Rodríguez Nuñez, 2012; Dolmatov, 2007). Además, suelen tener una coraza de carbono sp<sup>2</sup>, al igual que oxígenos y electrones libres en la superficie (Schrand, Hens y Shenderova, 2009). La coraza de carbono sp<sup>2</sup> es importante porque está asociada con la absorción de luz de los NDs (Usoltseva *et al.*, 2018).

Generalmente, los NDs contienen grupos carboxílicos en su superficie, que producen aglomeración de los mismos en las soluciones, por lo cual se ha trabajado en suprimir este tipo de interacciones hidrofóbicas utilizando

como estrategia la fluorinación de la superficie, lo cual también estabiliza los centros de vacancia de nitrógeno (Havlik *et al.*, 2016).

Los NDs se pueden agregar por razones fisicoquímicas. Los núcleos de detonación durante o posterior a su producción por detonación son muy difíciles de romper. Los núcleos de enlaces por ensambles de tipo van der Waals, y los electrones libres de las superficies forman grupos funcionales. Los grupos funcionales pueden interactuar por fuerzas van der Waals e interacciones dipolo-dipolo, así como enlaces de hidrógeno o reaccionar para crear enlaces covalentes entre las partículas principales, resultando en agregados al núcleo (Perevedentseva, Lin y Cheng, 2021).

Como se mencionó anteriormente, los NDs son químicamente inertes, pero su superficie puede ser funcionalizada químicamente (figura 3) para que pueda ser susceptible de interactuar con moléculas y células (Ikliftikawati *et al.*, 2021). Esto es posible debido a que la superficie de los NDs contiene enlaces no apareados asociados con átomos de carbono con grupos carboxílicos (Chang, Hsiao y Su, 2018). Las modificaciones se generan a través de reacciones de purificación de química húmeda combinada con tratamientos de gases a alta temperatura, o por medio de reacciones por radicales. No todas las moléculas en la superficie son exitosas, requiriéndose una deliberada funcionalización (Barnard, 2018). Por caso, se requieren funcionalizaciones con grupos carboxílicos para que los NDs puedan unirse a ácidos nucleicos anti-

**FIGURA 3.** Grupos para funcionalización de superficie de los NDs.

Grupo funcional	Fórmula	Grupo funcional	Fórmula
Cianida	$\text{C}=\text{N}-$	Imina	$\text{---N} \diagup$
Alcano	$\text{R} \quad \diagup \quad \diagdown$	Ester	$\text{---O} \diagup \quad \diagdown \text{R}$
Cetona	$\text{O} \quad \diagup \quad \diagdown \text{R}$	Éter	$\text{---O} \text{---R}$
Alcohol	$\text{HO} \text{---}$	Ácido carboxílico	$\text{---C}(=\text{O})\text{OH}$
Aldehido	$\text{H} \quad \diagup \quad \diagdown \text{O}$	Nitro	$\text{---M} \quad \diagup \quad \diagdown \text{V}$
Amida	$\text{O} \quad \diagup \quad \diagdown \text{H}_2\text{N}$	Peróxido	$\text{---O} \text{---O---R}$
Amina	$\text{H}_2\text{N} \text{---}$	Lactona	$\text{---C}(=\text{O})\text{---O---C}(=\text{O})\text{---}$
Carbonato ester	$\text{O} \quad \diagup \quad \diagdown \text{O}$		

Fuente: Jariwala, Patel y Waikar (2020).

genos y proteínas (Yu *et al.*, 2005; Chipaux *et al.*, 2018; Barnard, 2018). La funcionalización de superficie de los NDs se produce por la terminación inicial de la superficie y la inmovilización de grupos funcionales en los NDs. Posteriormente, se busca la unión vía covalente o no covalente para la homogeneización de la superficie (Jariwala, Patel y Waikar, 2020).

### Propiedades de biocompatibilidad

A diferencia de los metales, se considera que los nanomateriales basados en carbono, debido a su composición, deberían ser biocompatibles y menos tóxicos, pero cada tipo de partícula tiene diferentes niveles de toxicidad (Vaijayanthimala, 2009). Se mostró previamente que NDs de tamaños entre 2-10 nm no son tóxicos a través de su función mitocondrial y la morfología de la célula no se vio afectada por las partículas presentes. También tienen una facilidad de unirse a sustancias bioactivas como proteínas, DNA y mantener su funcionalización (Schrand, Hens y Shenderova, 2009; Zhang *et al.*, 2015).

Diferentes estudios han mostrado que formulaciones con NDs pueden apoyar la eficacia de fármacos contra el cáncer de mama (Martel-Estrada *et al.*, 2021) y la resistencia del hígado en modelos murinos, minimizando la toxicidad del hígado y la sistémica (Liu *et al.*, 2016).

La estabilidad fisicoquímica de los NDs en aplicaciones de imagen médica es considerada una ventaja, lo cual no ocurre en aplicaciones biológicas distintas, en donde una de las preocupaciones es la bioacumulación (Alkahtani, Alghannam, Jiang, Almethen *et al.*, 2018). Recientes investigaciones mostraron que las nanopartículas mayores a 8 nm pueden ser atrapadas en el tejido (Yu y Zheng, 2015). Afortunadamente, los NDs fluorescentes han sido reportado incluso en tamaños menores a 2 nm (Vlasov *et al.*, 2014).

La toxicidad de los NDs fluorescentes está relacionada con la pureza de su superficie. Los NDs producidos por detonación tienen altas propiedades antibacteriales (Alkahtani, Alghannam, Jiang, Almethen, *et al.*, 2018).

Se han transformado NDs no fluorescentes en fluorescentes con una modificación de superficie, agregando un fluorópоро contenido polímeros luminescentes (Liu *et al.*, 2017).

En resumen, los NDs pueden ser considerados materiales importantes debido a la química de su superficie, que influencia su emisión, interacciones y propiedades cuánticas. La tabla 3 resume algunas de las principales propiedades que han sido identificadas en este tipo de partículas.

### Aplicaciones de los NDs

En la figura 4 se muestran algunas de las posibles aplicaciones de los NDs. En general, lo predominante son las aplicaciones biomédicas, Sin embargo, también se pueden encontrar usos para materiales metálicos y cerámicos. La adición de ND permite aumentar la dureza y elasticidad de un abrasivo a base de diamantes hasta un 150% (Turcheniuk y Mochalin, 2017).



**TABLA 3.** Propiedades físicas de los NDs fluorescentes.

Propiedad	Algunas características reportadas en la literatura	Fuente
Ópticas	Puede emitir fotoluminiscencia roja brillante desde los centros de vacancia de nitrógeno construidos en la matriz del diamante (Hui <i>et al.</i> , 2017). Es decir, de la concentración de nitrógeno dependerá la intensidad de la fluorescencia. El espectro de absorción UV en agua muestra una banda centrada en la región 233 nm, la cual se atribuye a la absorción intrínseca de los NDs (transición $\sigma - \sigma^*$ ), y un pico alrededor de 276 nm que es atribuido a la transición $n - \pi^*$ del radical C = O.	Boudou, Tisle, <i>et al.</i> (2013); Raj y Manoj (2022).
Mecánicas	Se ha reportado que en los compuestos con NDs, utilizados como refuerzo en matrices poliméricas, hay aumentos del 375% en el módulo de Young.	Shuai <i>et al.</i> (2019)
Eléctricas	El ND ha mostrado que su constante dieléctrica a altas frecuencias es independiente, por lo que es un candidato ideal para dispositivos electrónicos de alta frecuencia con pequeñas pérdidas dieléctricas.	Raj y Manoj (2022).
Térmicas	La alta conductividad térmica de este material es debido a fuentes enlaces covalentes carbono-carbono. El comportamiento de la fluorescencia de los NDs ha mostrado ser dependiente de la temperatura, en un rango de temperatura ambiente. Con el aumento de la temperatura, el desplazamiento hacia el rojo en la posición cero de la línea de fonones, la reducción de la intensidad, la extensión en todo el ancho a la mitad del máximo y la disminución de la amplitud son los valores típicos.	Jing <i>et al.</i> (2021); Mashali <i>et al.</i> (2019).
Magnéticas	Los NDs con un solo centro NV pueden detectar campos magnéticos con una sensibilidad de los pocos nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ .	Maze <i>et al.</i> (2008).
Cristalinas	El espectro cristalino de los NDs muestra un pico en 440 que puede ser asignado al plano (111) de un diamante cúbico. También puede mostrar un pico alrededor de $2\theta = 27^\circ$ que corresponde al plano (002) del grafito. Otros picos característicos son a $74.9^\circ$ (220) y $91.1^\circ$ (311).	Raj y Manoj (2022); Mashali <i>et al.</i> (2019).
Raman	La espectroscopía Raman proporciona la información de la frecuencia de fonones de diferentes estructuras de carbono. El perfil característico Raman de los NDs muestra las siguientes bandas: 1,330 $\text{cm}^{-1}$ correspondiente a la estructura de los NDs que corresponde al enlace $\text{sp}^3$ de carbono. Los picos 1,428 $\text{cm}^{-1}$ (banda D) y 1,574 $\text{cm}^{-1}$ (banda G) son atribuidos $\text{sp}^2$ del carbono desordenado.	Raj y Manoj (2022); Mona <i>et al.</i> (2012).
Dispersabilidad	Han mostrado buena dispersabilidad en soluciones acuosas cuando se introducen grupos carboxílicos en su superficie.	Huang <i>et al.</i> (2019).
Biocompatibilidad	Se ha demostrado en modelos animales que los NDs fluorescentes no son tóxicos aplicados en cantidades de 75 mg/kg de peso corporal. Cuando ocurren grandes agregados, los NDs son internalizados a través de macropinocitosis.	Vaijayanthimala <i>et al.</i> (2012b).

Fuente: Elaboración de las autoras.

FIGURA 4. Aplicaciones de ND.



Fuente: Elaboración de las autoras.

### De los usos que se han encontrado para los NDs son:

- Abrasivos. Los materiales abrasivos actúan sobre otros materiales por medio de esfuerzos de corte, pulido, triturado, penetración etc. Al respecto, los NDs se han utilizado para obtener un pulido ultrafino en materiales que no contengan hierro, componentes ópticos, semiconductores, cerámicos, así como piezas de dispositivos mecánicos (Schwertfeger, Fokin y Schreiner, 2008). Algunas otras aplicaciones se muestran en la tabla 4.

TABLA 4. NDs utilizados en materiales abrasivos.

Material abrasivo	Características	Fuente
Poliacrilamida/NDs	Abrasivo con dispersión mejorada y una tasa de pulido superior a los NDs puros.	Ding et al. (2022).
Polvos de diamante nanocrystalino	El ND tenía una estructura porosa con superficie específica de 135 m <sup>2</sup> /g con propiedades de polvo abrasivo fino.	Yushin et al. (2005).
Almohadilla con polvos ultrafinos de ND	Se utilizó en obleas de silicio en una máquina de nanopulida con una rugosidad reducida a 0.402 nm.	Hu, Lu, y Xu (2012).
NDs modificados	Utilizados en el pulido de obleas de cuarzo mostrando una rugosidad promedio de 0.214 nm.	Zhu et al. (2004).
Silica con NDs	A partir de los experimentos, se aclara que la rugosidad de la superficie y la tasa de pulido exhiben valores máximos en la proporción de mezcla del 67% de sílica con NDs.	Suzuki et al. (2019).

Fuente: Elaboración de las autoras.

- Lubricantes. Un lubricante es una sustancia que se utiliza para evitar el contacto entre dos superficies. Los NDs han sido utilizados para reducir el coeficiente de fricción (20-30 %), aumentar la potencia de aceites y reducir sustancialmente el desgaste del par de fricción, así como aumentar la

vida útil de la herramienta entre 1.5 y 4.0 veces (tabla 5) (Kavirajan, 2009; Dolmatov, 2017).

**TABLA 5.** Aplicaciones de NDs en lubricantes.

Lubricante	Características	Fuente
Aceite lubricante comercial con NDs	Los lubricantes dispersados con NDs son capaces de reducir la pérdida por desgaste en metales, con mecanismos diferentes. La capacidad antidesgaste de las dispersiones para los aceros al carbono se mejora mediante la viscosidad de las suspensiones de NDs y la promoción de la tenacidad de la superficie de contacto debido a los NDs incrustados del lubricante. El mecanismo de desgaste de la aleación de aluminio se debe a la viscosidad de las suspensiones de NDs.	Chou y Lee (2010).
Ácido oléico con NDs	Ácido oléico con 0.05 % en peso de ND proporciona excepcionales propiedades de fricción y antidesgaste con una reducción del coeficiente de fricción del 23 %.	Lee <i>et al.</i> (2017).
Agua con NDs	Los NDs con agua permitieron una reducción de 70% y 88% en fricción y desgaste, respectivamente.	Mirzaamiri <i>et al.</i> (2021).
ND con líquido de parafina	El ND puede soportar la carga entre dos superficies deslizantes debido a su alto valor de dureza, así como dispersar el calor de fricción generado, permitiendo aumentar la vida útil frente al desgaste.	Kim <i>et al.</i> (2013).
Solución coloidal de glicerol con NDs	Se logra una superlubricidad (COF aproximadamente 0.006) entre acero y la solución de glicerol.	Chen, Liu y Luo (2016).

Fuente: Elaboración de las autoras.

