Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

La conversión ascendente, una alternativa para sumar la energía de los fotones

Upconversion: An Alternative for Summing Photon Energy

Báez-Rodríguez, L.A.*, Báez-Rodríguez, A., Nolasco-Montaño, J.C.*

Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología MICRONA, Universidad Veracruzana (https://orcid.org/0009-0004-2835-3294).

zS22024508@estudiantes.uv.mx*;adbaez@uv.mx; janolasco@uv.mx*

Innovación tecnológica: Diseño de nanodispositivos para aprovechamiento de luz solar.
Área de aplicación industrial: Tecnología para las energías renovables.

Recibido: 09 abril 2025
Aceptado: 21 octubre 2025

Abstract

The upconversion (UC) phenomenon is currently being studied for applications such as photoluminescence for detecting cancer cells, photocatalysis, and in solar cells to increase their efficiency. UC can be generated using three main methods: 1) nanoparticles doped with lanthanide ions, 2) organic molecules via the Triplet-Triplet Annihilation (TTA) mechanism, and 3) heterostructures. This review focuses on light generation through the UC phenomenon using heterostructures, as they present several advantages over the other two types of UC. For example, they can harvest photons across specific ranges of the excitation source (i.e., incident light) due to their wide absorption bandwidth. Theoretical calculations involving heterostructures yield relatively high efficiencies (greater than 90%) in the upconversion process. This is promising for the applications mentioned above, given that the practical efficiency of these processes is currently low (~33%). A major drawback of the semiconductor heterostructures reported to date is their fabrication, which relies on costly techniques such as Molecular Beam Epitaxy (MBE). This work reviews topics related to the UC phenomenon. Specifically, it reviews trends in prominent research, both in Mexico and abroad, focused on modifying heterostructures with more affordable and easier-to-implement materials and techniques. Special emphasis is placed on nanostructures, as they have demonstrated advantages over other proposed UC materials.

Keywords: Heterostructure, Semiconductors, Upconversion.

Resumen

El fenómeno de conversión ascendente (UC del inglés Up-Conversion) está siendo estudiado en aplicaciones como; fotoluminiscencia para la detección de células cancerosas, fotocatálisis, y respaldo en celdas solares para incrementar su eficiencia. La UC puede originarse con; 1) nanopartículas dopadas con iones lantánidos, 2) moléculas orgánicas mediante el mecanismo aniquilación triplete-triplete (TTA) y 3) heteroestructuras. Nos centraremos en la generación de luz por el fenómeno UC con el uso de heteroestructuras, ya que existen varias ventajas respecto de los otros dos tipos de UC; pueden recolectar fotones en ciertos rangos de la fuente de excitación (por ejemplo, la energía luminosa) debido a su ancho de banda de absorción. Los cálculos teóricos con heteroestructuras otorgan eficiencias relativamente altas (mayor al 90%) en el proceso de conversión ascendente, lo cual es prometedor para las aplicaciones mencionadas, ya que la eficiencia práctica de estos procesos es aún baja (~33%). Una gran desventaja que presentan las heteroestructuras semiconductoras reportadas hasta el momento es la fabricación, mediante técnicas costosas como Epitaxia por Haces Moleculares (MBE del inglés Molecular Bean Epitaxy). El presente trabajo de divulgación explica en qué consiste el fenómeno de UC; se revisan las tendencias de las investigaciones más destacadas en México y en el extranjero para poder modificar las heteroestructuras con materiales y técnicas más asequibles y fáciles de implementar. Se pone especial énfasis en las nanoestructuras, ya que han demostrado tener ventajas sobre otros materiales propuestos.

Palabras clave: Heteroestructura, Semiconductores, upconversion.

Introducción

La energía es parte fundamental en todas las actividades del ser humano y de la naturaleza; un ejemplo, la luz solar permite la desinfección del agua por medio de la luz ultravioleta en conjunto con la energía térmica (Cañarte Soledispa, 2015). Esta actividad también se puede llevar a cabo por medios artificiales empleando lámparas de vapor de mercurio; por lo tanto, se busca obtener fuentes de energía UV sustentables y de menor impacto ambiental (*La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible*, 2018).

