

FACHADAS ADAPTATIVAS MULTIFUNCIONALES PARA EDIFICIOS ENERGÉTICAMENTE EFICIENTES

Amador Menéndez Velázquez¹, Ana Belén García Delgado²

¹ Centro Tecnológico IDONIAL, Avilés, España, amador.menendez@idonial.com

² Centro Tecnológico IDONIAL, Avilés, España, amador.menendez@idonial.com

Resumen

Aproximadamente el 40 % de la demanda energética de los edificios se destina a calefacción y refrigeración. En esta comunicación se presentan fachadas inteligentes capaces de regular de forma autónoma la entrada de luz y calor, reduciendo así el consumo energético asociado a la climatización.

La tecnología hace usos de materiales inteligentes fotocromáticos, activados por la radiación solar, y termocrómicos, sensibles a variaciones de temperatura ambiental, que alcanzan tiempos de transición muy cortos. Esta respuesta ultrarrápida les permite adaptarse casi instantáneamente a las condiciones ambientales y maximizar su potencial de ahorro energético. Adicionalmente, estas ventanas y fachadas pueden incorporar funcionalidad fotovoltaica, lo que posibilita la generación de energía eléctrica, estando además optimizadas para la captura de radiación solar en un amplio rango espectral.

Estos resultados ponen de manifiesto el enorme potencial de los materiales inteligentes para transformar las envolventes arquitectónicas en sistemas activos, multifuncionales y energéticamente eficientes, manteniendo al mismo tiempo el confort visual y térmico, aspecto al que se le presta especial atención en esta comunicación. Adicionalmente, se considera el carácter dual de estas tecnologías, al poder conjugar sostenibilidad energética con funcionalidades avanzadas como camuflaje adaptativo y reducción de firma óptica.

Palabras Clave: materiales inteligentes, fotocromáticos, termocrómicos, fotoeléctrico, iluminación

1 Introducción

En esta comunicación se presentan diferentes aproximaciones desarrolladas por IDONIAL orientadas a la arquitectura sostenible del futuro, abordando tanto tecnologías de generación integrada de energía como estrategias de eficiencia energética, sin olvidar la calidad de la luz transmitida y en confort de sus ocupantes.

1.1 Fachadas fotovoltaicas semitransparentes

Las ventanas y fachadas fotovoltaicas semitransparentes representan una tecnología disruptiva en la construcción sostenible moderna, combinando la generación de energía con la transmisión de luz natural [1]. El concepto de fotovoltaica integrada en edificios (BIPV) ha evolucionado significativamente desde la instalación de paneles en techos hacia soluciones arquitectónicas donde las fachadas se transforman en generadores activos de energía. Específicamente, las fachadas y ventanas semitransparentes permiten que los edificios

aprovechen simultáneamente la energía solar para generar electricidad mientras mantienen la transmisión de luz visible para iluminación.

El avance en tecnologías de celdas solares orgánicas, perovskitas y silicio amorfo ha permitido desarrollar dispositivos de fotovoltaica semitransparente. Esta característica dual transforma las ventanas tradicionales en componentes multifuncionales que generan cierta energía eléctrica, proporcionan aislamiento térmico y mantienen conexión visual con el exterior. Una limitación de estas tecnologías es que solo capturan una fracción limitada de la radiación solar. Por eso en este artículo se expondrán tecnologías con más potencial como la del denominado concentrador solar luminiscente [2], que permite ampliar el ancho de banda de captura espectral mediante una combinación adecuada de diferentes materiales luminiscentes operando en diferentes partes del espectro solar.