- Recubrimientos. Los recubrimientos son acabados que se usan para aumentar la resistencia, durabilidad o bien la estética de materiales. Equipos como aeronaves, válvulas, pozos o bombas usadas en la industria química se recubren con composites de ND con metales (Cu, Zn, Sn, Au, Ag, Cr o Ni) para reducir la resistencia al desgaste de 4 a 9 veces además de aumentar la elasticidad; en recubrimientos de polímeros adicionados redujo la permeabilidad a solventes polares, se redujo además de crear resistencia a sales, ácidos y bases y mejorar la fuerza de adhesión del polímero a un metal (tabla 6) (Baidakova, 2007; Krueger, 2008).
- Compositos: se pueden agregar nanopartículas a cerámicos o polímeros para sintetizar composites que modifican las propiedades mecánicas y químicas como el aumento de elasticidad, fuerza y resistencia a la ruptura (Krueger *et al.*, 2008; Krueger, 2008; Xing *et al.*, 2011). Los NDs han demostrado estabilidad térmica superior, fuerte dureza y propiedades mecánicas (Zhang *et al.*, 2018). Algunas de las matrices en que ha sido utilizado se describen en la tabla 7.
- Adsorbentes y cromatografía: Los NDs han presentado alta sorción, por lo que pueden ser utilizados en diferentes aplicaciones de cromatografía y como adsorbentes (tabla 8). Como fase estacionaria en cromatografía

**TABLA 6.** Aplicaciones de NDs en recubrimientos.

Recubrimiento	Características	Fuente
Matriz de aluminio con 2% de NDs	Aumento del 96% en la microdureza. El coeficiente de fricción disminuye hasta un 35%.	Loganathan <i>et al.</i> (2021).
Recubrimientos de níquel con NDs	La adición de $5 \times 10^{-2}$ gdm <sup>-3</sup> de NDs es suficiente para aumentar la microdureza y la resistencia al desgaste.	Makarova <i>et al.</i> (2019).
Recubrimientos epóxicos con NDs	Nanopartículas de polianilina con NDs se incorporaron a recubrimientos epóxicos para mejorar el desempeño d a la corrosión.	Mohammadkhani <i>et al.</i> (2021).
Recubrimiento sol gel con NDs hidroxilados	La resistencia a la corrosión de aleaciones de magnesio fue enfatizada con cantidades de 0.01% de peso de NDs.	Nezamdoust, Seifzadeh y Habibi-Yangjeh (2020).

Fuente: Elaboración de las autoras.

**TABLA 7.** Aplicaciones de NDs en materiales compuestos.

Compósito	Características	Fuente
Poliacrilamida /NDs	Se produjo un compuesto abrasivo con mejor dispersión que con NDs puros. El material compuesto podría reducir la rugosidad superficial promedio de cerámica de circonio y la tasa de pulido era superior que con NDs puros.	Ding <i>et al.</i> (2022).
Poliamida /ND	Los NDs aumentaron la actividad antibacterial de las membranas, aumentando la inactivación y tasa de mortalidad de <i>Escherichia coli</i> . Estas membranas pueden ser aplicadas en aplicaciones de remediación de agua.	Karami <i>et al.</i> (2022).
Alcohol polivinílico con NDs por detonación con superficie modificada	Los NDs se dispersaron uniformemente en los materiales compuestos. El módulo de Young y el esfuerzo a la tensión aumentaron un 80 y 50%, respectivamente.	Soboleva <i>et al.</i> (2018).
Polipropileno /ND	Malla para hernias con un desempeño excepcional a largo plazo. Mostró significante reducción a la absorción de proteínas con baja respuesta inflamatoria.	Houshyar <i>et al.</i> (2020).
Polímero epóxico con NDs	Los materiales compuestos contenían grandes cantidades de NDs (25%), mostrando aumentos del 470% en el módulo de Young y 300% en la dureza.	Neitzel <i>et al.</i> (2011).
Ácido poliamino/ND	Los materiales compuestos mostraron una dispersabilidad en agua mejorada y baja toxicidad con prometedoras aplicaciones biomédicas.	Xu <i>et al.</i> (2018).

Fuente: Elaboración de las autoras.

iónica en la separación de hidrocarburos poliaromáticos, bencenos monocalinos, polimetilbencenos, entre otros (Yu, 2005; Fang *et al.*, 2009). Los NDs pueden ser utilizados en varios modos de cromatografía, incluyendo aquellos con alta temperatura y presión (Peristy *et al.*, 2014).

- Catalizadores: debido a su alta estabilidad química, fuerza mecánica y el tamaño de las partículas los NDs son buenos candidatos como portadores para catalizadores (tabla 9), especialmente catalizadores metálicos (plati-



**TABLA 8.** Usos de NDs como adsorbentes y en cromatografía.

Material	Características	Fuente
Microesfera de polies-tireno-divinilbenceno hibridada con NDs oxidados	Las microesferas preparadas tienen potencial como fase estacionaria de cromatografía líquida en condiciones de alta presión y pH extremo.	Huang <i>et al.</i> (2018).
Complejos de adsorción de ácido hialurónico y NDs	El mecanismo de adsorción incluye tanto la interacción electrostática como la formación de enlaces de hidrógeno entre los grupos funcionales de la superficie y las moléculas de agua adsorbidas.	Sinolits <i>et al.</i> (2021).
NDs sinterizados como fase estacionaria	Propiedades de un intercambiador catiónico débil. La selectividad de intercambio iónico obtenida fue similar a la de los intercambiadores de cationes de tipo carboxílico.	Nesterenko <i>et al.</i> (2007).

Fuente: Elaboración de las autoras.

**TABLA 9.** Uso de NDs en catalizadores.

Catalizador	Características	Fuente
ND por detonación tiolado	NDs utilizados como soporte de nanopartículas d para la reducción de reazurina.	Parker <i>et al.</i> (2021).
Metal / NDs por detonación	Un monometal o bimetal de níquel, cobre, rutenio o platino con NDs por detonación para la producción de hidrogeno a través de vapor de metanol y etanol.	Mironova <i>et al.</i> (2015).
Óxido de zinc decorado con NDs	Se obtuvo un material con actividad fotocatalítica y con resistencia a la fotocorrosión. Se propuso un mecanismo de reacción para la degradación fotocatalítica del tolueno.	Liu <i>et al.</i> (2019).
ND con superficie modificada	El material es capaz de mejorar la capacidad redox de la ferricianida de potasio (III) y el desempeño del ND para la activación de peroximonosulfato para producir sulfato y radicales.	Duan <i>et al.</i> (2016).

Fuente: Elaboración de las autoras.

no, paladio, cobre). Aunque bajo ciertas condiciones se ha demostrado que los ND pueden presentar actividades catalíticas (Shenderova y Ya, 2014).

- Líquidos refrigerantes. Los refrigerantes permiten bajar o regular la temperatura durante los procesos de operación de maquinaria (tabla 10). Al agregar 0.3% de ND se encontró que la conductividad térmica de un líquido aumentó más de 40%, al usarlo en un transformador se eliminaron fallas por sobrecalentamiento de aceite y la reducción general de la temperatura de operación (Davidson y Kang, 2005).
- Transporte de medicamento: algunas de las características más importantes que deben tener las partículas para poder ser utilizadas como transportadoras de medicamento son la biocompatibilidad, escalabilidad, estabilidad en ambientes biológicos y la funcionalidad de transportar una gran variedad de terapéuticos (tabla 11) (Man *et al.*, 2012).



**TABLA 10.** Aplicaciones de NDs en líquidos refrigerantes.

Refrigerante	Características	Fuente
Refrigerante R32	Se utilizó el refrigerante R32 con adición de 0.1 y 0.5% de NDs. Se obtuvo un aumento en la capacidad de enfriamiento de 5.0%.	Marcucci Pico et al. (2020).
Aceite refrigerante de olíbol éster con nanopartículas de diamante.	Se utilizaron concentraciones de 0.1% y 0.5% en sistemas de refrigeración de compresión de vapor aumentando la capacidad de enfriamiento y el coeficiente de desempeño.	Marcucci Pico et al. (2019).
Compositos de polí(etileno-alt-anhídrido maleico) con NDs	Son un material de forma estabilizada que tiene aplicaciones prometedoras en sistemas de refrigeración de enfriamiento solar.	Baştürk, Şen y Kahraman (2018).

Fuente: Elaboración de las autoras.

**TABLA 11.** Vehículos de NDs utilizados para el transporte de medicamento.

Vehículo	Características	Fuente
Complejo de doxorubicin con NDs	Este complejo aumenta significativamente la apoptosis e inhibe el crecimiento del tumor vs el modelo convencional de doxorubicin en tumores de hígado y mamarios en modelos murinos.	Chow et al. (2011).
Hidrogeles de NDs	Hidrogeles de NDs como vehículo de doxorubicin.	Huang et al. (2007).
Clúster de NDs dispersables en agua	Utilizados como vehículo de Purvalanol A, un compuesto utilizado en el tratamiento de hepatocarcinomas.	Chen et al. (2009).
NDs inmovilizados en la superficie de 800 Da polietileneimina	Vehículo utilizado como vectores para la liberación de genes <i>in vitro</i> , sin alta transferencia pero con citotoxicidad reducida.	Zhang et al. (2009).
Complejos de NDs para proteínas dependientes del pH	Complejo utilizado para la liberación de insulina unida no covalentemente a NDs por detonación vía adsorción física en medios dependientes del pH.	Shimkunas et al. (2009).
Compuesto de NDs / arabinogalactanos de mimoso tenuiflora y quitosana	Material utilizado en modelos <i>in vitro</i> para el tratamiento de cáncer de mama.	Martel-Estrada et al. (2021).

Fuente: Elaboración de las autoras.

## Aplicaciones de los NDs fluorescentes

Se han fabricado NDs fluorescentes con una buena permitividad dieléctrica y conductividad en un amplio rango de frecuencias a temperatura ambiente. En estos NDs, la excitación de fluorescencia es dependiente de la competencia y colaboración entre grupos OH y COOH (Raj y Manoj, 2022).

Se han propuesto los NDs como marcadores fotoestables para la investigación de líquidos comestibles. Debido a la estabilidad y biocompatibilidad del ND, puede ser aplicado en el monitoreo de las condiciones de productos alimenticios y en la detección de toxinas y patógenos (Głowacki et al., 2022).



Debido a las propiedades de sorción, superficie funcionalmente modificable, y a la baja toxicidad del carbono, se ha propuesto el uso de NDs como vehículo para derivados boronados de cloruro e6 (Ce6) a células de carcinoma epidermoide humano A431. La modificación de la superficie del ND por la transferrina permite aumentar la eficiencia de la inactivación fotodinámica de las células cancerosas (Gvozdev *et al.*, 2021).

Debido a que los NDs de vacancia de nitrógeno exhiben fotoestabilidad infinita y una excelente biocompatibilidad han sido explorados para ser utilizados como fluoroporos en el rastreo de receptores VEGF en tumores en crecimiento (Torelli *et al.*, 2019).

Se han utilizado NDs fluorescentes verdes como marcadores y/o etiquetas celulares. Este tipo de NDs contiene una alta concentración de centros N-V-N (o H3). Este tipo de centros emite luz verde al ser iluminados con un láser azul de 488 nm. Este material fue probado en microscopía de fluorescencia confocal y citometría de flujo de partículas en células HeLa a través de endocitosis (Wee *et al.*, 2009). NDs similares con centro de color de vacancia de nitrógeno de 30 nm han sido comparados con las propiedades de fotoluminiscencia de un pigmento de cianina. Se encontró que un centro simple de color NV en un ND y un pigmento simple Cy3 muestran la máxima luminiscencia (Faklaris *et al.*, 2010).

Se han utilizado NDs producidos a través de carbono negro. El ND podía emitir luz visiblemente después de una pasivación de superficie. Este tipo de NDs tiene un uso prometedor en bioimagen y biomedicina (Hu *et al.*, 2009).

En este sentido, NDs con tamaño menor a 50 nm han sido utilizados como nanoprobetas fotoluminiscentes como estables emisores de punto, en microscopios de campo cercano para mejorar la resolución especial (Cuche *et al.*, 2009).

Algunos autores han estudiado la estabilidad y la biocompatibilidad de los NDs fluorescentes producidos por irradiación de iones, en modelos de rata utilizando inyecciones intraperitoneales en períodos de cinco meses. Estos autores confirmaron la no toxicidad del material en ratas. Las partículas contenían partículas cargadas negativamente con vacantes de nitrógeno (NV-) (Vaijayanthimala *et al.*, 2012a).

El uso de los NDs fluorescentes es limitado si no hay una modificación de superficie como bioprobetas o biosensores, debido principalmente a que las partículas se precipitan en soluciones biológicas, se pueden adherir proteínas no específicas a su superficie, y a que la modificación directa de la superficie de los NDs es limitada (Rehor, Mackova *et al.*, 2014; Rehor, Slegrová *et al.*, 2014). Una de las técnicas más utilizadas para la detección de moléculas o partículas es la fluorescencia inducida por láser. No obstante, esta técnica está limitada debido a que otros componentes como las flavinas, dinucleótidos nicotinamida adenina, colágenos y porfirinas producen alta fluorescencia, ya que estas biomoléculas típicamente absorben luz en longitudes de onda en el rango de 300-500 nm y su fluorescencia ocurre a 400-

550 nm. Para evitar esta interferencia, una prueba con buena fluorescencia debería absorber luz a una longitud de onda de 500 nm y emitir luz a no más de 600 nm. En este caso, los NDs con vacancia (N-V)- absorben fluorescencia fuertemente a aproximadamente 560 nm y emiten eficientemente a aproximadamente 700 nm. Esto les da las habilidades, a los NDs, de ser utilizados para monitorear partículas individuales sin ser tóxicos (Fu, 2007). En experimentos desarrollados con diamante en bulto rico en nitrógeno, se logró crear un defecto NV por cada 100 vacancias, dado un total de 0.16 NV por 10 nm de diámetro del nanocrystal. De estos cristales, un 35% contiene un centro de defecto fluorescente (Tisler *et al.*, 2009). Se ha reportado que la sección de absorción en el centro de la banda se encuentra en el rango de  $5 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ , con una eficiencia cuántica de  $\phi \sim 1$ , con una vida media de 11.6 ns a temperatura ambiente, en los cuales un diamante cristalino tipo 1b, con alrededor de 100 ppm nitrógeno es irradiado con una alta energía de aproximadamente 2 MeV con un rayo de electrones y subsecuentemente recocido a 800 °C (Yu 2005).