El fenómeno UC permite la recolección de dos fotones de baja energía para convertirlos en un fotón de mayor energía. Este proceso tiene aplicaciones en diferentes campos, como bioimágenes, la fotocatálisis y la energía fotovoltaica (Chen et al., 2018). La UC se desarrolla en nanopartículas dopadas con lantánidos (materiales inorgánicos) o con moléculas orgánicas mediante el mecanismo aniquilación triplete-triplete. Su uso ha permitido mejorar la eficiencia de las celdas solares y desarrollar técnicas de fotoluminiscencia para detectar células cancerosas (Du et al., 2021; Milleville et al., 2019). Sin embargo, el rendimiento de estos materiales está limitado por su estrecho ancho de banda de absorción, particularmente a flujos de fotones en el espectro visible (Sellers et al., 2016). Una alternativa para superar esta limitación es el uso de materiales semiconductores configurados como heteroestructuras. Este trabajo se centra en conocer los estudios basados en heteroestructuras capaces de desarrollar el fenómeno UC, específicamente en aquellos que siguen el mecanismo ESA (Absorción del Estado Excitado) mediante heteroestructuras.

A nivel internacional y en México, se encuentran trabajos de conversión ascendente con nanopartículas dopadas con lantánidos y/o fósforos para aplicaciones en bioimagen dirigida a la detección en el rango del infrarrojo, celdas solares, luz láser, entre otras. (Chen et al., 2018; *The Lens - Búsqueda y análisis de patentes y publicaciones académicas*, 2025). En México, uno de los centros con mayor producción científica reportada en esta área es el Centro de Investigación en Óptica (CIO), mientras que a nivel internacional destaca la Academia de Ciencias de China (*The Lens - Búsqueda y análisis de patentes y publicaciones académicas,* 2025).

Problemáticas

En México se cuenta con abundante recurso solar que va desde 5.5 Kwh/m^2 a los 8 Kwh/m^2 en primavera y verano (entre 15° y 35° de latitud). Este potencial permite generar electricidad a bajo costo y con un menor impacto ambiental, lo que favorece la sustentabilidad, impulsa la acción social y contribuye a la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (*La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible*, 2018).

Para recolectar la energía solar, se emplea el fenómeno fotovoltaico, desarrollado en paneles solares compuestos por celdas solares individuales fabricadas con materiales semiconductores, principalmente de silicio (cristalino y amorfo). Estos materiales transforman la luz (fotones) en energía eléctrica (electrones), gracias al efecto fotovoltaico, son fabricados para absorber fotones en el rango del espectro visible, que representa solo un pequeño porcentaje del espectro solar (Hernández, 2017; Sellers et al., 2016). Son fabricadas para absorber fotones en el rango del espectro visible, que representa solo un pequeño porcentaje del espectro solar. Entre las ventajas de los paneles solares se encuentran las nulas emisiones de dióxido de carbono, su fácil instalación y funcionamiento. Las desventajas, se encuentran el alto costo en la fabricación de materiales semiconductores, su dependencia de las condiciones ambientales y una eficiencia aún limitada, siendo esta última un área de oportunidad para la investigación (Hernández, 2017; Nolasco et al., 2019; Vázquez et al., 2022). El fenómeno UC permite incrementar la eficiencia de las celdas solares. Por otro lado, la energía luminosa con mayor aplicación en desinfección de agua y germicida de superficies es la luz ultravioleta tipo C (UV C), que posee la mayor energía dentro del espectro UV, con longitudes de onda que van de 100 nm a 280 nm. La luz ultravioleta es un tipo de radiación electromagnética, comprendida entre los 100 nm y 400 nm. Actualmente, estos rangos de energía se producen principalmente con lámparas de vapor de mercurio y LEDs, cuyo funcionamiento requiere energía eléctrica. Al final de su vida útil, estos dispositivos son desechados sin ninguna regulación para los elementos tóxicos que contienen, como el mercurio, los cuales se liberan directamente al ambiente (Uhlenbrook, 2019). Una aplicación prometedora del fenómeno UC es la generación de luz UV, en la actualidad, existen pocos estudios sobre materiales semiconductores heteroestructurados que generen luz UV a partir de materiales libres de contaminantes y que, además, aprovechen la energía solar. Entre los materiales que pueden producir luz visible e inclusive luz UV a partir de energía con longitudes de onda cercanas al infrarrojo, se encuentran las nanopartículas dopadas con lantánidos y las moléculas orgánicas mediante el mecanismo aniquilación triplete triplete (TTA) (Du et al., 2021). La desventaja de estos materiales reside en su limitada capacidad para recolectar fotones con distintas longitudes de onda y pocos estados para la absorción de fotones. Por el contrario, los materiales semiconductores nanoestructurados