1.2 Fachadas inteligentes crómicas

Las ventanas y fachadas de vidrio son responsables de pérdidas significativas de calor en invierno y ganancias no deseadas en verano. En respuesta a esta problemática, las fachadas inteligentes fotocromáticas emergen como una tecnología prometedora para la adaptación dinámica de los edificios a condiciones ambientales variables. Las ventanas fotocromáticas son dispositivos ópticos inteligentes que automáticamente cambian sus propiedades de transmisión de luz y calor en respuesta a la radiación solar, sin requerir aporte de energía externa [3]. Esta característica las distingue de otras tecnologías de control solar, permitiendo un manejo autónomo y continuo del flujo luminoso y térmico. Las ventanas termocromáticas constituyen otra solución autónoma que permite la regulación dinámica de la transmisión solar sin requerir energía externa. Estos materiales cambian sus propiedades ópticas de forma reversible en respuesta a cambios de temperatura, permitiendo que los edificios adapten automáticamente su comportamiento térmico a las condiciones climáticas exteriores [4].

La eficiencia energética en edificios es crítica para la reducción del consumo energético. Se estima que edificios con “glazing” dinámico pueden ahorrar hasta el 37% en energía en climas tropicales, mientras que en otros contextos los ahorros pueden rondar el 22-24% cuando se comparan con sistemas convencionales de sombreado.

En todo caso, una limitación de estas fachadas inteligentes adaptativas es la lenta la velocidad de transición entre estados (transparente vs. opaco), que puede llegar a horas, lo que se traduce en importantes pérdidas energéticas (calor que está entrado o escapando del edificio cuando no debería hacerlo). Por eso en este artículo se exponen casos de éxito, que han permitido reducir lo tiempo de transición de horas a segundos, siendo en algunos casos la transición inmediata bajo la acción del correspondiente estímulo.

1.3 Calidad de la luz transmitida a interiores

Más allá del aspecto energético, existe una dimensión igualmente importante de estas tecnologías, como son las condiciones de confort visual y calidad de iluminación interior para los habitantes, medida a través de parámetros como el índice de reproducción cromática (CRI).

El Índice de Reproducción Cromática (CRI), también conocido como Ra, es una métrica fundamental desarrollada por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) que cuantifica la capacidad de una fuente de luz para reproducir fielmente los colores de los objetos comparados con una fuente de referencia estándar como el sol. Tradicionalmente, para el cálculo del CRI se utilizan ocho colores de referencia. El CRI toma valores entre 0 y 100, donde 100 representa

reproducción de color idéntica a la fuente de referencia. El CRI es un parámetro muy utilizado en iluminación artificial, especialmente tras la llegada de los fuentes lumínicas LED capaces de emitir luz de diferentes características espectrales [5–7].

La reproducción cromática no es meramente una preferencia estética; tiene profundos impactos en la salud y el bienestar de los ocupantes. Investigaciones multidisciplinarias que combinan psicología y fisiología humana han demostrado que la calidad de la luz afecta significativamente la percepción visual, el rendimiento cognitivo, el estado de ánimo y la salud. Específicamente, una reproducción cromática pobre puede resultar en fatiga visual, además de otros efectos negativos.

Por el contrario, sistemas de iluminación con CRI elevados han demostrado mejorar: (1) la satisfacción general del ocupante con el ambiente interior, (2) la precisión en tareas que requieren discriminación cromática fina, y (3) la sensación psicológica de “naturalidad” del ambiente.

Ciertos espacios funcionales dentro de edificios tienen requisitos particularmente exigentes de reproducción cromática. Estos incluyen: (1) espacios médicos donde se requiere discriminación cromática para evaluación diagnóstica, (2) galerías de arte donde la fidelidad cromática es crítica para la experiencia estética, (3) espacios de inspección de calidad en fabricación donde errores cromáticos pueden resultar en defectos de producto no detectados, y (4) espacios donde la representación precisa del color de productos afecta las decisiones de compra del consumidor.

2 Resultados

Tras la introducción de las diferentes tecnologías consideradas, en esta sección se presentan algunos de los resultados más relevantes alcanzados en los laboratorios de IDONIAL.