De igual manera, se han utilizado NDs recubiertos con corazas poliméricas, lo que les permite mejorar la estabilidad coloidal y reducir la absorción de proteínas de la sangre (Rehor, Slegerova *et al.*, 2014).

Otros estudios han mostrado compositos de NDs fluorescentes con polímero (ácido L-láctico) para la ingeniería de huesos donde se logró una dispersión uniforme y una buena afinidad con las nanopartículas, al igual que producir un compósito no tóxico a osteoblastos murinos (Zhang *et al.*, 2011).

Estos tipos de defectos hacen a las partículas más sensibles a señales débiles de campos magnéticos por lo cual ha sido posible usarlas para monitoreo de proteínas y ácidos nucleicos con una resolución a escala nanométrica, con estas técnicas se pueden comprender la estructura y la dinámica de las proteínas (Alkahtani, Alghannam, Jiang, Almethen *et al.*, 2018; Zhu *et al.*, 2015).

A pesar de que los NDs con fluorescencia roja se suelen agregar en el citoplasma, se ha demostrado la detección de partículas aisladas dentro de la célula, que presentaron una fotoestabilidad continua durante 20 minutos con un voltaje bajo. (Chen *et al.*, 2010).

Dentro de la microscopía e imágenes biomédicas, gracias a su bajo costo de producción, baja o nula toxicidad y facilidad de modificación de superficie, se ha permitido el desarrollo de: microscopía de reducción de emisión estimulada (STED) y otras técnicas de resolución de subdifracción, microscopía fluorescente confocal de alta resolución, magnetometría a nanoescala, resonancia magnética, tomografía computarizada, tomografía por emisión de positrones, además de abrir la posibilidad de integrar diagnósticos con terapia en el futuro (Hegyi y Yablonovitch, 2013; Rittweger *et al.*, 2009; Taylor *et al.*, 2017).

Una de las limitaciones de los NDs es la dificultad que presentan para excitar y detectar la emisión de los NDs fluorescentes a través de la piel y el te-

jido debido a la autofluorescencia. Este fenómeno ocurre en las biomoléculas *in vivo* debajo de 700 nm. Debido a que la mayor parte de la emisión de los NDs ocurre debajo de este nivel, hay un significativo ruido de fondo que es difícil de eliminar por lo cual se ha mejorado con modulación magnética selectiva (Sarkar *et al.*, 2014).

Al respecto se han utilizado plataformas de biopolímeros con una gran cantidad de residuos aminos para utilizarlos como vehículos de NDs en conjunto con doxorrubicin. Este tipo de arreglos han permitido el monitoreo del doxorrubicin en las células debido a la fluorescencia del ND, permitiendo mejorar la bioimagen de una molécula simple *in vivo* (Wu *et al.*, 2015).

Los NDs han sido considerados un material teranóstico (Liu *et al.*, 2016). Es decir, un material que tiene cualidades terapéuticas y diagnósticas. Una de las limitaciones de los NDs fluorescentes es que tienen bajo contraste en microscopía electrónica incluyendo SEM y TEM. No obstante, se han realizado nanopartículas híbridas, con partículas metálicas para permitir la imagen multimodal y lograr una adecuada resolución (Liu *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2016; Kausar, 2015; Cheng *et al.*, 2013; Aramesh *et al.*, 2014).

A pesar de las limitaciones de los NDs, se debe considerar que la detección de los mismos por fotoluminiscencia es fácil de implementar en diferentes escalas, y permite una detallada estimación de la biodistribución a nivel celular y subcelular (Eidi *et al.*, 2015).

## Métodos de caracterización de los NDs

Los métodos de caracterización para estudiar a los NDs en general están determinados por la necesidad de estimar el tamaño promedio de los agregados o clústeres de NDs y su tamaño, la tasa de hibridación de los átomos de carbono en el clúster  $sp^2/sp^3$ , y la presencia y tipo de impurezas en el bullo y en la superficie de los NDs (Baidakova, 2007).

### Microscopía de fuerza atómica

Ha sido empleada para determinar el tamaño promedio de las partículas. La microscopía de fuerza atómica utilizada en modo de contacto o repiqueo (*tapping mode*), donde el láser estimula la viga cerca de su frecuencia resonante, causando que la punta resuene. Dado que los NDs son comúnmente simétricos, la medición de la altura permite validar su tamaño (Raj y Manoj, 2022; Passeri *et al.*, 2013; Gaebel *et al.*, 2012). En este sentido, se ha reportado que la altura mínima en la cual un ND tiene un centro con vacancia de nitrógeno estable es 8 nm (Gaebel *et al.*, 2012).

### Microscopía electrónica de barrido

Esta microscopía permite identificar la topografía de superficie y la estructura de los NDs, así como sus procesos de nucleación (Mortet *et al.*, 2005). Habitualmente, este tipo de microscopía se utiliza para investigar la distribución de

tamaño y las densidades de las aglomeraciones de NDs. Se utilizan suspensiones de NDs dispersas en obleas de silicio (figura 5) (Shalaginov *et al.*, 2011).

**FIGURA 5.** Preparación de muestras para evaluación en microscopía electrónica SEM.



Fuente: Shalaginov *et al.* (2011). Elaborada con Biorender.

### Difracción por rayos X

Investigadores reportan la caracterización de los NDs detectando su naturaleza mono y policristalina. Se reportan fases del diamante como la del diamante cúbico (1 1 1), lonsdaleita (0 0 2), y lonsdaleita (1 0 0) (Raj y Manoj, 2022). Otros investigadores reportan patrones de difracción correspondientes a los picos  $2\theta = 43.5, 75$  y  $90.5^\circ$  asignados a los planos (1 1 1), (2 2 0) y (3 1 1) del diamante. De la misma manera, es habitual que se localice una reflexión en  $2\theta = 26.6^\circ$  que puede ser asignada al plano (2 0 0) del grafito (Lee y Lim, 2004).

### Raman

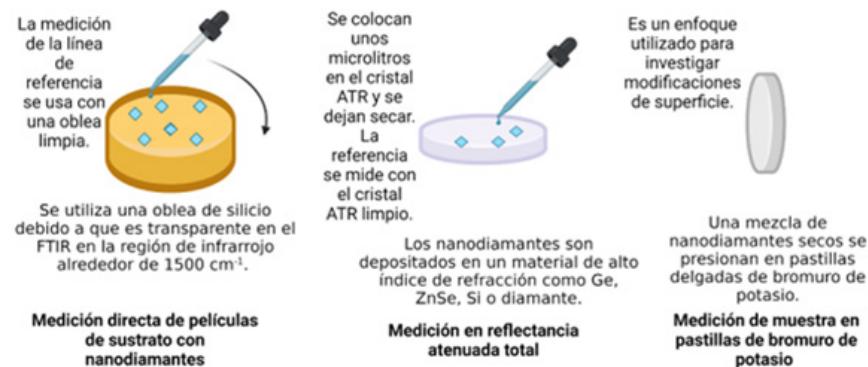
La espectroscopía es un enfoque no destructivo que detecta estructuras cristalinas y determina su calidad y composición. Trabaja por medio de la luz estratificada de modos vibracionales Raman de moléculas activas. Permite identificar las fases del diamante, su estructura, composición y funcionalización de superficie (Raj y Manoj, 2022). Generalmente, en los NDs se visualizan bandas entre  $1,500$  y  $1,800 \text{ cm}^{-1}$ , que se originan de vibraciones de flexión ya sea en los grupos funcionales de la superficie o bien en el agua absorbida con contribuciones que se originan del carbono  $\text{sp}^2$  y las vibraciones de estiramiento C = O (Mochalin, Osswald y Gogotsi, 2009). Además, se ha demostrado que el pico ancho alrededor de  $1,250 \text{ cm}^{-1}$  corresponde a un vector de onda de fonones ópticos confinados (Osswald *et al.*, 2009).

### Infrarrojo por transformada de Fourier

Es utilizado para estudiar los grupos funcionales unidos al ND (Raj y Manoj, 2022). Es un método habitual de caracterización debido a que tiene una alta

sensibilidad a los grupos funcionales de superficie de los NDs, tiene una naturaleza no destructiva y, generalmente, tiene una fácil preparación de muestras (figura 6) (Petit y Puskar, 2018).

**FIGURA 6.** Métodos de preparación de muestras utilizados en la caracterización de NDs.



Fuente: Petit y Puskar (2018). Elaborado con Biorender.

## Calorimetría diferencial de barrido

Se utiliza para estudiar el flujo de calor respecto al tiempo. En el caso de los NDs, los termogramas muestran dos picos, cada uno correspondiente a las reacciones endotérmicas y exotérmicas indicando, respectivamente, la absorción de agua y la reacción del oxígeno presente en el ND (Raj y Manoj, 2022). Este método se ha utilizado para distinguir los estados de agregación en muestras húmedas y secas de NDs. Se ha encontrado una fuerte correlación entre los datos otorgados por la dispersión dinámica de la luz para coloides y los parámetros del DSC (Korobov *et al.*, 2013).

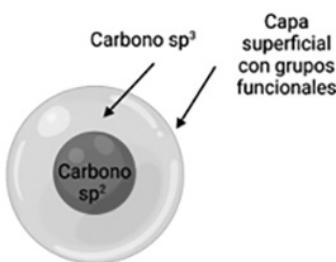
## Potencial zeta y dispersión dinámica de la luz

La estabilidad de los NDs en un fluido es una propiedades de interés. Esta propiedad puede ser medida por medio de la movilidad electroforética de las partículas utilizando la denominada ecuación de Henry, usando equipos de dispersión dinámica de la luz (Su *et al.*, 2019). Para este fin se han utilizado equipos como el Malvern Zetasizer Nano ZS (Mashali *et al.*, 2019) y el Nanodrop. Un alto potencial zeta significa que existen barreras para la aglomeración de las partículas y una solución coloidal con un valor de potencial zeta de más de 30mV o menos que -30mV es considerado un coloide estable (Ghadimi, Saidur y Metselaar, 2011). Las mediciones realizadas en dispersión dinámica de la luz permiten identificar el tamaño de las partículas y confirmar la distribución del mismo (Su *et al.*, 2019; Day *et al.*, 2019).

## Resonancia magnética nuclear

Por medio de esta caracterización se ha logrado entender que el ND está compuesto de tres partes (figura 7). La parte central o núcleo contiene carbono hibridizado  $sp^3$ . La coraza del núcleo está compuesta por carbono  $sp^2$  tipo grafeno. Los átomos de carbono localizados en la superficie externa están unidos a átomos de hidrógeno y oxígeno dándoles una gran variedad de grupos funcionales que saturan los enlaces. Esta estructura es la que estabiliza al ND (Baidakova, 2007). El carbono hibridizado  $sp^3$  está protonado o unido a grupos OH, mientras que el carbono  $sp^2$  forma alrededor del 1% del material (Fang *et al.*, 2009).

**FIGURA 7.** Estructura del ND de acuerdo a como es sugerido por los resultados de resonancia magnética nuclear.



Fuente: Dhanak *et al.* (2012); Fang *et al.* (2009). Elaborado con Biorender.

## Espectroscopía óptica de absorción

Esta técnica permite caracterizar NDs, soluciones acuosas de los mismos y películas. La absorción de luz de los NDs en la región óptica está asociada con la presencia de carbono  $sp^2$ , especialmente si es desintegrado por el proceso de molido. Además, está asociado con las impurezas, incluyendo nitrógeno, silicio, oxígeno, hidrógeno y varios metales. Por esto, este tipo de espectroscopía en combinación con modalidades de fluorescencia es usado para la caracterización de NDs con vacante de nitrógeno (Usoltseva *et al.*, 2018). El *bandgap* del ND es 2.06 eV en contraste con el del diamante que es de 5.5 eV. La absorción óptica del diamante es alrededor de 225 nm. En cambio, en el caso de los NDs, la absorbancia depende del número de defectos tipo A. Un defecto tipo A puede ser medido alrededor 303-309 nm (Volkov *et al.*, 2012).

## Espectroscopía de fotoelectrones por rayos X

Esta caracterización permite identificar la química de superficie de los NDs (Norouzi *et al.*, 2020). A través de este tipo de caracterización se ha descubierto que las proporciones de átomos de carbono son de 46.4 a 67.8% en el estado de hibridación  $sp^3$ , y del 26.8 al 17.4% en el estado de hibridación  $sp^2$  y del 26.7 y 14.7% en la composición de grupos funcionales que contienen oxígeno (Sharin, Sivtseva y Popov, 2021). Este tipo de caracterización ha permitido identificar los picos característicos del carbono  $sp^3$  del ND en 287 eV, en-

contrario que contiene muy pocas impurezas de grafito (Dhanak *et al.*, 2012). Una de las ventajas de esta caracterización es que la preparación de muestras es muy sencilla y solo implica el uso de una gota de solución acuosa en un portamuestras de cobre de alta pureza (99.9%), secada al aire.