presentan la ventaja de poder absorber fotones en un rango más amplio de longitudes de onda del espectro solar. Actualmente, se están proponiendo algunos modelos teóricos de heteroestructuras que desarrollen upconversion para un mejor aprovechamiento del espectro solar, los fotones con menores energías en el rango del infrarrojo se pueden convertir en fotones de mayor energía o menores longitudes de onda, como se muestra en la figura 1. Estas investigaciones se encuentran en la fase de análisis teórico y modelados matemáticos en heteroestructuras de puntos cuánticos (QD). Sin embargo, un desafío importante es disminuir el complejo proceso de fabricación, el cual se realiza con equipos costosos como la epitaxia de haces moleculares (MBE) (Chen et al., 2016, 2018).

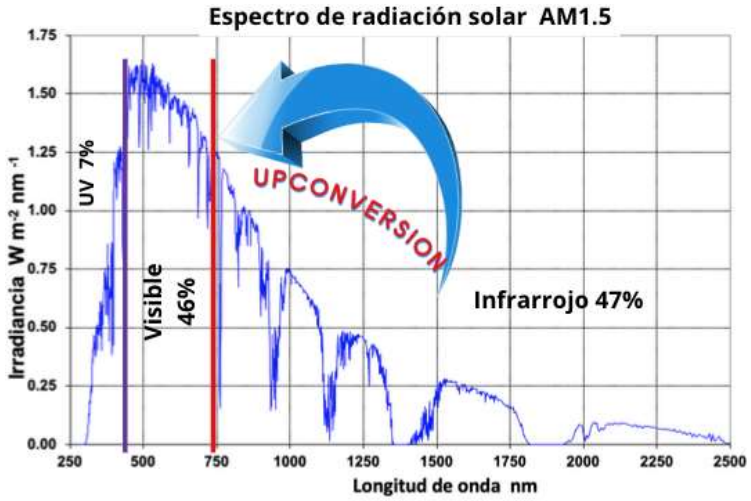


Figura 1. Esquema que indica el proceso UC en el espectro solar AM1.5.

La conversión ascendente UC

El fenómeno de fotoluminiscencia se da en materiales que son irradiados por fotones en longitudes de onda en el orden del ultravioleta 100 a 400 nanómetros o visible de 400 a 700 nm, este proceso se conoce como absorción, generando un par electrón-hueco. En el segundo proceso hay un exceso de energía en el electrón; la pérdida de esta energía en el electrón se conoce como relajación, y el tercer proceso es la recombinación radiativa, generando la emisión de fotones de menor energía, muy cercano a la banda prohibida del material (Du et al., 2021; Reyes, 2019). Otros fenómenos fotoluminiscentes no convencionales, como la conversión descendente (Down Conversion DC), consiste en un proceso que convierte un fotón de alta energía, principalmente ultravioleta, en dos o más fotones de menor energía. Por el contrario, el fenómeno de UC consiste en la suma de fotones de menor energía para emitir un fotón de mayor energía. Estos fenómenos permiten aprovechar un mayor rango del espectro solar para devolver fotones con energías dentro del rango de la banda prohibida (band gap) que la celda pueda absorber para generar electricidad (Chen et al., 2018; De La Mora et al., 2017).

El fenómeno de UC se ha logrado en nanopartículas dopadas con lantánidos, moléculas orgánicas mediante el mecanismo aniquilación triplete triplete (TTA) y semiconductores coloidales o puntos cuánticos (QDs). Una de las aplicaciones más relevantes es la detección de células cancerosas, ya que es posible irradiar la célula con energías en el rango del infrarrojo para no alterarla o dañarla y emitir luz en el rango del visible para su detección, estando en la fase de investigación experimental in vitro

(Méndez-Castillo et al., 2023, 2024). Sin embargo, la principal desventaja de los materiales para dicha aplicación es que producen distintas longitudes de onda, lo que resulta incompatible con las tecnologías fotovoltaicas que no absorben dichas longitudes (Du et al., 2021).

En la figura 2 se muestra un esquema del fenómeno UC indicando mediante diagrama de bandas, que sigue el mecanismo ESA. Los principales procesos incluyen la absorción de fotones, transferencia de carga y emisión de una mayor energía. La absorción de fotones corresponde a la parte de la izquierda del esquema; un primer fotón con energía igual o superior a E1 crea un par electrón-hueco, llevándolo de la banda de valencia (VB) a un estado intermedio; para que no se recombine el electrón, es necesario que permanezca el tiempo y con la energía suficiente en ese estado. Al absorberse un segundo fotón con una energía igual o superior a E2, permite pasar al electrón del estado intermedio al estado excitado a la banda de conducción (CB). La suma de las energías E1 y E2, representadas por las flechas verde y amarilla respectivamente, constituye la primera parte del mecanismo UC. Una condición para que el sistema siga el mecanismo ESA es que la energía E1 sea mayor que E2.