2.1 Ventana fotoeléctrica: concentrador solar luminiscente

Un Concentrador Solar Luminiscente (LSC, por sus siglas en inglés “Luminescent Solar Concentrator”) es un dispositivo óptico que absorbe la radiación solar a través de una gran área y la concentra en los bordes, donde se colocan pequeñas células fotovoltaicas [8–13]. El dispositivo consiste en un sustrato o matriz transparente (como vidrio o una lámina polimérica) recubierto o dopado con especies luminiscentes que absorben fotones del espectro solar y los re-emiten en longitudes de onda específicas. Esta luz emitida se propaga a través de la guía de ondas por reflexión interna total hasta llegar a los bordes, donde se concentra en células solares para convertirse en electricidad. La figura 1 representa una imagen de estos dispositivos.

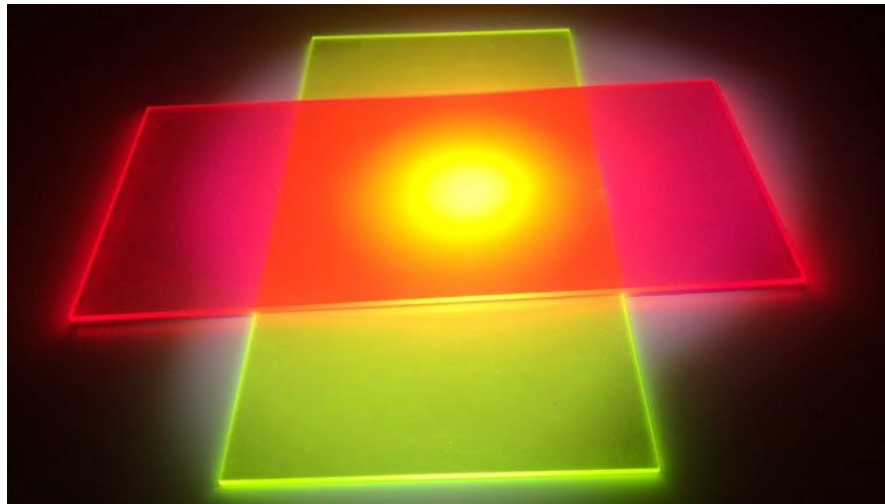


Figura 1. Concentradores solares luminiscentes: capturan la luz solar y la reenvían a los extremos. En la imagen se puede apreciar cómo los bordes brillan con más intensidad

Una de las claves del rendimiento de los LSCs radica en maximizar la cantidad de luz solar capturada. Usar combinaciones de tintes luminiscentes es fundamental. Y es que los tintes individuales típicamente absorben en rangos de longitud de onda limitados. Al combinar múltiples tintes, se logra absorber luz en un rango espectral mucho más amplio del espectro solar. En esta comunicación mostramos ejemplos de concentradores solares luminiscentes que capturan la radiación solar en un amplio rango espectral mediante una combinación adecuada de moléculas luminiscentes. La figura 2 muestra el espectro de excitación o activación de estos concentradores solares luminiscentes desarrollados. El eje de ordenadas representa la intensidad relativa de excitación y el eje de abscisas la longitud de onda de excitación. Como se puede apreciar en la figura, la excitación abarca el espectro ultravioleta (desde 300 nm hasta 380 nm) y una fracción significativa del visible (desde 380 nm hasta 625 nm).