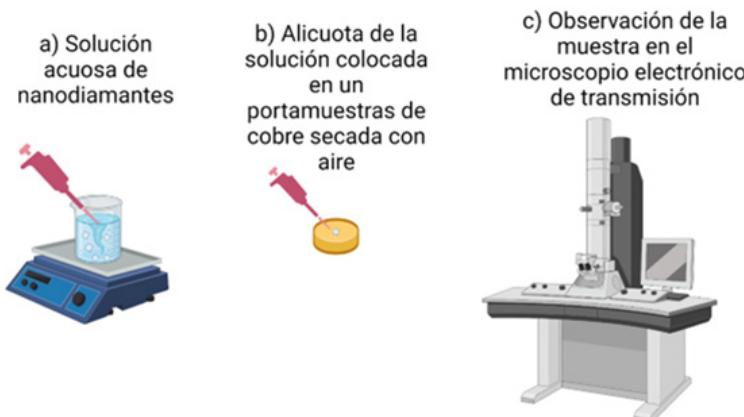
### Microscopía confocal

Se utilizó para observar NDs con centros NV dentro de células. Con la finalidad de determinar su localización subcelular, las nucleoporinas con repetición de finalalanina-glicina (FG), y componentes de poro nuclear (NPC) se visualizaron con tinción de inmunofluorescencia indicadas con color verde. Mientras tanto, el color rojo que proviene de los centros NV indicaba NDs (Ikliptikawati *et al.*, 2021). Del mismo modo, las imágenes confocales de fluorescencia permiten observar la distribución de NDs en piel y analizar su penetración. Se utiliza una excitación de 532 nm para detectar señales de los centros NV- de los NDs en el rango de 650-720 nm (Perevedentseva *et al.*, 2019).

### Microscopía electrónica de transmisión

Permite ver la morfología de las muestras y tamaño de los NDs (Su *et al.*, 2019). Con la finalidad de evitar transformaciones alotrópicas de materiales de carbono, se reduce la intensidad del haz. Usualmente se utiliza acoplado con un analizador por energía dispersiva de rayos X para analizar la composición elemental. La preparación de las muestras es sencilla, se utiliza una alícuota de la solución acuosa de NDs (Raj y Manoj, 2022), que se coloca sobre un portamuestras que se seca con aire antes del análisis con el microscopio (Boudou, Tisler *et al.*, 2013). Es importante mencionar que la forma esférica que se asume de los NDs está basada en las imágenes de TEM obtenidas sin alta magnificación o sin aislar una de la otra, lo que hace difícil definir su forma (figura 8) (Baidakova, 2007).

**FIGURA 8.** Preparación de muestras para microscopía óptica de transmisión de acuerdo con Boudou, Tisler *et al.* (2013).



Fuente: Boudou, Tisler *et al.* (2013). Elaborado con Biorender.

## Conclusiones

Los NDs de carbono son una forma alotrópica metaestable del carbono con los átomos arreglados en una variación de la estructura cristalina cúbica entramada centrada en la cara. Los NDs poseen propiedades luminiscentes fotostables de gran importancia para aplicaciones médicas. Las propiedades de fluorescencia se deben a defectos de vacancias como las de nitrógeno, silicio, germano, estaño, níquel y demás. NDs fluorescentes cada vez se hacen más presentes en campos como la medicina, la bioingeniería y la nanotecnología. Gracias a sus propiedades químicas, biológicas y sobre todo ópticas abren las posibilidades de aplicaciones en esas áreas. A pesar de las diversas aplicaciones de los NDs, algunos de los retos que todavía tienen en la dispersabilidad se deben a que tienden a aglomerarse en soluciones. Por otro lado, tienen bajo contraste en microscopía electrónica.

Otro reto que se ha presentado en las aplicaciones biomédicas es que los NDs con tamaños mayores a 8 nm pueden llegar a quedar atrapados en tejido, mientras que las partículas con tamaños menores son eliminadas rápidamente mediante el hígado y los riñones. Esta dificultad genera la necesidad de investigar cuáles son los tamaños de NDs que pueden ser utilizados sin efectos dañinos.

Finalmente, el reto más grande al que se enfrentan los NDs fluorescentes es la ausencia de un método de síntesis con el cual se puedan obtener partículas con tamaños homogéneos, defectos cristalográficos funcionales en el núcleo y la homogeneidad de su superficie.

## Referencias

- Alkahtani, Masfer H., Fahad Alghannam, Linkun Jiang, Abdulrahman Almethen, Arfaan A. Rampersaud, Robert Brick, Carmen L. Gomes, Marlan O. Scully y Philip R. Hemmer. (2018). Fluorescent nanodiamonds: past, present, and future. *Nanophotonics*, 7(8): 1423-1453. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2018-0025>.
- Alkahtani, Masfer H., Fahad Alghannam, Linkun Jiang, Arfaan A. Rampersaud, Robert Brick, Carmen L. Gomes, Marlan O. Scully y Philip R. Hemmer. (2018). Fluorescent nanodiamonds for luminescent thermometry in the biological transparency window. *Optics Letters*, 43(14): 3317-3320. <https://doi.org/10.1364/OL.43.003317>.
- Aramesh, Morteza, Jiri Cervenka, Ann Roberts, Amir Djalalian-Assl, Ranjith Rajsekharan, Jinghua Fang, Kostya Ostrikov y Steven Prawer. (2014). Coupling of a single-photon emitter in nanodiamond to surface plasmons of a nanochannel-enclosed silver nanowire. *Optics express*, 22(13):15530-15541. <https://doi.org/10.1364/OE.22.015530>.
- Arroyo-Camejo, Silvia, Marie-Pierre Adam, Mondher Besbes, Jean-Paul Hugonin, Vincent Jacques, Jean-Jacques Greffet, Jean-François Roch, Stefan W. Hell y François Treussart. (2013). Stimulated emission depletion microscopy resolves individual nitrogen vacancy centers in diamond nanocrystals. *ACS Nano*, 7(12): 10912-10919. <https://doi.org/10.1021/nn404421b>.



- Badziag, P., W. S. Verwoerd, W. P. Ellis y N. R. Greiner. (1990). Nanometre-sized diamonds are more stable than graphite. *Nature*, 343(6255): 244-245.
- Baidakova, M. V., Yu A. Kukushkina, A. A. Sitnikova, M. A. Yagovkina, D. A. Kirilenko, V. V. Sokolov, M. S. Shestakov, A. Ya Vul', B. Zousman y O. Levinson. (2013). Structure of nanodiamonds prepared by laser synthesis. *Physics of the Solid State*, 55(8): 1747-1753. <https://doi.org/10.1134/S1063783413080027>.
- Baidakova, Marina. (2007). New prospects and frontiers of nanodiamond clusters. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(20): 6300. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/20/S14>.
- Barnard, A. S. (2018). Predicting the impact of structural diversity on the performance of nanodiamond drug carriers. *Nanoscale*, 10(19): 8893-8910. <https://doi.org/10.1039/C8NR01688G>.
- Basso, Luca, Massimo Cazzanelli, Michele Orlandi y Antonio Miotello. (2020). Nanodiamonds: synthesis and application in sensing, catalysis, and the possible connection with some processes occurring in space. *Applied Sciences*, 10(12): 4094.
- Baştürk, Emre, Ferhat Şen y Memet Vezir Kahraman. (2018). Enhanced thermal and hydrophobic surface properties of shape-stabilized nanodiamond/fatty alcohol grafted poly(ethylene-alt-maleic anhydride) composite phase change materials. *Polymer Composites*, 39(6): 1887-1895. <https://doi.org/10.1002/pc.24145>.
- Berdichevskiy, Gregory M., Lubov V. Vasina, Sergei V. Ageev, Anatolii A. Meshcheriakov, Mikhail A. Galkin, Robert R. Ishmukhametov, Alexei V. Nashchekin, Demid A. Kirilenko, Andrey V. Petrov, Sofia D. Martynova, Konstantin N. Semenov y Vladimir V. Sharoyko. (2021). A comprehensive study of biocompatibility of detonation nanodiamonds. *Journal of Molecular Liquids*, 332: 115763. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115763>.
- Bilal, Muhammad, Hairong Cheng, Reyna Berenice González-González, Roberto Parra-Saldívar y Hafiz M. N. Iqbal. 2021. Bio-applications and biotechnological applications of nanodiamonds. *Journal of Materials Research and Technology*, 15: 6175-6189. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.037>.
- Boudou, J. P., P. A. Curmi, F. Jelezko, J. Wrachtrup, P. Aubert, M. Sennour, G. Balasubramanian, R. Reuter, A. Thorel y E. Gaffet. (2009). High yield fabrication of fluorescent nanodiamonds. *Nanotechnology*, 20(23): 235602. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/20/23/235602>.
- Boudou, Jean-Paul, Julia Tisler, Rolf Reuter, Alain Thorel, Patrick A. Curmi, Fedor Jelezko y Joerg Wrachtrup. (2013). Fluorescent nanodiamonds derived from HPHT with a size of less than 10nm. *Diamond and Related Materials*, 37: 80-86. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2013.05.006>.
- Boudou, Jean-Paul, Marie-Odile David, Vandana Joshi, Housam Eidi y Patrick A. Curmi. (2013). Hyperbranched polyglycerol modified fluorescent nanodiamond for biomedical research. *Diamond and Related Materials*, 38: 131-138.
- Bradac, Carlo, Torsten Gaebel, Nishen Naidoo, James R. Rabeau y Amanda S. Barnard. (2009). Prediction and measurement of the size-dependent stability of fluorescence in diamond over the entire nanoscale. *Nano Letters*, 9(10): 3555-3564. <https://doi.org/10.1021/nl9017379>.

- Budama-Kilinc, Yasemin, Burak Ozdemir, Tolga Zorlu, Bahar Gok y Abdurrahim Can Egil. (2020). Chapter 2 - Nanobiomaterials for neural regenerative medicine. En Mehdi Razavi (ed.), *Neural Regenerative Nanomedicine*, 25-45. Academic Press.
- Butler, James E. y Anirudha V. Sumant. (2008). The CVD of nanodiamond materials. *Chemical Vapor Deposition*, 14(7-8): 145-160. <https://doi.org/10.1002/cvde.200700037>.
- Claveau, S., J. R. Bertrand y F. Treussart. (2018). Fluorescent nanodiamond applications for cellular process sensing and cell tracking. *Micromachines (Basel)*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/mi9050247>.
- Cuche, Aurélien, Yannick Sonnega, Orestis Faklaris, Damien Garrot, Jean-Paul Bou-dou, Thierry Sauvage, Jean-François Roch, François Treussart y Serge Huant. (2009). Diamond nanoparticles as photoluminescent nanoprobe for biology and near-field optics. *Journal of Luminescence*, 129(12): 1475-1477. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2009.04.089>.
- Chang, C., Y. Lin, Y. Lin, Z. Lin y C. Cheng. (2019). Nanodiamond as a fluorescent probe for image-guided application and toxicity evaluations in 2D- and 3D- cellular models. *Journal of Biotechnology*, 305: S25. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2019.05.097>.
- Chang, Huan-Cheng, Wesley Wei-Wen Hsiao y Meng-Chih Su. (2018). *Fluorescent nanodiamonds*. John Wiley & Sons.
- Chang, Y. R., H. Y. Lee, K. Chen, C. C. Chang, D. S. Tsai, C. C. Fu, T. S. Lim, Y. K. Tzeng, C. Y. Fang, C. C. Han, H. C. Chang y W. Fann. (2008). Mass production and dynamic imaging of fluorescent nanodiamonds. *Nat Nanotechnol*, 3(5): 284-8. <https://doi.org/10.1038/nnano.2008.99>.
- Chauhan, Swati, Neha Jain y Upendra Nagaich. (2020). Nanodiamonds with powerful ability for drug delivery and biomedical applications: Recent updates on in vivo study and patents. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 10(1): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jpha.2019.09.003>.
- Chen, ChengKe, YingShuang Mei, JinMing Cui, Xiao Li, MeiYan Jiang, ShaoHua Lu y XiaoJun Hu. (2018). Man-made synthesis of ultrafine photoluminescent nanodiamonds containing less than three silicon-vacancy colour centres. *Carbon*, 139: 982-988. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.08.013>.
- Chen, Mark, Erik D. Pierstorff, Robert Lam, Shu-You Li, Houjin Huang, Eiji Osawa y Dean Ho. (2009). Nanodiamond-mediated delivery of water-insoluble therapeutics. *ACS Nano*, 3(7): 2016-2022. <https://doi.org/10.1021/nn900480m>.
- Chen, Mark, Xue-Qing Zhang, Han B. Man, Robert Lam, Edward K. Chow y Dean Ho. (2010). Nanodiamond vectors functionalized with polyethylenimine for siRNA delivery. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 1(21): 3167-3171. <https://doi.org/10.1021/jz1013278>.
- Chen, Zhe, Yuhong Liu y Jianbin Luo. (2016). Superlubricity of nanodiamonds glycerol colloidal solution between steel surfaces. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 489: 400-406. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.10.062>.
- Cheng, Liang-Chien, Hao Ming Chen, Tsung-Ching Lai, Yung-Chieh Chan, Ru-Shi Liu, James C. Sung, Michael Hsiao, Chung-Hsuan Chen, Li-Jane Her y Din Ping Tsai.