En heteroestructuras, la transferencia de carga se caracteriza por ocurrir entre materiales con diferentes bandas prohibidas. En la figura 2, este proceso se indica con flechas negras con sentido de izquierda a derecha: la transferencia de carga de electrones en la banda de conducción y de huecos en la banda de valencia. En el extremo derecho del diagrama se lleva a cabo la recombinación radiativa, indicada con la flecha violeta; la flecha roja indica las pérdidas de energía en forma de calor. La energía de emisión E3 resulta de la suma de E1 y E2 menos las pérdidas, lo que genera la emisión de un fotón de mayor energía (Chen et al., 2016; Zhang et al., 2019).

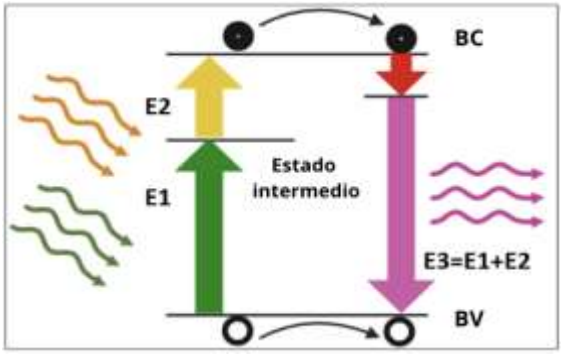


Figura 2. Mecanismo upconversion en heteroestructura.

La ventaja de las heteroestructuras radica en la recolección de dos fotones con distintas longitudes de onda que ocurre en las bandas de energía (generalmente en un pozo cuántico), ya que posee una mayor cantidad de densidad de estados disponibles para ser ocupados por los electrones. Este fenómeno no se presenta en nanopartículas dopadas con lantánidos ni en las moléculas que utilizan el mecanismo de aniquilación triplete triplete (Chen et al., 2018; Milleville et al., 2019).

Soluciones con nanoestructuras

Las nanoestructuras son heteroestructuras de tamaño nanométrico. En la nanotecnología se desarrollan los puntos cuánticos o cristales nanométricos, los cuales, son estructuras creadas con materiales semiconductores. Estos son fotoactivos, lo que significa que pueden absorber luz y son capaces de emitirla posteriormente. La luz que emite cada punto cuántico presenta un color específico (o una longitud de onda), dependiendo del tamaño de su núcleo. En las investigaciones para generar luz a partir de la energía solar, se encuentra el estudio de nanoestructuras de puntos cuánticos (QDs) y la aplicación de la ingeniería en heteroestructuras. Estas se han estudiado, por ejemplo, para absorber fotones en el infrarrojo y emitir en el visible, empleados para mejorar el rendimiento de la

celda solar, aprovechando fotones que no son absorbidos por esta (Chen et al., 2016).

Respecto al modelado del fenómeno UC, existen pocas investigaciones con compuestos de los elementos de los grupos III y V, sintetizados mediante MBE, deposición química de vapor (CVD) o síntesis coloidal en QDs. Estos métodos permiten un control preciso sobre el tamaño y la forma de las nanoestructuras, especialmente en puntos cuánticos, donde el tamaño reducido de partícula genera un mayor confinamiento cuántico del par electrón-hueco. Esto se debe a un incremento de estados en la banda prohibida, lo que da lugar a una estructura similar a una escalera de estados discretos, favoreciendo una mayor absorción y emisión en estos materiales nanométricos. Actualmente, se han propuesto modelos computacionales para describir los fenómenos electrónicos como generación, recombinación y transferencias de carga en una heterounión para UC. Teóricamente, es posible diseñar una “doble banda” mediante la disposición de materiales que absorban fotones con dos longitudes de onda distintas y emitan un fotón de mayor energía. Esto se logrará mediante ingeniería de bandas, aprovechando las transiciones entre bandas e intrabandas, con el objetivo de utilizar un mayor rango del espectro solar y aumentar la eficiencia. En la figura 3 se muestran dos heteroestructuras reportadas en la literatura para lograr el fenómeno UC. En la Fig. 3 a) se puede apreciar que la UC se consigue mediante la absorción de un segundo fotón en la banda de conducción, es decir, absorción intrabanda; por otro lado, en la Fig. 3 b) se muestra el mismo fenómeno UC, pero en este caso la absorción del segundo fotón ocurre en la banda de valencia (Chen et al., 2018).