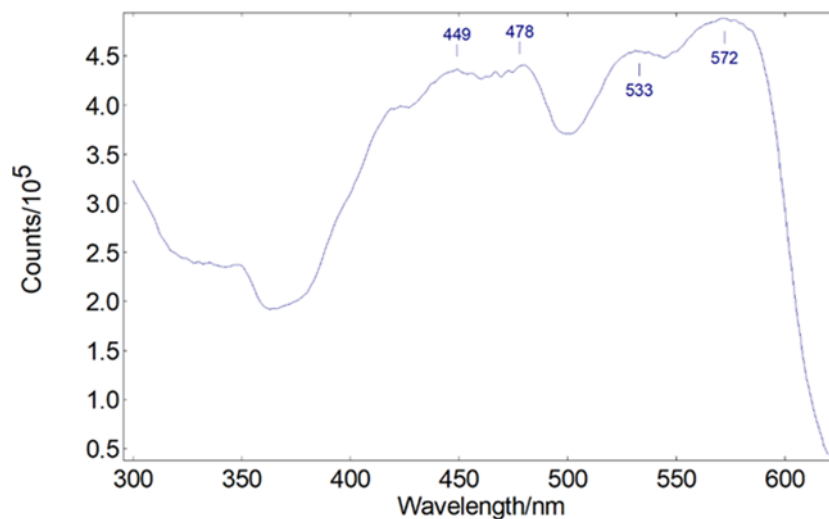


Figura 2. Espectro de excitación de los concentrados solares luminiscentes desarrollados

Por otra parte, como se mencionaba en la introducción, un aspecto crucial a considerar es el de la calidad de la luz transmitida, medida a través de parámetros como el CRI. La Tabla 1 muestra el valor de CRI para tres concentradores desarrollados, junto con el espesor de la capa luminiscente y la correspondiente transmitancia. LSC 3 presenta un valor de CRI bajo, pero LSC 2 ya presenta un valor aceptable (superior a 70) y LSC 1 un valor de CRI bueno.

Tabla 1. Espesor, transmitancia y CRI de los concentradores solares luminiscentes (LSC)

| Dispositivo | Espesor capa | Transmitancia | CRI |
|-------------|--------------|---------------|------|
| LSC 1 | 0,3 mm | 73,0 % | 81,1 |
| LSC 2 | 0,5 mm | 66,1 % | 70,4 |
| LSC 3 | 0,8 mm | 60,1 % | 59,5 |

2.2 Fachadas inteligentes fotocromicas

Los tiempos de transición rápidos son críticos para numerosas aplicaciones. En sistemas de ventanas inteligentes, por ejemplo, las velocidades de oscurecimiento y retorno al estado transparente determinan el confort y la eficiencia energética. Por tanto, la optimización de tiempos de transición es un objetivo central en la investigación de materiales fotocromicos avanzados.

La movilidad molecular de las especies fotocromicas en la matriz polimérica de soporte emerge como el factor dominante que controla estas velocidades de transición. El entorno local dentro de la matriz, incluyendo confinamiento y naturaleza de las interacciones cromóforo-polímero, contribuye al rendimiento cinético. Avances recientes como los mostrados en esta comunicación han demostrado que mediante diseño molecular inteligente y optimización de matriz polimérica, se pueden lograr grandes mejoras en velocidades de transición, abriendo nuevas fronteras en tecnologías de materiales inteligentes.

En algunos los dispositivos fotocromicos desarrollados se han alcanzado transiciones casi instantáneas y con variaciones significativas de transmitancia entre los dos estados. A continuación se muestra una tabla de estos dispositivos, junto con el correspondiente espesor de la capa o lámina fotocromica y las variaciones de transmitancia entre los estados desactivado y activado.

Tabla 2. Espesor y transmitancias de los dispositivos fotocromicos en sus dos estados

| Dispositivo | Espesor capa | Transmitancia | Transmitancia | Variación |
|---------------|--------------|--------------------|-----------------|---------------|
| | | Estado desactivado | Estado activado | transmitancia |
| Fotocromico 1 | 0,3 mm | 92,3 % | 70,6 % | 21,7 % |
| Fotocromico 2 | 0,5 mm | 91,9 % | 63,9 % | 28,0 % |
| Fotocromico 3 | 0,8 mm | 90,0 % | 61,9 % | 28,1 % |

Asimismo, se considera el valor del CRI como parámetro de la calidad de la luz visual transmitida en ambos estados. La tabla 3 muestra los correspondientes valores de CRI. Como se puede observar, los valores de CRI son muy buenos en los diferentes dispositivos fotocromáticos, tanto en los estados desactivado como el activado.