- (2013). Targeting polymeric fluorescent nanodiamond-gold/silver multi-functional nanoparticles as a light-transforming hyperthermia reagent for cancer cells. *Nanoscale*, 5(9): 3931-3940. <https://doi.org/10.1039/C3NR34091K>.
- Chipaux, M., K. J. van der Laan, S. R. Hemelaar, M. Hasani, T. Zheng y R. Schirhagl. (2018). Nanodiamonds and their applications in cells. *Small*, 14(24): e1704263. <https://doi.org/10.1002/smll.201704263>.
- Chou, Chau-Chang y Szu-Hsien Lee. (2010). Tribological behavior of nanodiamond-dispersed lubricants on carbon steels and aluminum alloy. *Wear*, 269(11): 757-762. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.08.001>.
- Chow, Edward K., Xue-Qing Zhang, Mark Chen, Robert Lam, Erik Robinson, Houjin Huang, Daniel Schaffer, Eiji Osawa, Andrei Goga y Dean Ho. (2011). Nanodiamond therapeutic delivery agents mediate enhanced chemoresistant tumor treatment. *Science translational medicine*, 3(73): 73ra21-73ra21.
- Chung, P. H., E. Perevedentseva y C. L. Cheng. (2007). The particle size-dependent photoluminescence of nanodiamonds. *Surface Science*, 601(18): 3866-3870. <https://doi.org/10.1016/j.susc.2007.04.150>.
- Danilenko, Vycheslav y Olga A Shenderova. (2012). Advances in synthesis of nanodiamond particles. *Ultrananocrystalline diamond: synthesis, properties and applications*, 2a ed., 133-164.
- Davidson, J. L. y W. P. Kang. (2005). Applying CVD diamond and particulate nanodiamond. In *Synthesis, Properties and Applications of Ultrananocrystalline Diamond*, 357-372. Springer.
- Day, Adam H., Samuel J. Adams, Laia Gines, Oliver A. Williams, Benjamin R. G. Johnson, Ian A. Fallis, E. Joel Loveridge, Gurmit S. Bahra, Petra C. F. Oyston, Juan Manuel Herrera y Simon J. A. Pope. (2019). Synthetic routes, characterization and photo-physical properties of luminescent, surface functionalized nanodiamonds. *Carbon*, 152: 335-343. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.05.081>.
- Decarli, P. S. y J. C. Jamieson. (1961). Formation of diamond by explosive shock. *Science*, 133(3467): 1821-2. <https://doi.org/10.1126/science.133.3467.1821>.
- Dhanak, V. R., Y. V. Butenko, A. C. Brieva, P. R. Coxon, L. Alves y L. Siller. (2012). Chemical functionalization of nanodiamond by amino groups: an X-ray photoelectron spectroscopy study. *J Nanosci Nanotechnol*, 12(4): 3084-90. <https://doi.org/10.1166/jnn.2012.4547>.
- Ding, Ruyue, Hong Lei, Lei Xu y Yi Chen. (2022). Surface planarization of zirconia ceramic achieved by polyacrylamide grafted nanodiamond composite abrasives through chemical mechanical polishing. *Ceramics International*. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.03.265>.
- Ditalia Tchernij, Sviatoslav, Emilio Corte, Tobias Lühmann, Paolo Traina, Sébastien Pezzagna, Ivo Pietro Degiovanni, Georgios Provatas, Ekaterina Moreva, Jan Meijer, Paolo Olivero, Marco Genovese y Jacopo Forneris. (2021). Spectral features of Pb-related color centers in diamond – a systematic photoluminescence characterization. *New Journal of Physics*, 23(6): 063032. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/ac038a>.
- Dolmatov, Valerii Y. (2017). Chapter 15 - Detonation nanodiamonds in oils and lubri-



- cants. En Jean-Charles Arnault (ed.), *Nanodiamonds*, 391-402. Elsevier.
- Dolmatov, Valerii Yu. (2007). Detonation-synthesis nanodiamonds: synthesis, structure, properties and applications. *Russian Chemical Reviews*, 76(4): 339. <https://doi.org/10.1070/RC2007v07n04ABEH003643>.
- Dong, Jiande, Ruming Jiang, Hongye Huang, Junyu Chen, Jianwen Tian, Fengjie Deng, Yanfeng Dai, Yuanqing Wen, Xiaoyong Zhang y Yen Wei. (2020). Facile preparation of fluorescent nanodiamond based polymer nanoparticles via ring-opening polymerization and their biological imaging. *Materials Science and Engineering: C*, 106: 110297.
- Duan, Xiaoguang, Zhimin Ao, Degang Li, Hongqi Sun, Li Zhou, Alexandra Suvorova, Martin Saunders, Guoxiu Wang y Shaobin Wang. (2016). Surface-tailored nanodiamonds as excellent metal-free catalysts for organic oxidation. *Carbon*, 103: 404-411. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.03.034>.
- Eidi, H., M. O. David, G. Crepeaux, L. Henry, V. Joshi, M. H. Berger, M. Sennour, J. Cadusseau, R. K. Gherardi y P. A. Curmi. (2015). Fluorescent nanodiamonds as a relevant tag for the assessment of alum adjuvant particle biodisposition. *BMC Med*, 13: 144. <https://doi.org/10.1186/s12916-015-0388-2>.
- Ekimov, E. A. y M. V. Kondrin. (2020). Chapter six - High-pressure, high-temperature synthesis and doping of nanodiamonds. En Christoph E. Nebel, Igor Aharonovich, Norikazu Mizuuchi y Mutsuko Hatano (eds.), *Semiconductors and semimetals*, 161-199. Elsevier.
- Faklaris, Orestis, Jacques Botsoa, Thierry Sauvage, Jean-François Roch y François Treussart. (2010). Photoluminescent nanodiamonds: Comparison of the photoluminescence saturation properties of the NV color center and a cyanine dye at the single emitter level, and study of the color center concentration under different preparation conditions. *Diamond and Related Materials*, 19(7): 988-995. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2010.03.002>.
- Fang, XiaoWen, JingDong Mao, E. M. Levin y Klaus Schmidt-Rohr. (2009). Nonaromatic core-shell structure of nanodiamond from solid-state NMR spectroscopy. *Journal of the American Chemical Society*, 131(4): 1426-1435. <https://doi.org/10.1021/ja8054063>.
- Ferrari, Andrea Carlo y John Robertson. (2004). Raman spectroscopy of amorphous, nanostructured, diamond-like carbon, and nanodiamond. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 362(1824): 2477-2512.
- Ferraris, C., C. Rimicci, S. Garelli, E. Ugazio y L. Battaglia. (2021). Nanosystems in cosmetic products: a brief overview of functional, market, regulatory and safety concerns. *Pharmaceutics*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13091408>.
- Fox, Kate, Phong A. Tran, Desmond W. M. Lau, Takeshi Ohshima, Andrew D. Greentree y Brant C. Gibson. (2016). Nanodiamond-polycaprolactone composite: A new material for tissue engineering with sub-dermal imaging capabilities. *Materials Letters*, 185: 185-188. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.08.140>.
- Fu, C. C., Lee, H-Y. Chen, K., Lim, T.-S. Wu, H-Y., Lin, P-K., Wei, P. K., Tsao, P. H., Chang, H.-C., Fann, W. (2007). Characterization and application of single fluorescent

- nanodiamonds as cellular biomarkers. *PNAS*, 104(3): 727-732. <https://doi.org/10.1073/pnas.0605409104>.
- Gaebel, T., C. Bradac, J. Chen, J. M. Say, L. Brown, P. Hemmer y J. R. Rabeau. 2012. Size-reduction of nanodiamonds via air oxidation. *Diamond and Related Materials*, 21: 28-32. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2011.09.002>.
- Ghadimi, A., R. Saidur y H. S. C. Metselaar. (2011). A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(17): 4051-4068. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.014>.
- Głowacki, Maciej J., Mateusz Ficek, Mirosław Sawczak, Anna Wcisło y Robert Bogdanowicz. (2022). Fluorescence of nanodiamond cocktails: pH-induced effects through interactions with comestible liquids. *Food Chemistry*, 381: 132206. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132206>.
- Gvozdev, D. A., A. A. Ramonova, Y. B. Slonimskiy, V. R. Gudkova, E. I. Nikelshparg, A. M. Moisenovich, M. M. Moisenovich, A. V. Zaitsev, V. A. Olshevskaya, V. Z. Paschenko y E. G. Maksimov. (2021). Nanodiamonds as a platform for targeted delivery of chlorin-based photosensitizers to cancer cells. *Diamond and Related Materials*, 120: 108676. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108676>.
- Hasan, Zameer U., Philip R. Hemmer, Hwang Lee, Alan L. Migdall, Olga Shenderova, Nicholas Nunn, Thomas Oeckinghaus, Marco Torelli, Gary McGuire, Kevin Smith, Evgeny Danilov, Rolf Reuter, Joerg Wrachtrup, Alexander Shames, Daria Filonova y Alexander Kinev. (2017). Commercial quantities of ultrasmall fluorescent nanodiamonds containing color centers. *Advances in Photonics of Quantum Computing, Memory, and Communication X*.
- Havlik, J., V. Petrakova, I. Rehor, V. Petrak, M. Gulka, J. Stursa, J. Kucka, J. Ralis, T. Rendler, S. Y. Lee, R. Reuter, J. Wrachtrup, M. Ledvina, M. Nesladek y P. Cigler. (2013). Boosting nanodiamond fluorescence: towards development of brighter probes. *Nanoscale*, 5(8): 3208-11. <https://doi.org/10.1039/c2nr32778c>.
- Havlik, Jan, Helena Raabova, Michal Gulka, Vladimira Petrakova, Marie Krecmarova, Vlastimil Masek, Petr Lousa, Jan Stursa, Hans-Gerd Boyen y Milos Nesladek. (2016). Benchtop fluorination of fluorescent nanodiamonds on a preparative scale: toward unusually hydrophilic bright particles. *Advanced Functional Materials*, 26(23): 4134-4142.
- Haziza, S., N. Mohan, Y. Loe-Mie, A. M. Lepagnol-Bestel, S. Massou, M. P. Adam, X. L. Le, J. Viard, C. Plancon, R. Daudin, P. Koebel, E. Dorard, C. Rose, F. J. Hsieh, C. C. Wu, B. Potier, Y. Herault, C. Sala, A. Corvin, B. Allinquant, H. C. Chang, F. Treussart y M. Simonneau. (2017). Fluorescent nanodiamond tracking reveals intraneuronal transport abnormalities induced by brain-disease-related genetic risk factors. *Nat Nanotechnol*, 12(4): 322-328. <https://doi.org/10.1038/nnano.2016.260>.
- Hegyi, Alex y Eli Yablonovitch. (2013). Molecular imaging by optically detected electron spin resonance of nitrogen-vacancies in nanodiamonds. *Nano letters*, 13(3): 1173-1178. <https://doi.org/10.1021/nl304570b>.
- Hemelaar, S. R., P. de Boer, M. Chipaux, W. Zuidema, T. Hamoh, F. P. Martinez, A. Nagl, J. P. Hoogenboom, B. N. G. Giepmans y R. Schirhagl. (2017). Nanodiamonds as

- multi-purpose labels for microscopy. *Sci Rep*, 7(1): 720. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00797-2>.
- Hill, H. G. M., L. B. D'Hendecourt, C. Perron y A. P. Jones. 1997. Infrared spectroscopy of interstellar nanodiamonds from the Orgueil meteorite. *Meteoritics & Planetary Science*, 32(5): 713-718. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1997.tb01556.x>.
- Houshyar, Shadi, Avik Sarker, Amit Jadhav, G. Sathish Kumar, Amitava Bhattacharyya, Rajkishore Nayak, Robert A. Shanks, Tanushree Saha, Aaqil Rifai, Rajiv Padhye y Kate Fox. (2020). Polypropylene-nanodiamond composite for hernia mesh. *Materials Science and Engineering: C*, 111: 110780. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.110780>.
- Hu, Guang Qiu, Jing Lu y Xi Peng Xu. (2012). Polishing silicon wafers with the nanodiamond abrasive tools prepared by sol-gel technique. *Key Engineering Materials*, 496: 1-6. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.496.1>.
- Hu, Shengliang, Fei Tian, Peikang Bai, Shirui Cao, Jing Sun y Jing Yang. (2009). Synthesis and luminescence of nanodiamonds from carbon black. *Materials Science and Engineering: B*, 157(1): 11-14. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2008.12.001>.
- Huang, Hongye, Meiying Liu, Ruming Jiang, Junyu Chen, Qiang Huang, Yuanqing Wen, Jianwen Tian, Naigen Zhou, Xiaoyong Zhang y Yen Wei. (2019). Water-dispersible fluorescent nanodiamonds for biological imaging prepared by thiol-ene click chemistry. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 95: 481-486. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.08.035>.
- Huang, Houjin, Erik Pierstorff, Eiji Osawa y Dean Ho. (2007). Active nanodiamond hydrogels for chemotherapeutic delivery. *Nano Letters*, 7(11): 3305-3314. <https://doi.org/10.1021/nl071521o>.
- Huang, Zhongping, Peng Yao, Qilian Zhu, Lili Wang y Yan Zhu. (2018). The polystyrene-divinylbenzene stationary phase hybridized with oxidized nanodiamonds for liquid chromatography. *Talanta*, 185: 221-228. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.03.076>.
- Hui, Yuen Yung, Wesley Wei-Wen Hsiao, Simon Haziza, Michel Simonneau, François Treussart y Huan-Cheng Chang. (2017). Single particle tracking of fluorescent nanodiamonds in cells and organisms. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 21(1): 35-42. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2016.04.002>.
- Igarashi, R., Y. Yoshinari, H. Yokota, T. Sugi, F. Sugihara, K. Ikeda, H. Sumiya, S. Tsuji, I. Mori, H. Tochio, Y. Harada y M. Shirakawa. (2012). Real-time background-free selective imaging of fluorescent nanodiamonds *in vivo*. *Nano Lett*, 12(11): 5726-32. <https://doi.org/10.1021/nl302979d>.
- Ikliptikawati, Dini Kurnia, Masaharu Hazawa, Frederick T. K. So, Daiki Terada, Akiko Kobayashi, Takuya F. Segawa, Masahiro Shirakawa y Richard W. Wong. (2021). Label-free tomographic imaging of nanodiamonds in living cells. *Diamond and Related Materials*, 118: 108517. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108517>.
- Jariwala, Dhruvil Hiteshkumar, Dhrumi Patel y Sarika Waikar. (2020). Surface functionalization of nanodiamonds for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: C*, 113: 110996. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.110996>.
- Jing, Xufeng, Yayan Xu, Haiyong Gan, Ping Hu, Chenxia Li, Jianqiang Qian, Junjie