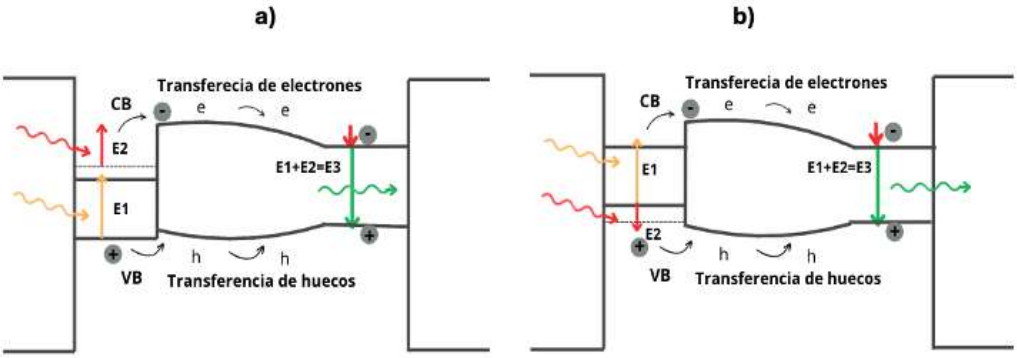


Figura 3. Heteroestructuras upconversion a) intrabanda en CB b) intrabanda en VB.

Los semiconductores heteroestructurados, en particular los QDs, son una de las mejores propuestas para recolectar dos fotones con longitudes de onda distintas, al menos en la propuesta teórica. Esto se debe a que ni las nanopartículas dopadas con lantánidos ni los materiales orgánicos por el mecanismo (TTA) se pueden modificar para tener dos bandas para la recolección de dos fotones con distinta longitud de onda; dichos materiales, en gran parte de sus aplicaciones, utilizan longitudes del infrarrojo, con longitud de excitación alrededor de 980 nm y emisiones de 500 nm a 700 nm, dependiendo de los materiales. Las nanopartículas dopadas con lantánidos han alcanzado longitudes de emisión alrededor de 400 nm. Las emisiones de UC en materiales de los grupos III y V, se reportan excitaciones entre 800 nm y 1500 nm, con emisiones en el infrarrojo, el amarillo y, en los últimos años, el rango del verde,

alrededor de 500 nm (Chen et al., 2016, 2018).

En el estado del arte se han desarrollado modelados que describen la física de las uniones en heteroestructuras para UC. Los parámetros principales incluyen el material absorbedor, el emisor y un tercer componente que confina los portadores de carga para permitir la recombinación radiativa. Esto se ha verificado mediante la eficiencia interna de conversión ascendente (iUQE), definida como la relación entre el número de fotones de alta energía emitidos y el número de pares de fotones de baja energía absorbidos. Los valores teóricos de iUQE oscilan entre 30% y 96%, lo que hace atractivo a este sistema. La eficiencia depende de las relajaciones o pérdida de energía por calor o, como se indica en el estado del arte, el sacrificio de energía del fotón (PES). Este fenómeno se consigue variando la concentración de los elementos que componen al material emisor, generando pendientes ascendente y descendente en las bandas de valencia y la banda de conducción, respectivamente. La ventaja de este tipo de heterounión es dirigir ambos portadores de carga hacia una zona de recombinación radiativa, su principal desventaja reside en la fabricación, ya que, hasta ahora, solo es posible mediante MBE, lo que incrementa significativamente los costos (Chen et al., 2016; Slejko & Lughi, 2021; Vázquez et al., 2022).