Tabla 3. Espesor y CRI de los dispositivos fotocromáticos en sus dos estados

| Dispositivo | Espesor capa | CRI | |
|-----------------|--------------|--------------------|-----------------|
| | | Estado desactivado | Estado activado |
| Fotocromático 1 | 0,3 mm | 96,2 | 89,5 |
| Fotocromático 2 | 0,5 mm | 96,1 | 89,6 |
| Fotocromático 3 | 0,8 mm | 95,7 | 91,4 |

La Figura 3 muestra uno de estos dispositivos fotocromáticos en sus dos estados (desactivado y activado). En la imagen se puede apreciar claramente el cambio de propiedades ópticas.

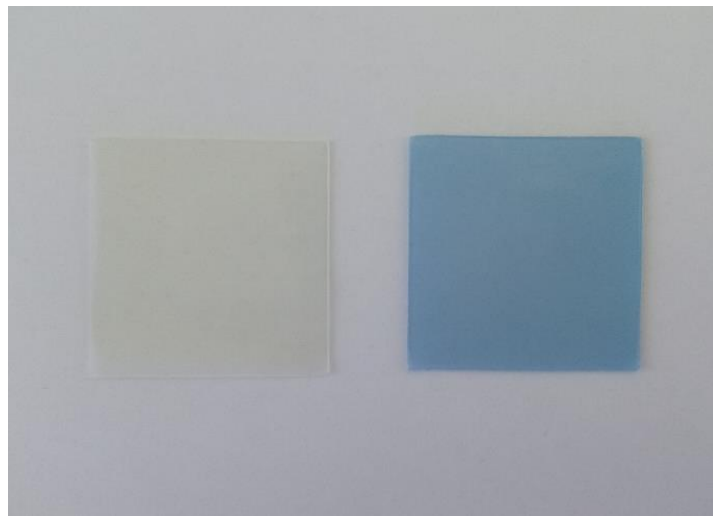


Figura 3. Dispositivo fotocromático en sus estados desactivado (izquierda) y activado (derecha)

2.3 Fachadas inteligentes termocrómicas

El dióxido de vanadio (VO_2) puro presenta una temperatura de transición de aproximadamente 68°C , que es demasiado elevada para aplicaciones prácticas en edificios. En esta comunicación presentamos alternativas al dióxido de vanadio, basadas en materiales orgánicos, que permiten transiciones a 35°C , y manteniendo asimismo una rápida velocidad de respuesta.

La tabla 4 muestra las variaciones de transmitancia de los dispositivos termocrómicos desarrollados, junto con su correspondientes valores de CRI en los dos estados y el espesor de la lámina termocrómica. Nuevamente se puede concluir que los valores de CRI son muy buenos tanto en los estados desactivado como activado.

Tabla 4. Espesor, variación de transmitancia y CRIs de los dispositivos termocrómicos en sus dos estados

| Dispositivo | Espesor capa | Variación transmitancia | CRI | |
|----------------|--------------|-------------------------|-----------------|--------------------|
| | | | Estado activado | Estado desactivado |
| Termocrómico 1 | 0,5 mm | 26,3 % | 93,4 | 96,1 |
| Termocrómico 2 | 0,5 mm | 16,0% | 97,5 | 96,1 |
| Termocrómico 3 | 0,5 mm | 29,6 % | 83,8 | 94,8 |

2.4 Más allá de la eficiencia energética: tecnologías duales

Estas tecnologías y desarrollos encuentran aplicación no solo en el sector energético, sino también en otros ámbitos, como el de la defensa. En el caso de los concentradores solares luminiscentes, lo crucial es su mecanismo de absorción y reemisión, que reduce significativamente la reflexión superficial especular característica de los materiales habitualmente detectables por sistemas ópticos enemigos. Un LSC optimizado, como el aquí descrito, absorbe la mayor parte de la radiación ultravioleta y visible incidente y reemite una fracción considerable específicamente hacia los bordes, minimizando así la radiación susceptible de ser detectada por sistemas de vigilancia pasiva.