- Zhang, Ying Tian y Shiqing Xu. (2021). Synthesis and fluorescent thermal response of sol-gel SiO<sub>2</sub> composite film containing nanodiamonds. *Carbon*, 184: 303-311. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.08.038>.
- Johnstone, Graeme E., Gemma S. Cairns y Brian R. Patton. (2019). Nanodiamonds enable adaptive-optics enhanced, super-resolution, two-photon excitation microscopy. *Royal Society Open Science*, 6(7): 190589. <https://doi.org/10.1098/rsos.190589>.
- Jung, Haksung, Kyung-Jin Cho, Yeonee Seol, Yasuharu Takagi, Andrew Dittmore, Roche Paul y Keir C. Neuman. (2019). Surface modification of fluorescent nanodiamond for biomedical applications as fluorescent probe. *Biophysical Journal*, 116(3, Supplement 1): 445a. <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2018.11.2396>.
- Kang, Rae-Hyung, Seung Woon Baek, Tae-Kyung Ryu y Sung-Wook Choi. (2018). Fabrication of blue-fluorescent nanodiamonds modified with alkyl isocyanate for cellular bioimaging. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 167: 191-196. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2018.04.014>.
- Karami, Pooria, Sadegh Aghapour Aktij, Behnam Khorshidi, Mostafa Dadashi Firouzjaei, Asad Asad, Mark Elliott, Ahmad Rahimpour, João B. P. Soares y Mohtada Sadrzadeh. (2022). Nanodiamond-decorated thin film composite membranes with anti-fouling and antibacterial properties. *Desalination*, 522: 115436. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115436>.
- Karaveli, Sinan, Ophir Gaathon, Abraham Wolcott, Reyu Sakakibara, Or A. Shemesh, Darcy S. Peterka, Edward S. Boyden, Jonathan S. Owen, Rafael Yuste y Dirk Englund. (2016). Modulation of nitrogen vacancy charge state and fluorescence in nanodiamonds using electrochemical potential. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(15): 3938-3943. <https://doi.org/10.1073/pnas.1504451113>.
- Karpeta-Kaczmarek, Julia, Andrzej Kędzierski, Maria A. Augustyniak-Jabłokow, Marta Dziewiecka y Maria Augustyniak. (2018). Chronic toxicity of nanodiamonds can disturb development and reproduction of *Acheta domesticus L.* *Environmental Research*, 166: 602-609. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.05.027>.
- Kausar, Ayesha. (2015). Polyaniline composites with nanodiamond, carbon nanotube and silver nanoparticle: Preparation and properties. *American Journal of Polymer Science & Engineering*, 3(2): 149-160. <https://doi.org/10.5923/j.fs.20170702.02>.
- Kavirajan, Harish. (2009). Memantine: a comprehensive review of safety and efficacy. *Expert opinion on drug safety*, 8(1): 89-109. <https://doi.org/10.1517/14740330802528420>.
- Kharisov, Boris I., Oxana V. Kharissova y Leonardo Chávez-Guerrero. (2010). Synthesis techniques, properties, and applications of nanodiamonds. *Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic, and Nano-Metal Chemistry*, 40(2): 84-101. <https://doi.org/10.3109/10799890903555665>.
- Kim, Hyun-Soo, Jin-Whak Park, Se-Min Park, Jung-Suk Lee y Young-Ze Lee. (2013). Tribological characteristics of paraffin liquid with nanodiamond based on the scuffing life and wear amount. *Wear*, 301(1): 763-767. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.055>.
- Kim, Min-Chul, Dukhee Lee, Seong Hoon Jeong, Sang-Yup Lee y Eunah Kang. (2016). Nanodiamond-gold nanocomposites with the peroxidase-like oxidative catalytic

- activity. *ACS applied materials & interfaces*, 8(50): 34317-34326. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b10471>.
- Korobov, Mikhail V., Dmitry S. Volkov, Natalya V. Avramenko, Lubov' A. Belyaeva, Pavel I. Semenyuk y Mikhail A. Proskurnin. (2013). Improving the dispersity of detonation nanodiamond: differential scanning calorimetry as a new method of controlling the aggregation state of nanodiamond powders. *Nanoscale*, 5(4): 1529-1536. <https://doi.org/10.1039/C2NR33512C>.
- Krueger, Anke, Jochen Stegk, Yuejiang Liang, Li Lu y Gerald Jarre. (2008). Biotinylated nanodiamond: simple and efficient functionalization of detonation diamond. *Langmuir*, 24(8): 4200-4204. <https://doi.org/10.1021/la703482v>.
- Krueger, Anke. (2008). Diamond nanoparticles: jewels for chemistry and physics. *Advanced Materials*, 20(12): 2445-2449. <https://doi.org/10.1002/adma.200701856>.
- Krueger, Anke. (2017). Chapter 8 - Current issues and challenges in surface chemistry of nanodiamonds. En Jean-Charles Arnault (ed.), *Nanodiamonds*, 183-242. Elsevier.
- Kuo, Yung, Tsung-Yuan Hsu, Yi-Chun Wu y Huan-Cheng Chang. (2013). Fluorescent nanodiamond as a probe for the intercellular transport of proteins *in vivo*. *Biomaterials*, 34(33): 8352-8360. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2013.07.043>.
- Laube, C., T. Oeckinghaus, J. Lehnert, J. Griebel, W. Knolle, A. Denisenko, A. Kahnt, J. Meijer, J. Wrachtrup y B. Abel. (2019). Controlling the fluorescence properties of nitrogen vacancy centers in nanodiamonds. *Nanoscale*, 11(4): 1770-1783. <https://doi.org/10.1039/c8nr07828a>.
- Lee, Gyo Young-Ja, Jin-Ju Park, Min-Ku Lee y Chang Kyu Rhee. (2017). Stable dispersion of nanodiamonds in oil and their tribological properties as lubricant additives. *Applied Surface Science*, 415: 24-27. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.12.109>.
- Lee, Jung-Yeob y Dae-Soon Lim. (2004). Tribological behavior of PTFE film with nanodiamond. *Surface and Coatings Technology*, 188-189: 534-538. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.07.102>.
- Liang, Jiaxu, Christopher P. Ender, Todd Zapata, Anna Ermakova, Manfred Wagner y Tanja Weil. (2020). Germanium iodide mediated synthesis of nanodiamonds from adamantane "seeds" under moderate high-pressure high-temperature conditions. *Diamond and Related Materials*, 108: 108000. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.108000>.
- Lien, Zhi-Yi, Tzu-Chia Hsu, Kuang-Kai Liu, Wei-Siang Liao, Kuo-Chu Hwang y Jui-I. Chao. (2012). Cancer cell labeling and tracking using fluorescent and magnetic nanodiamond. *Biomaterials*, 33(26): 6172-6185. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2012.05.009>.
- Liu, Juan, Penglu Wang, Wenqiang Qu, Hongrui Li, Liyi Shi y Dengsong Zhang. (2019). Nanodiamond-decorated ZnO catalysts with enhanced photocorrosion-resistance for photocatalytic degradation of gaseous toluene. *Applied Catalysis B: Environmental*, 257: 117880. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.117880>.
- Liu, W., B. Naydenov, S. Chakrabortty, B. Wuensch, K. Hubner, S. Ritz, H. Colfen, H. Barth, K. Koynov, H. Qi, R. Leiter, R. Reuter, J. Wrachtrup, F. Boldt, J. Scheuer, U. Kaiser, M. Sison, T. Lasser, P. Tinnefeld, F. Jelezko, P. Walther, Y. Wu y T. Weil. (2016). Fluorescent nanodiamond-gold hybrid particles for multimodal optical

- and electron microscopy cellular imaging. *Nano Lett*, 16(10): 6236-6244. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b02456>.
- Liu, Weina, Md Noor A. Alam, Yan Liu, Viatcheslav N. Agafonov, Haoyuan Qi, Kaloian Koynov, Valery A. Davydov, Rustem Uzbekov, Ute Kaiser, Theo Lasser, Fedor Jelezko, Anna Ermakova y Tanja Weil. (2022). Silicon-vacancy nanodiamonds as high performance near-infrared emitters for live-cell dual-color imaging and thermometry. *Nano Letters*, 22(7): 2881-2888. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c00040>.
- Liu, Xiangcheng, Qing Wan, Zhe Zhao, Jinglong Liu, Zhuoyong Zhang, Fengjie Deng, Meiyi Liu, Yuanqing Wen y Xiaoyong Zhang. (2017). Microwave-assisted Diels-Alder reaction for rapid synthesis of luminescent nanodiamond with AIE-active dyes and their biomedical applications. *Materials Chemistry and Physics*, 197: 256-265. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.05.041>.
- Loganathan, Archana, Sara Rengifo, Alexander Franco Hernandez, Cheng Zhang y Arvind Agarwal. (2021). Effect of nanodiamond reinforcement and heat-treatment on microstructure, mechanical and tribological properties of cold sprayed aluminum coating. *Surface and Coatings Technology*, 412: 127037. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127037>.
- Ma, Mengdi, Pei Guan, Jean Felix Mukerabigwi, Fanning Yan, Didi Chen, Yuyang Sun, Xueying Huang y Yu Cao. (2021). Nanodiamond conjugated fluorescein through ethylenediamine linker for cellular biomarking. *Diamond and Related Materials* 118: 108546. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108546>.
- Makarova, Irina, Illia Dobryden, Dmitry Kharitonov, Aliaksandr Kasach, Jacek Ryl, Eveliina Repo y Esa Vuorinen. (2019). Nickel-nanodiamond coatings electrodeposited from tartrate electrolyte at ambient temperature. *Surface and Coatings Technology*, 380: 125063. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125063>.
- Man, Han B., Kangyi Zhang, Erik Robinson, Edward K. Chow y Dean Ho. (2012). Engineering nanoparticulate diamond for applications in nanomedicine and biology. En *Ultananocrystalline Diamond*, 493-518. Elsevier.
- Marcucci Pico, David Fernando, Leonardo Ribeiro Rosa da Silva, Paulo Smith Schneider y Enio Pedone Bandarra Filho. (2019). Performance evaluation of diamond nanolubricants applied to a refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, 100: 104-112. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.12.009>.
- Marcucci Pico, David Fernando, Leonardo Rosa Ribeiro da Silva, Oscar Saul Hernandez Mendoza y Enio Pedone Bandarra Filho. (2020). Experimental study on thermal and tribological performance of diamond nanolubricants applied to a refrigeration system using R32. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 152: 119493. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119493>.
- Martel-Estrada, Santos-Adriana, Claudia-Lucía Vargas-Requena, Dulce-Azucena Salazar-Vázquez, José-Emmanuel Sánchez-Serrano, Karen-Andrea Legarreta-Arias, Imelda Olivas-Armendáriz, Carlos-Alberto Martínez-Pérez y Laura-Elizabeth Valencia-Gómez. (2021). Physico-chemical and cytotoxic properties of capsules of nanodiamonds/extract of Mimosa Tenuiflora bark with chitosan in MDA-MB-231. *International Journal of Nano and Biomaterials*, 10(1): 1-21. <https://doi.org/10.1504/IJNBM.2021.114684>.

- Mashali, Farzin, Ethan Languri, Gholamreza Mirshekari, Jim Davidson y David Kerns. (2019). Nanodiamond nanofluid microstructural and thermo-electrical characterization. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 101: 82-88. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.01.007>.
- Maze, J. R., P. L. Stanwix, J. S. Hodges, S. Hong, J. M. Taylor, P. Cappellaro, L. Jiang, M. V. Gurudev Dutt, E. Togan, A. S. Zibrov, A. Yacoby, R. L. Walsworth y M. D. Lukin. (2008). Nanoscale magnetic sensing with an individual electronic spin in diamond. *Nature*, 455(7213): 644-647. <https://doi.org/10.1038/nature07279>.
- Medina-Cruz, David, Bahram Saleh, Ada Vernet-Crua, Alessandro Ajo, Amit K. Roy y Thomas J. Webster. (2020). Chapter 22 - Drug-delivery nanocarriers for skin wound-healing applications. En Debasis Bagchi, Amitava Das and Sashwati Roy (eds.), *Wound healing, tissue repair, and regeneration in diabetes*, 439-488. Academic Press.
- Mikheev, Konstantin G., Tatyana N. Mogileva, Arseniy E. Fateev, Nicholas A. Nunn, Olga A. Shenderova y Gennady M. Mikheev. (2020). Low-power laser graphitization of high pressure—high temperature nanodiamond films. *Applied Sciences*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/app10093329>.
- Mironova, E. Yu, A. A. Lytkina, M. M. Ermilova, M. N. Efimov, L. M. Zemtsov, N. V. Orekhova, G. P. Karpacheva, G. N. Bondarenko, D. N. Muraviev y A. B. Yaroslavtsev. (2015). Ethanol and methanol steam reforming on transition metal catalysts supported on detonation synthesis nanodiamonds for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(8): 3557-3565. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.11.082>.
- Mirzaamiri, Rouhollah, Saleh Akbarzadeh, Saeed Ziae-Rad, Dong-Gap Shin y Dae-Eun Kim. (2021). Molecular dynamics simulation and experimental investigation of tribological behavior of nanodiamonds in aqueous suspensions. *Tribology International*, 156: 106838. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106838>.
- Mochalin, Vadym N., Olga Shenderova, Dean Ho y Yury Gogotsi. (2012). The properties and applications of nanodiamonds. *Nature Nanotechnology*, 7(1): 11-23. <https://doi.org/10.1038/nnano.2011.209>.
- Mochalin, Vadym, Sebastian Osswald y Yury Gogotsi. (2009). Contribution of functional groups to the Raman spectrum of nanodiamond powders. *Chemistry of Materials*, 21(2): 273-279. <https://doi.org/10.1021/cm802057q>.
- Mohammadkhani, Rahman, Akbar Shojaei, Pooria Rahmani, Nahid Pirhady Tavandashti y Mahsa Amouzegar. (2021). Synthesis and characterization of polyaniline/nanodiamond hybrid nanostructures with various morphologies to enhance the corrosion protection performance of epoxy coating. *Diamond and Related Materials*, 120: 108672. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108672>.
- Mona, J., J. S. Tu, T. Y. Kang, Cheng-Yen Tsai, E. Perevedentseva y C. L. Cheng. (2012). Surface modification of nanodiamond: photoluminescence and Raman studies. *Diamond and Related Materials*, 24: 134-138. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2011.12.027>.
- Mortet, V., J. D'Haen, J. Potmesil, R. Kravets, I. Drbohlav, V. Vorlicek, J. Rosa y M. Vanecek. (2005). Thin nanodiamond membranes and their microstructural, opti-