Algunas heteroestructuras y puntos cuánticos se han fabricado con técnicas de bajo costo como el rocío pirolítico ultrasónico. Esta técnica implica rociar una solución precursora sobre una superficie a temperaturas alrededor de 400 °C, donde la temperatura descompone las sustancias químicas; posteriormente, se deposita sobre un sustrato a temperaturas elevadas, lo que permite crear capas delgadas de diferentes compuestos, cuando se controlan adecuadamente los parámetros del proceso (Reyes, 2019; Slejko & Lughi, 2021; Wang et al., 2022). La deposición por baño químico o electrodeposición es otra técnica de fabricación en la cual los sustratos se sumergen en una solución de precursores químicos para depositar capas delgadas de material sobre la superficie. Al igual que en el método anterior, el baño químico permite controlar las condiciones de depósito para formar distintas capas. En ambas técnicas es necesario controlar las variables principales para generar el tamaño preciso de las dimensiones de las nanopartículas formadas con óxidos semiconductores, puntos cuánticos y materiales magnéticos. Esto abre la posibilidad de incorporar nuevos materiales, debido a la simplicidad, para fabricar diferentes tipos de nanoheteroestructuras, en las que se desarrolle el fenómeno de conversión ascendente, principalmente mediante puntos cuánticos (Reyes, 2019; Wang et al., 2022).

Estado del arte en México y en el mundo

En las investigaciones internacionales se reportan alrededor de 26,445 trabajos académicos de UC presentando el mismo crecimiento exponencial de las patentes desde 1970, con valores más altos en el 2022 y 2023, como se indica en la figura 4. Las naciones con el mayor número de investigaciones son China, los Estados Unidos de América, la India y Alemania. Dichas investigaciones se centran en nanomateriales luminiscentes dopados con lantánidos y fósforos, aplicaciones en luz láser, bioimagen dirigida a la detección en el rango del infrarrojo. Encabezando la lista los centros de investigación: La Academia de Ciencias de China, Universidad Jilin de China, el Instituto de Tecnología de Harbin. Entre los autores que encabezan las investigaciones se encuentran el Dr. Jeanbei Qiu, el Dr. Shiqing Xu, y la Dra. Weiping Qin (*The Lens - Búsqueda y análisis de patentes y publicaciones académicas*, 2025).

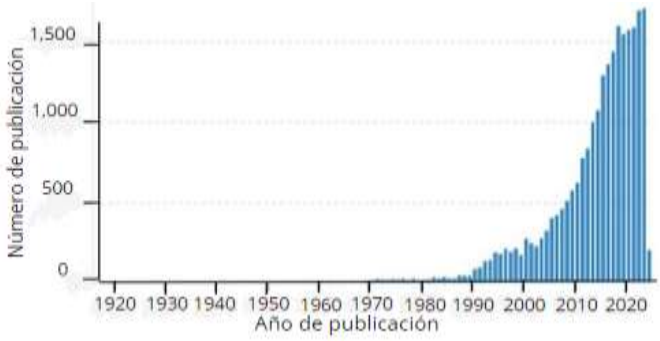


Figura 4. Crecimiento en el tiempo de las investigaciones sobre UC (*The Lens - Búsqueda y análisis de patentes y publicaciones académicas*, 2025).

Entre los investigadores a nivel internacional que han empleado materiales semiconductores para generar el fenómeno de la upconversion, está el profesor Joshua M. O. Zide de la Universidad de Delaware con alrededor de 34 publicaciones, algunas en semiconductores de los grupos III-V, y el profesor Eric Y. Chen de la misma universidad con 16 publicaciones, que incluyen el uso de materiales semiconductores para aplicar el fenómeno de UC como respaldo en celdas solares. En colaboración con ellos, el doctor Jing Zhang ha desarrollado investigaciones upconversion con lantánidos, semiconductores y perovskitas aplicadas a la salud. Otra investigadora destacada es la doctora Diane G. Sellers, quien ha trabajado con compuestos de InAs, GaAs para desarrollar el fenómeno de upconversion en aplicaciones de respaldo para celdas solares. Entre los colaboradores también se encuentran el doctor Yujun Zhong de University of Illinois at Urbana-Champaign (Chen et al., 2016; *The Lens - Búsqueda y análisis de patentes y publicaciones académicas*, 2025).

En México, se reportan alrededor de 144 trabajos de investigación en UC, con un crecimiento sostenible desde el 2000 y presentando crecimientos en los años 2010, 2015 y 2020 según el gráfico de la figura 5. Las investigaciones se centran en nanopartículas de conversión ascendente dopadas con lantánidos para la detección de alteraciones en las células, utilizando longitudes de onda en el infrarrojo. A nivel nacional, aún no se ha explorado la UC con materiales semiconductores. Los principales centros de investigación en este campo son el CIO (Centro de Investigación en Óptica), UNAM (Universidad Autónoma de México), el IPN (Instituto politécnico nacional) y el IMP (Instituto Mexicano del petróleo). Los investigadores con mayor producción en este tema son el Dr. Elder de la Rosa Cruz del (CIO), el Dr. Pedro Salas Castillo de la (UNAM) y el Dr. Luis Armando Díaz Torres del (CIO) (*The Lens - Búsqueda y análisis de patentes y publicaciones académicas*, 2025).