Por otra parte, los materiales fotocromáticos y termocrómicos aquí descritos han evolucionado significativamente desde su concepción inicial como sistemas para gestión energética de edificios, expandiéndose hacia aplicaciones estratégicas de defensa y camuflaje adaptativo, mediante cambios de color para mimetizar con el entorno [14]. Esta convergencia entre tecnología civil y militar refleja un cambio paradigmático en la ciencia de materiales, donde un único sustrato funcional puede proporcionar múltiples funcionalidades.

3 Conclusiones

Los edificios representan aproximadamente entre el 30 % y el 40 % del consumo energético global, destinándose alrededor del 40 % de su consumo a calefacción y refrigeración. En este contexto, las ventanas y los sistemas envolventes desempeñan un papel crítico, al ser responsables de una parte significativa de las pérdidas y ganancias térmicas de los edificios. Por ello, el desarrollo de tecnologías inteligentes adaptativas se ha convertido en una línea estratégica de investigación para alcanzar edificaciones sostenibles.

Estos sistemas constituyen una solución altamente innovadora, capaz de regular dinámicamente y de forma autónoma la transmisión de radiación solar sin requerir aporte energético externo. Esta capacidad de autorregulación supone un cambio de paradigma frente a las ventanas estáticas convencionales, permitiendo reducciones sustanciales en el consumo energético asociado a climatización.

Asimismo, las nuevas generaciones de ventanas inteligentes pueden integrar funcionalidades fotoeléctricas, siendo capaces de captar radiación solar y transformarla directamente en electricidad. Esta doble funcionalidad —regulación térmica y generación energética— resulta de especial relevancia para el desarrollo de edificios de consumo energético casi nulo y para la transición hacia modelos constructivos más sostenibles y eficientes.

Además del factor energético, otro aspecto crucial a considerar con estas tecnologías es la calidad de la luz transmitida al interior de los edificios, evaluada mediante parámetros como el índice de reproducción cromática (CRI). La optimización simultánea de eficiencia energética, confort visual y capacidad de generación fotovoltaica constituye uno de los grandes retos y oportunidades en el ámbito de la arquitectura avanzada y los materiales inteligentes.

En esta comunicación se han presentado diferentes desarrollos innovadores impulsados por IDONIAL en el ámbito de materiales fotocromáticos, termocromáticos y luminiscentes, demostrando el enorme potencial de estas tecnologías para transformar las envolventes arquitectónicas en sistemas activos, inteligentes y energéticamente eficientes, sin olvidar un aspecto esencial: garantizar la calidad de la luz y el bienestar visual de los ocupantes de los edificios.

4 Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades a través del Centro para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (CDTI), contrato número CER-20251005, dentro del marco de los “Centros Tecnológicos de Excelencia Cervera”.

5 Referencias

1. Yu, J.; Pu, J.; Xie, D.; Ai, Z.; Lang, Y.; Cao, M.; Duan, C.; Lu, L.; Li, G. Semitransparent Organic Photovoltaics with Wide Geographical Adaptability as Sustainable Smart Windows. *Nat Commun* **2025**, *16*, 7421, doi:10.1038/s41467-025-62546-8.
2. Menéndez-Velázquez, A. Nuevos Desafíos En La Energía Solar: El Concentrador Solar Luminiscente. *Química e Industria* **2011**, *594*, 30–33.
3. Recent Advances in Photochromic Smart Windows Based on Inorganic Materials - Meng - 2024 - Responsive Materials - Wiley Online Library Available online: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/rpm.20240001> (accessed on 27 May 2026).
4. Wang, D.; Chen, G.; Fu, J. Multifunctional Thermochromic Smart Windows for Building Energy Saving. *J. Mater. Chem. A* **2024**, *12*, 12960–12982, doi:10.1039/D4TA01767F.