- cal and photoelectrical properties. *Diamond and Related Materials*, 14(3): 393-397. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2004.12.057>.
- Muruganathan, Manoharan y Hiroshi Mizuta. (2021). Boron vacancy color center in diamond: Ab initio study. *Diamond and Related Materials*, 114: 108341. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108341>.
- Nagl, A., S. R. Hemelaar y R. Schirhagl. (2015). Improving surface and defect center chemistry of fluorescent nanodiamonds for imaging purposes — A review. *Anal Bioanal Chem*, 407(25): 7521-36. <https://doi.org/10.1007/s00216-015-8849-1>.
- Neitzel, I., V. Mochalin, I. Knoke, G. R. Palmese y Y. Gogotsi. (2011). Mechanical properties of epoxy composites with high contents of nanodiamond. *Composites Science and Technology*, 71(5): 710-716. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.01.016>.
- Németh, Péter, Laurence Garvie, and Peter Buseck. (2016). Twinning of cubic diamond explains reported nanodiamond polymorphs. *Scientific Reports*, 5. <https://doi.org/10.1038/srep18381>.
- Nesterenko, P. N., O. N. Fedyanova, Y. V. Volgin y P. Jones. (2007). Ion chromatographic investigation of the ion-exchange properties of microdisperse sintered nanodiamonds. *J Chromatogr A*, 1155(1): 2-7. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2007.02.019>.
- Neu, E., C. Arend, E. Gross, F. Guldner, C. Hepp, D. Steinmetz, E. Zscherpel, S. Ghodbane, H. Sternschulte, D. Steinmüller-Nethl, Y. Liang, A. Krueger y C. Becher. (2011). Narrowband fluorescent nanodiamonds produced from chemical vapor deposition films. *Applied Physics Letters*, 98(24). <https://doi.org/10.1063/1.3599608>.
- Neu, Elke. (2017). Chapter 17 - Applications of color centers as nanoscopic sensors. En Jean-Charles Arnault (ed.), *Nanodiamonds*, 419-438. Elsevier.
- Neverovskaya, A. Yu, A. P. Voznyakovskii y V. Yu Dolmatov. (2004). Structure of the dispersive medium and sedimentation resistance of suspensions of detonation nanodiamonds. *Physics of the Solid State*, 46(4): 662-664.
- Nezamdoust, S., D. Seifzadeh y A. Habibi-Yangjeh. (2020). Nanodiamond incorporated sol-gel coating for corrosion protection of magnesium alloy. *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*, 30(6): 1535-1549. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(20\)65317-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65317-1).
- Noguez, Cecilia y Ignacio L. Garzón. (2009). Optically active metal nanoparticles. *Chemical Society Reviews*, 38(3): 757-771. <https://doi.org/10.1039/B800404H>.
- Norouzi, Neda, Yori Ong, Viraj G. Damle, Mohammad B. Habibi Najafi y Romana Schirhagl. (2020). Effect of medium and aggregation on antibacterial activity of nanodiamonds. *Materials Science and Engineering: C*, 112: 110930. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.110930>.
- Nunn, Nicholas, Marco Torelli, Gary McGuire Olga Shenderova. (2017). Nanodiamond: a high impact nanomaterial. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 21(1): 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2016.06.008>.
- Osipov, Vladimir Yu, Nikolai M. Romanov y Kazuyuki Takai. (2021). Irradiation of detonation nanodiamonds with  $\gamma$ -rays does not produce long living spin radicals. *Mendeleev Communications*, 31(2): 227-229. <https://doi.org/10.1016/j.mencom.2021.03.027>.
- Osswald, S., V. N. Mochalin, M. Havel, G. Yushin y Y. Gogotsi. (2009). Phonon confine-

- ment effects in the Raman spectrum of nanodiamond. *Physical Review B*, 80(7): 075419. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.80.075419>.
- Parker, David M., Alex J. Lineweaver, Arthur D. Quast, Ilya Zharov y Jennifer S. Shumaker-Parry. (2021). Thiol-terminated nanodiamond powders for support of gold nanoparticle catalysts. *Diamond and Related Materials*, 116: 108449. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108449>.
- Passeri, D., A. Biagioni, M. Rossi, E. Tamburri y M. L. Terranova. (2013). Characterization of polyaniline–detonation nanodiamond nanocomposite fibers by atomic force microscopy based techniques. *European Polymer Journal*, 49(5): 991-998. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2013.02.003>.
- Perevedentseva, E., Lin, Y.C., Jani, M., Cheng, C. L. (2013). Biomedical applications of nanodiamonds in imaging and therapy. *Future Medicine Ltd*, 8(12): 2041-2060. <https://doi.org/10.2217/nmm.13.183>.
- Perevedentseva, E., N. Ali, A. Karmenyan, I. Skvorodkin, R. Prunskaitė-Hyyräläinen, S. Vainio, C. L. Cheng y M. Kinnunen. (2019). Optical studies of nanodiamond-tissue interaction: skin penetration and localization. *Materials (Basel)*, 12(22). <https://doi.org/10.3390/ma12223762>.
- Perevedentseva, Elena, Yu-Chung Lin y Chia-Liang Cheng. (2021). A review of recent advances in nanodiamond-mediated drug delivery in cancer. *Expert Opinion on Drug Delivery*, 18(3): 369-382.
- Peristy, Anton A., Olga N. Fedyanina, Brett Paull y Pavel N. Nesterenko. (2014). Diamond based adsorbents and their application in chromatography. *Journal of Chromatography A*, 1357: 68-86. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2014.06.044>.
- Petit, Tristan y Ljiljana Puskar. (2018). FTIR spectroscopy of nanodiamonds: Methods and interpretation. *Diamond and Related Materials*, 89: 52-66. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2018.08.005>.
- Petrakova, V., I. Rehor, J. Stursa, M. Ledvina, M. Nesladek y P. Cigler. (2015). Charge-sensitive fluorescent nanosensors created from nanodiamonds. *Nanoscale*, 7(29): 12307-12311. <https://doi.org/10.1039/C5NR00712G>.
- Prabhakar, Neeraj y Jessica M. Rosenholm. (2019). Nanodiamonds for advanced optical bioimaging and beyond. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 39: 220-231. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2019.02.014>.
- Preston, G. D. (1945). Structure of diamond. *Nature*, 155(3925): 69-70. <https://doi.org/10.1038/155069a0>.
- Qin, Jin-Xu, Xi-Gui Yang, Chao-Fan Lv, Yi-Zhe Li, Kai-Kai Liu, Jin-Hao Zang, Xun Yang, Lin Dong y Chong-Xin Shan. (2021). Nanodiamonds: synthesis, properties, and applications in nanomedicine. *Materials & Design*, 210: 110091. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110091>.
- Raj, Ashlin M. y Balachandran Manoj. (2022). Cost-effective route to nanodiamonds from low-rank coal and their fluorescent & dielectric characteristics. *Ceramics International*, 48(1): 887-895. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.09.171>.
- Rehman, Aisha, Shadi Houshyar y Xin Wang. (2020). Nanodiamond in composite: Biomedical application. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 108(4): 906-922. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.36868>.

- Rehor, I., H. Mackova, S. K. Filippov, J. Kucka, V. Proks, J. Slegerova, S. Turner, G. Van Tendeloo, M. Ledvina, M. Hraby y P. Cigler. 2014. Fluorescent nanodiamonds with bioorthogonally reactive protein-resistant polymeric coatings. *Chempluschem*, 79(1): 21-24. <https://doi.org/10.1002/cplu.201300339>.
- Rehor, I., J. Slegerova, J. Kucka, V. Proks, V. Petrakova, M. P. Adam, F. Treussart, S. Turner, S. Bals, P. Sacha, M. Ledvina, A. M. Wen, N. F. Steinmetz y P. Cigler. (2014). Fluorescent nanodiamonds embedded in biocompatible translucent shells. *Small*, 10(6): 1106-15. <https://doi.org/10.1002/smll.201302336>.
- Reina, Giacomo, Li Zhao, Alberto Bianco y Naoki Komatsu. (2019). Chemical functionalization of nanodiamonds: opportunities and challenges ahead. *Angewandte Chemie International Edition*, 58(50): 17918-17929. <https://doi.org/10.1002/anie.201905997>.
- Reineck, P., D. W. M. Lau, E. R. Wilson, K. Fox, M. R. Field, C. Deleepojananan, V. N. Mochalin y B. C. Gibson. (2017). Effect of surface chemistry on the fluorescence of detonation nanodiamonds. *ACS Nano*, 11(11): 10924-10934. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b04647>.
- Reineck, Philipp, Leevan Fremiot Trindade, Jan Havlik, Jan Stursa, Ashleigh Heffernan, Aaron Elbourne, Antony Orth, Marco Capelli, Petr Cigler, David A. Simpson y Brant C. Gibson. (2019). Not all fluorescent nanodiamonds are created equal: a comparative study. *Particle & Particle Systems Characterization*, 36(3). <https://doi.org/10.1002/ppsc.201900009>.
- Rho, Yoonsoo, Heuisseok Kang, Costas P. Grigoropoulos y Kyung-Tae Kang. (2020). Site-selective synthesis of onion like carbon from nanodiamond thin film via laser-assisted photothermal process. *Applied Physics A*, 126(9): 703. <https://doi.org/10.1007/s00339-020-03875-x>.
- Rittweger, Eva, Kyu Young Han, Scott E Irvine, Christian Eggeling y Stefan W. Hell. (2009). STED microscopy reveals crystal colour centres with nanometric resolution. *Nature Photonics*, 3(3): 144. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2009.2>.
- Rodríguez Nuñez, Jesús Manuel. (2012). *Propiedades ópticas de nanodiamantes obtenidos por detonación de 5 nm aplicables a imagenología y dosimetría biológica*, tesis de maestría. Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora. <https://1library.co/document/y9gl9rwq-propiedades-nanodiamantes-obtenidos-detonacion-aplicables-imagenologia-dosimetria-biologica.html>.
- Sarkar, S. K., A. Bumb, X. Wu, K. A. Sochacki, P. Kellman, M. W. Brechbiel y K. C. Neuman. (2014). Wide-field *in vivo* background free imaging by selective magnetic modulation of nanodiamond fluorescence. *Biomed Opt Express*, 5(4): 1190-202. <https://doi.org/10.1364/BOE.5.001190>.
- Schrand, Amanda M., Suzanne A. Ciftan Hens y Olga A. Shenderova. (2009). Nanodiamond particles: properties and perspectives for bioapplications. *Critical reviews in solid state and materials sciences*, 34(1-2): 18-74. <https://doi.org/10.1080/10408430902831987>.
- Schwertfeger, Hartmut, Andrey A. Fokin y Peter R. Schreiner. (2008). Diamonds are a chemist's best friend: diamondoid chemistry beyond adamantane. *Angewandte Chemie International Edition*, 47(6): 1022-1036. <https://doi.org/10.1002/anie.200705102>.

anie.200701684.

- Scopus. (2022). TITLE-ABS-KEY (nanodiamonds). Scopus. [https://doi.org/10.1007/s00340-011-4718-6](https://www.scopus.com/term/analyizer.uri?sid=56dca872aea318cdc266e376f3d7626d&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28nanodiamonds%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&s=1-27&count=5278&analyzeResults>Analyze+results&txGid=0497df19326f7c1be7e7ea135ce99c39. (Consultado, marzo 31, 2022).</p><p>Shalaginov, M. Y., G. V. Naik, S. Ishii, M. N. Slipchenko, A. Boltasseva, J. X. Cheng, A. N. Smolyaninov, E. Kochman y V. M. Shalaev. (2011). Characterization of nanodiamonds for metamaterial applications. <i>Applied Physics B</i>, 105(2): 191. <a href=).
- Shankar, Nagraj, Nick G. Glumac, Min-Feng Yu y S. P. Vanka. (2008). Growth of nanodiamond/carbon-nanotube composites with hot filament chemical vapor deposition. *Diamond and Related Materials*, 17(1): 79-83. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2007.10.031>.
- Sharin, P. P., A. V. Sivtseva y V. I. Popov. (2021). X-Ray photoelectron spectroscopy of nanodiamonds obtained by grinding and detonation synthesis. *Technical Physics*, 66(2): 275-279. <https://doi.org/10.1134/S1063784221020183>.
- Shenderova, Olga A. y Suzanne A. Ciftan Hens. (2013). Nanodiamonds. En Robert Vajtai (ed.), *Springer handbook of nanomaterials*, 263-300. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Shenderova, Olga y Nicholas Nunn. (2017). Chapter 2 - Production and purification of nanodiamonds. En Jean-Charles Arnault (ed.), *Nanodiamonds*, 25-56. Elsevier.
- Shenderova, Olga y A. Ya. Vul'. (2014). *Detonation nanodiamonds: science and applications*: CRC Press. Taylor & Francis Group.
- Shimkunas, Rafael A., Erik Robinson, Robert Lam, Steven Lu, Xiaoyang Xu, Xue-Qing Zhang, Houjin Huang, Eiji Osawa y Dean Ho. (2009). Nanodiamond-insulin complexes as pH-dependent protein delivery vehicles. *Biomaterials*, 30(29): 5720-5728.
- Shuai, Cijun, Yang Li, Guoyong Wang, Wenjing Yang, Shuping Peng y Pei Feng. (2019). Surface modification of nanodiamond: Toward the dispersion of reinforced phase in poly-l-lactic acid scaffolds. *International Journal of Biological Macromolecules*, 126: 1116-1124. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.01.004>.
- Silbajoris, Robert, William Linak, Olga Shenderova, Christopher Winterrowd, Huan-Cheng Chang, Jay L. Zweier, Anirudh Kota, Lisa A. Dailey, Nicholas Nunn, Philip A. Bromberg y James M. Samet. (2015). Detonation nanodiamond toxicity in human airway epithelial cells is modulated by air oxidation. *Diamond and Related Materials*, 58: 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2015.05.007>.
- Sinolits, Artem V., Maria G. Chernysheva, Andrey G. Popov, Alexander V. Egorov y Gennadii A. Badun. (2021). Hyaluronic acid adsorption on nanodiamonds: Quantitative characteristics and mechanism. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 618: 126461. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126461>.
- Soboleva, Oxana A., Elena V. Porodenko, Maria G. Chernysheva, Viktor I. Korobkov, Ivan Yu Myasnikov y Gennadii A. Badun. (2018). Composite films based on polyvinyl alcohol and detonation nanodiamonds with modified surface. *Materials*