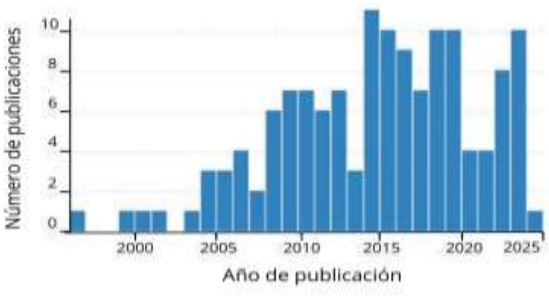


Figura 5. Crecimiento en el tiempo de las investigaciones nacionales sobre UC (*The Lens - Búsqueda y análisis de patentes y publicaciones académicas*, 2025).

Conclusión

Entre las técnicas para generar UC, se encuentran las nanopartículas dopadas con

lantánidos, las moléculas orgánicas mediante el mecanismo TTA y las heteroestructuras de semiconductores. Esta última se perfila con mayor potencial para alcanzar una mayor eficiencia de conversión, ya que la absorción de los fotones ocurre en las bandas de los semiconductores, lo que permite que una mayor cantidad de estados electrónicos participen en el proceso. En nanomateriales como los puntos cuánticos, se han fabricado y desarrollado modelados computacionales de heteroestructuras que explican el fenómeno de la conversión ascendente y su cinética correspondiente. Estos modelos ofrecen la ventaja de incorporar y comparar la eficiencia de nuevos materiales con band gaps, capaces de recolectar dos longitudes de onda distintas de menor energía y emitir una de mayor energía. Gracias a esto, es posible modelar y simular para obtener la mayor cantidad de información sobre los parámetros necesarios para una futura fabricación. No obstante, el modelado de heteroestructuras de bajo costo es prácticamente inexistente. Otro aspecto destacable es que, hasta la fecha, la mayor parte de la investigación nacional e internacional en UC se encuentra en nanomateriales dopados con lantánidos. Actualmente, los semiconductores heteroestructurados se posicionan como una alternativa para mejorar las eficiencias de conversión ascendente. En cuanto a las naciones con mayor número de investigaciones y patentes en UC. Destacan China y Estados Unidos de América, debido al gran apoyo gubernamental y del sector industrial. En México, los centros de investigación con mayor número de estudios en UC son el CIO y la UNAM, donde predominan las investigaciones de nanopartículas dopadas con lantánidos, óxidos y fósforos. Por lo que sería deseable establecer convenios de colaboración para fortalecer la investigación en nuestro país, enfocada en semiconductores heteroestructurados para generar UC, principalmente mediante técnicas de fabricación de bajo costo como rocío pirolítico ultrasónico y con materiales sustentables. Con el análisis de las propuestas y desarrollos tecnológicos en heteroestructuras UC, será posible contribuir a la investigación de nuevos materiales que incrementen la eficiencia de las celdas solares, los fotocatalizadores y la detección de cáncer por bioimagen.

Referencias

Cañarte Soledispa, K. (2015). Radiación Ultravioleta Y su efecto en la salud. *CIENCIA UNEMI*, *3*(4), 26–33. https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol3iss4.2010pp26-33p

Chen, E. Y., Milleville, C., Zide, J. M. O., Doty, M. F., & Zhang, J. (2018). Upconversion of low-energy photons in semiconductor nanostructures for solar energy harvesting. *MRS Energy & Sustainability*, *5*(1), 14. https://doi.org/10.1557/mre.2018.15

Chen, E. Y., Zhang, J., Sellers, D. G., Zhong, Y., Zide, J. M. O., & Doty, M. F. (2016). A Kinetic Rate Model of Novel Upconversion Nanostructures for High-Efficiency Photovoltaics. *IEEE Journal of Photovoltaics*, *6*(5), 1183–1190. https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2016.2567101

De La Mora, M. B., Amelines-Sarria, O., Monroy, B. M., Hernández-Pérez, C. D., & Lugo, J. E. (2017). Materials for downconversion in solar cells: Perspectives and challenges. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *165*, 59–71. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.02.016