5. Menéndez-Velázquez, A.; Morales, D.; García-Delgado, A.B. Sunlike White Light-Emitting Diodes Based on Rare-Earth-Free Luminescent Materials. *Materials* **2022**, *15*, 1680, doi:10.3390/ma15051680.
6. Menéndez-Velázquez, A.; Morales, D.; García-Delgado, A.B. Light Pollution and Circadian Misalignment: A Healthy, Blue-Free, White Light-Emitting Diode to Avoid Chronodisruption. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **2022**, *19*, 1849, doi:10.3390/ijerph19031849.
7. Menéndez-Velázquez, A.; García-Delgado, A.B.; Morales, D. Human-Centric Lighting: Rare-Earth-Free Photoluminescent Materials for Correlated Color Temperature Tunable White LEDs. *International Journal of Molecular Sciences* **2023**, *24*, 3602, doi:10.3390/ijms24043602.
8. Mulder, C.L.; Reuswig, P.D.; Velázquez, A.M.; Kim, H.; Rotschild, C.; Baldo, M.A. Dye Alignment in Luminescent Solar Concentrators: I. Vertical Alignment for Improved Waveguide Coupling. *Opt. Express, OE* **2010**, *18*, A79–A90, doi:10.1364/OE.18.000A79.
9. Menéndez-Velázquez, A.; Mulder, C.L.; Thompson, N.J.; Andrew, T.L.; Reuswig, P.D.; Rotschild, C.; Baldo, M.A. Light-Recycling within Electronic Displays Using Deep Red and near Infrared Photoluminescent Polarizers. *Energy Environ. Sci.* **2012**, *6*, 72–75, doi:10.1039/C2EE23265K.
10. Delgado-Sanchez, J.-M.; Lillo-Bravo, I.; Menéndez-Velázquez, A. Enhanced Luminescent Solar Concentrator Efficiency by Foster Resonance Energy Transfer in a Tunable Six-Dye Absorber. *International Journal of Energy Research* **2021**, *45*, 11294–11304, doi:10.1002/er.6533.
11. Menéndez-Velázquez, A.; Torres-García, S.; García-Delgado, A.B.; Morales, D.; Medina-Alayón, M.; Acosta-Mora, P.; del-Castillo, J.; Esparza, P.; Borges, M.E.; Yanes, A.C.; et al. Towards a Luminescent Solar Concentrator with Ultra-Broadband Absorption and Spectral Conversion for Optimizing Photovoltaic Solar Cell Response: “The Photonic Cannon Shot.” *Optical Materials* **2023**, *142*, 114005, doi:10.1016/j.optmat.2023.114005.
12. García-Delgado, A.B.; Menéndez-Velázquez, A.; Méndez-Ramos, J.; Torres-García, S.; Medina-Alayón, M.; Acosta-Mora, P.; del-Castillo, J.; Borges, M.E.; Esparza, P. Sequential Up-Conversion and down-Shifting Luminescence with a Tandem Luminescent Solar Concentrator Based on Rare-Earth and Organic Materials. *Journal of Luminescence* **2024**, *273*, 120671, doi:10.1016/j.jlumin.2024.120671.
13. Barragán Sánchez-Lanuza, M.; Lillo-Bravo, I.; Menéndez-Velázquez, A.; Delgado-Sanchez, J.-M. Diffuse Radiation Influence on the Performance of Luminescent Solar Concentrators. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **2024**, *276*, 113073, doi:10.1016/j.solmat.2024.113073.
14. Biswas, A.; Soudi, M.; Mukherjee, S.; Cencillo-Abad, P.; Patel, J.; Chanda, D. Dynamic Control of Phase for Tunable Structural Colors. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **2025**, *122*, e2520990122, doi:10.1073/pnas.2520990122.