- Today: *Proceedings*. 5(12, Part 3): 25907-25910. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.08.001>.
- Stehlik, Stepan, Jiri Henych, Pavla Stenclova, Robert Kral, Petra Zemenova, Jiri Pangrac, Ondrej Vanek, Alexander Kromka y Bohuslav Rezek. (2021). Size and nitrogen inhomogeneity in detonation and laser synthesized primary nanodiamond particles revealed via salt-assisted deaggregation. *Carbon*, 171: 230-239.
- Su, Long-Jyun, Hsin-Hung Lin, Meng-Shiue Wu, Lei Pan, Kanchan Yadav, Hsao-Hsun Hsu, Thai-Yen Ling, Yit-Tsong Chen y Huan-Cheng Chang. (2019). Intracellular delivery of luciferase with fluorescent nanodiamonds for dual-modality imaging of human stem cells. *Bioconjugate Chemistry*, 30(8): 2228-2237. <https://doi.org/10.1021/acs.bioconjchem.9b00458>.
- Suarez-Kelly, Lorena P., Amanda R. Campbell, Isaac V. Rampersaud, Ambika Bumb, Min S. Wang, Jonathan P. Butchar, Susheela Tridandapani, Lianbo Yu, Arfaan A. Rampersaud y William E. Carson. (2017). Fluorescent nanodiamonds engage innate immune effector cells: A potential vehicle for targeted anti-tumor immunotherapy. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 13(3): 909-920. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2016.12.005>.
- Suzuki, Hirofumi, Mutsumi Okada, Yoshiharu Namba y Tomohiro Goto. 2019. "Super-finishing of polycrystalline YAG ceramic by nanodiamond slurry. *CIRP Annals*, 68(1): 361-364. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.062>.
- Taherpour, Avat A. y Farimah Mousavi. (2018). Chapter 6 - Carbon nanomaterials for electroanalysis in pharmaceutical applications. En Alexandru Mihai Grumezescu (ed.), *Fullerenes, graphenes and nanotubes*, 169-225. William Andrew Publishing.
- Tanaka, Ippei, Hiroshi Okubo y Yasunori Harada. (2021). Diamond synthesis on Si by plasma chemical vapor deposition using microwave sheath-voltage combination plasma. *Surface and Coatings Technology*, 423: 127592. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127592>.
- Taylor, Alice C., Citlali Helenes González, Benjamin S. Miller, Robert J. Edgington, Pa-trizia Ferretti y Richard B. Jackman. (2017). Surface functionalisation of nanodiamonds for human neural stem cell adhesion and proliferation. *Scientific reports*, 7(1): 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07361-y>.
- Thiering, Gergő y Adam Gali. (2020). Chapter one - Color centers in diamond for quantum applications. En Christoph E. Nebel, Igor Aharonovich, Norikazu Mizuuchi y Mutsuko Hatano (eds.), *Semiconductors and semimetals*, 1-36. Elsevier.
- Tinwala, Hussain y Sarika Waikar. (2019). Production, surface modification and biomedical applications of nanodiamonds: A sparkling tool for theranostics. *Materials Science and Engineering: C*, 97: 913-931. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.12.073>.
- Tisler, Julia, Gopalakrishnan Balasubramanian, Boris Naydenov, Roman Kolesov, Bernhard Grotz, Rolf Reuter, Jean-Paul Boudou, Patrick A. Curmi, Mohamed Sennour, Alain Thorel, Michael Börsch, Kurt Aulenbacher, Rainer Erdmann, Philip R. Hemmer, Fedor Jelezko y Jörg Wrachtrup. (2009). Fluorescence and spin properties of defects in single digit nanodiamonds. *ACS Nano*, 3(7): 1959-1965. <https://doi.org/10.1021/nn9003617>.
- Torelli, Marco D., Ashlyn G. Rickard, Marina V. Backer, Daria S. Filonov, Nicholas A.

- Nunn, Alexander V. Kinev, Joseph M. Backer, Gregory M. Palmer y Olga A. Shenderova. (2019). Targeting fluorescent nanodiamonds to vascular endothelial growth factor receptors in tumor. *Bioconjugate Chemistry*, 30(3): 604-613. <https://doi.org/10.1021/acs.bioconjchem.8b00803>.
- Turcheniuk, Kostiantyn y Vadym N. Mochalin. (2017). Biomedical applications of nanodiamond. *Nanotechnology*, 28(25): 252001. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa6ae4>.
- Usoltseva, L. O., D. S. Volkov, D. A. Nedosekin, M. V. Korobov, M. A. Proskurnin y V. P. Zharov. (2018). Absorption spectra of nanodiamond aqueous dispersions by optical absorption and optoacoustic spectroscopies. *Photoacoustics*, 12: 55-66. <https://doi.org/10.1016/j.pacs.2018.10.003>.
- Vaijayanthimala, V., Po-Yun Cheng, Shih-Hua Yeh, Kuang-Kai Liu, Cheng-Hsiang Hsiao, Jui-I. Chao y Huan-Cheng Chang. (2012). The long-term stability and biocompatibility of fluorescent nanodiamond as an *in vivo* contrast agent. *Biomaterials* 33(31): 7794-7802. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2012.06.084>.
- Vaijayanthimala, V. V. y Chang, H.-C. (2009). Functionalized fluorescent nanodiamonds for biomedical applications. *Future Medicine Ltd*, 4(1): 47-55. <https://doi.org/10.2217/17435889.4.1.47>.
- Villalba, Pedro, Manoj K. Ram, Humberto Gomez, Venkat Bhethanabotla, My N. Helms, Amrita Kumar y Ashok Kumar. (2012). Cellular and *in vitro* toxicity of nanodiamond-polyaniline composites in mammalian and bacterial cell. *Materials Science and Engineering: C*, 32(3): 594-598. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2011.12.017>.
- Vlasov, I. I., A. A. Shiryaev, T. Rendler, S. Steinert, S. Y. Lee, D. Antonov, M. Voros, F. Jelezko, A. V. Fisenko, L. F. Semjonova, J. Biskupek, U. Kaiser, O. I. Lebedev, I. Silodos, P. R. Hemmer, V. I. Konov, A. Gali y J. Wrachtrup. (2014). Molecular-sized fluorescent nanodiamonds. *Nat Nanotechnol*, 9(1): 54-8. <https://doi.org/10.1038/nnano.2013.255>.
- Volkov, Dmitry, Pavel Semenyuk, M. Korobov y Mikhail Proskurnin. (2012). Quantification of nanodiamonds in aqueous solutions by spectrophotometry and thermal lens spectrometry. *Journal of Analytical Chemistry*, 67. <https://doi.org/10.1134/S1061934812100115>.
- Volkov, K. V., V. V. Danilenko y V. I. Elin. (1990). Diamond synthesis from the carbon of detonation products. *Fiz. Goren. Vzriva*, 26: 123-125.
- Wang, C., B. Zheng, W. T. Zheng y Q. Jiang. (2008). Electronic properties of dehydrogenated nanodiamonds: A first-principles study. *Diamond and Related Materials*, 17(2): 204-208. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2007.12.024>.
- Wee, Tse-Luen, Yi-Wen Mau, Chia-Yi Fang, Hsiang-Ling Hsu, Chau-Chung Han y Huan-Cheng Chang. (2009). Preparation and characterization of green fluorescent nanodiamonds for biological applications. *Diamond and Related Materials*, 18(2-3): 567-573. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2008.08.012>.
- Williams, O. (2014). *Nanodiamond*. Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry.
- Wilson, E. R., L. M. Parker, A. Orth, N. Nunn, M. Torelli, O. Shenderova, B. C. Gibson y P. Reineck. (2019). The effect of particle size on nanodiamond fluorescence and colloidal properties in biological media. *Nanotechnology*, 30(38): 385704. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab3a2c>.

- org/10.1088/1361-6528/ab283d.
- Wu, Tsai-Jung, Hsiao-Yu Chiu, John Yu, Mafalda P. Cautela, Bruno Sarmento, José das Neves, Carme Catala, Nicolas Pazos-Perez, Luca Guerrini, Ramon A. Alvarez-Puebla, Sanja Vranješ-Durić y Nenad L. Ignjatović. (2018). Chapter 1 - Nanotechnologies for early diagnosis, *in situ* disease monitoring, and prevention. En Vuk Uskoković y Dragan P. Uskoković (eds.), *Nanotechnologies in preventive and regenerative medicine*, 1-92. Elsevier.
- Wu, Yuzhou, Anna Ermakova, Weina Liu, Goutam Pramanik, Tran Minh Vu, Andrea Kurz, Liam McGuinness, Boris Naydenov, Susanne Hafner, Rolf Reuter, Joerg Wrachtrup, Junichi Isoya, Christina Förtsch, Holger Barth, Thomas Simmet, Fedor Jelezko y Tanja Weil. (2015). Programmable biopolymers for advancing biomedical applications of fluorescent nanodiamonds. *Advanced Functional Materials*, 25 (42): 6576-6585. <https://doi.org/10.1002/adfm.201502704>.
- Xing, Yun, Wei Xiong, Lin Zhu, Eiji Osawa, Saber Hussin y Liming Dai. (2011). DNA damage in embryonic stem cells caused by nanodiamonds. *ACS nano*, 5(3): 2376-2384.
- Xu, Dazhuang, Meiying Liu, Qin Zhang, Qiang Huang, Hongye Huang, Jianwen Tian, Ruming Jiang, Yuanqing Wen, Xiaoyong Zhang y Yen Wei. (2018). Preparation of water dispersible and biocompatible nanodiamond-poly(amino acid) composites through the ring-opening polymerization. *Materials Science and Engineering: C*, 91: 496-501. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.05.053>.
- Yu, Mengxiao y Jie Zheng. (2015). Clearance pathways and tumor targeting of imaging. Yu, Shu-Jung, Ming-Wei Kang, Huan-Cheng Chang, Kuan-Ming Chen y Yueh-Chung Yu. (2005). Bright fluorescent nanodiamonds: no photobleaching and low cytotoxicity. *Journal of the American Chemical Society*, 127(50): 17604-17605.
- Yu, Xinglin, Xiangdong Chen, Xing Ding, Xinpeng Chen, Xiang Yu y Xuan Zhao. (2019). High-sensitivity and low-hysteresis humidity sensor based on hydrothermally reduced graphene oxide/nanodiamond. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 283: 761-768.
- Yushin, G. N., S. Osswald, V. I. Padalko, G. P. Bogatyrev y Y. Gogotsi. (2005). Effect of sintering on structure of nanodiamond. *Diamond and Related Materials*, 14(10): 1721-1729. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2005.06.030>.
- Zhang, Qingwei, Vadym N. Mochalin, Ioannis Neitzel, Isabel Y. Knoke, Jingjia Han, Christopher A. Klug, Jack G. Zhou, Peter I. Lelkes y Yury Gogotsi. (2011). Fluorescent PLLA-nanodiamond composites for bone tissue engineering. *Biomaterials*, 32(1): 87-94. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2010.08.090>.
- Zhang, T., Cui, H., Fang, C. Y., Cheng, K., Yang, X., Chang, H. C. y Forrest, M. L. (2015). Targeted nanodiamonds as phenotype-specific photoacoustic contrast agents for breast cancer. *Nanomedicine*, 10(4): 573-587. <https://doi.org/10.2217/nmm.14.141>.
- Zhang, Xue-Qing, Mark Chen, Robert Lam, Xiaoyang Xu, Eiji Osawa y Dean Ho. (2009). Polymer-functionalized nanodiamond platforms as vehicles for gene delivery. *ACS Nano*, 3(9): 2609-2616. <https://doi.org/10.1021/nn900865g>.
- Zhang, Yinhang, Kyong Yop Rhee, David Hui y Soo-Jin Park. (2018). A critical review of nanodiamond based nanocomposites: Synthesis, properties and applications.

*Composites Part B: Engineering*, 143: 19-27. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.01.028>.

- Zhu, Ying, Yu Zhang, Guosheng Shi, Jinrong Yang, Jichao Zhang, Wenxin Li, Aiguo Li, Renzhong Tai, Haiping Fang y Chunhai Fan. (2015). Nanodiamonds act as Trojan horse for intracellular delivery of metal ions to trigger cytotoxicity. *Particle and fibre toxicology*, 12(1): 1-11. <https://doi.org/10.1186/s12989-014-0075-z>.
- Zhu, Yongwei, Zhijing Feng, Baichun Wang y Xianyang Xu. (2004). Dispersion of nanodiamond and ultra-fine polishing of quartz wafer. *China Particuology*, 2(4): 153-156. [https://doi.org/10.1016/S1672-2515\(07\)60046-3](https://doi.org/10.1016/S1672-2515(07)60046-3).
- Zousman, Boris y Olga Levinson. (2012). Monodispersed nanodiamonds produced by laser ablation. *MRS Online Proceedings Library*, 1452(1): 32-38. <https://doi.org/10.1557/opr.2012.1339>.