Du, Y., Ai, X., Li, Z., Sun, T., Huang, Y., Zeng, X., Chen, X., Rao, F., & Wang,

F. (2021). Visible-to-Ultraviolet Light Conversion: Materials and Applications. *Advanced Photonics Research*, *2*(6), 2000213. https://doi.org/10.1002/adpr.202000213

Hernández, R. H. (2017). *Análisis de factibilidad para la instalación de un sistema de energía limpia mediante celdas fotovoltaicas para la alimentación eléctrica del edificio 4 en el ITSLV.* [Tesis, ITSLV, La Venta Tabasco]. http://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1020/97

La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Una oportunidad para América Latina y el Caribe (with Bárcena, A.). (2018). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Méndez-Castillo, M. D., García-Hipólito, M., Zamora-Peredo, L., Sumoza-Toledo, A., Izaguirre-Hernández, I. Y., Casañas Pimentel, R. G., Martínez-Castillo, J., García-González, L., Hernández Torres, J., Báez-Rodríguez, A., & Falcony, C. (2024). Up-Conversion Emissions from HfO_2: Er^{3+} , Yb^{3+} Nanoparticles Synthesized by the Hydrothermal Method. *ACS Omega*, *9*(36), 37560–37571. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00808

Méndez-Castillo, M. D., Zamora-Peredo, L., García-Hipólito, M., Hernández-Torres, J., García-González, L., García-Velasco, A. C., Álvarez-Fragoso, O., Báez-Rodríguez, A., Cardoso-Ávila, P. E., & Falcony, C. (2023). Structural, morphological and luminescence properties of hafnia nanoparticles obtained by hydrothermal synthesis. *Ceramics International*, *49*(24), 41123–41132. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.08.169

Milleville, C. C., Chen, E. Y., Lennon, K. R., Cleveland, J. M., Kumar, A., Zhang, J., Bork, J. A., Tessier, A., LeBeau, J. M., Chase, D. B., Zide, J. M. O., & Doty, M. F. (2019). Engineering Efficient Photon Upconversion in Semiconductor Heterostructures. *ACS Nano*, *13*(1), 489–497. https://doi.org/10.1021/acsnano.8b07062

Nolasco, J. C., Castro-Carranza, A., León, Y. A., Briones-Jurado, C., Gutowski, J., Parisi, J., & Von Hauff, E. (2019). Understanding the open circuit voltage in organic solar cells on the basis of a donor-acceptor abrupt (p-n++) heterojunction. *Solar Energy*, *184*, 610–619. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.031

Reyes, J. R. A. (2019). *Heterouniones semiconductoras de ZnO y Bi2O3 con actividad fotocatalítica en el visible* [Tesis de Maestria, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO]. https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000796671

Sellers, D. G., Zhang, J., Chen, E. Y., Zhong, Y., Doty, M. F., & Zide, J. M. O. (2016). Novel nanostructures for efficient photon upconversion and high-efficiency photovoltaics. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *155*, 446–453. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.06.043

Slejko, E. A., & Lughi, V. (2021). Upconversion photoluminescence in colloidal CdSe/CdS nanocrystal-based solid films. *Nano-Structures & Nano-Objects*, *26*, 100742. https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2021.100742

The Lens—Búsqueda y análisis de patentes y publicaciones académicas. (2025). [The Lens]. The Lens - Búsqueda y análisis de patentes y publicaciones académicas. https://www.lens.org/lens

Uhlenbrook, S. (2019). *No dejar a nadie atrás informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2019*. UNESCO.

Vázquez, A., Castro-Carranza, A., Rodríguez, M., Maldonado, J. L., Castro-Chacón, A., García-González, L., Hernández-Torres, J., Martínez-Castillo, J., Zamora-Peredo, L., Gutowski, J., & Nolasco, J. C. (2022). Numerical study of efficient ternary planar hybrid solar cells using simple boron molecules as organic compounds. *Optical Materials*, *132*, 112852. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.112852

Wang, J., Yuan, Y., Schneider, J., Zhou, W., Zhu, H., Cai, T., & Chen, O. (2022). Quantum Dot-based Luminescent Solar Concentrators Fabricated through the Ultrasonic Spray-Coating Method. *ACS Applied Materials & Interfaces*, *14*(36), 41013–41021. https://doi.org/10.1021/acsami.2c11205

Zhang, J., Chen, E. Y., Doty, M. F., & Zide, J. M. O. (2019). Sensitivity analysis of the theoretical performance of semiconductor upconversion nanostructures. *Journal of Applied Physics*, *126*(4), 044301. https://doi.org/10.1063/1.5095817