

Ventanas... ¿dinámicas inteligentes? Un vistazo seguro y ecológico hacia el futuro

G. Daniel Rangel-Partido, Angel J. Ferrer-Montiel, Miguel Guerrero, Martín González Salinas, Jesús Rodríguez-Romero *

Group of Advanced Materials for Energy Research (GAMER-Lab), Departamento de Química Orgánica, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México.

* Autor de correspondencia: jrr@quimica.unam.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 27 de septiembre de 2024

Aceptado: 26 de octubre de 2024

Publicado: 3 de noviembre de 2024

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.217>

Resumen: Las ventanas inteligentes se vislumbran como una solución amigable con el ambiente para abordar un problema asociado con el calentamiento global: las altas temperaturas en interiores. Estos dispositivos están diseñados específicamente para bloquear cierto tipo de radiación solar que es dañina y/o indeseable al añadir componentes a los vidrios convencionales. Una de estas radiaciones indeseables es la temida radiación ultravioleta (UV), la cual está relacionada con padecimientos tan graves como lo es el cáncer de piel. Sin embargo, no es la única. Otra radiación que ha adquirido gran relevancia es la radiación infrarroja (IR), que es la responsable de la sensación de calor. Las ventanas inteligentes tienen el propósito de actuar como filtros, bloqueando ciertos tipos de luz, como la luz UV, visible o la IR. Al bloquear la luz IR, estas ventanas se convierten en aislantes térmicos, evitando que el calor penetre al interior de inmuebles, automóviles u otros espacios durante las estaciones cálidas del año. Esta disminución de las temperaturas interiores se lograría sin gastos económicos extra, al igual que no se utilizaría ningún tipo de energía proveniente de fuentes fósiles. En este trabajo se darán a conocer distintos materiales con potencial para aplicarse en ventanas dinámicas inteligentes.

Palabras clave: Ventanas inteligentes, Ventanas dinámicas, materiales ecológicos, materiales cromogénicos, cambio climático.

Introducción

La especie humana se caracteriza por adaptar el entorno a sí misma, buscando siempre su beneficio y comodidad. Este hecho nos ha llevado a cierto nivel de desarrollo, aunque muchas veces hay efectos nocivos asociados. Un ejemplo muy evidente es el cambio climático, el cuál ha sido relacionado con el gran desarrollo industrial que experimentó la humanidad durante el siglo pasado. Unos de los efectos más notorios y perjudiciales asociados con el cambio climático es el incremento de las temperaturas máximas observadas. Incluso, durante el presente año, 2024, se rompieron varios récords de temperaturas en diversas regiones del país. Dichos aumentos de temperatura han demostrado que, aunque parecieran pequeños, generan problemas catastróficos, como lo podemos atestiguar fielmente en México (sequías prolongadas, inundaciones graves, generación de huracanes de potencias devastadoras, etc.). En México, según la CONAGUA (CONAGUA, 2024), durante el año 2000, la temperatura promedio fue de 20.8 °C, mientras que, en el año de 2024, la temperatura fue de aproximadamente 23.1 °C, lo que se traduce en un aumento de casi el 15% (aunque hay que considerar que, cuando se escribe este documento, en septiembre, están por venir meses que seguramente disminuirán la temperatura promedio final). Paralelamente, según *Our World in Data* (Samborska, 2024), la temperatura promedio del planeta ha experimentado cambios a lo largo del tiempo. Por ejemplo, en los años de 1940, 1980 y 2020, fue de 13.69 °C, 14.07 °C y 14.80 °C, respectivamente, mientras que en México se registraron temperaturas de 19.15 °C, 20.48 °C, 21.58 °C, correspondientemente, Figura 1.

Este aumento en la temperatura genera gastos monetarios no contemplados para conservar temperaturas interiores (ya sea casa habitación, autotransportes, etc.) en las que se pueda habitar de manera confortable. Más importante aún, se genera un considerable incremento en el gasto energético necesario para hacer funcionar ventiladores, aires acondicionados, entre otros reguladores térmicos. Como dato representativo, en grandes urbes de países desarrollados, el consumo energético de las edificaciones representa alrededor del 40% de la energía requerida por su población (Korgel, 2013). Además, aproximadamente el 50% del consumo de energía total de dichos inmuebles se debe al uso excesivo de dichos dispositivos electrónicos encargados de regular la temperatura interna (Shancheng Wang *et al.*, 2018). Este aumento en el consumo de energía, la cual se produce normalmente mediante el uso de combustibles fósiles, nos lleva a un círculo vicioso donde, en aras de tener temperaturas interiores aceptables, consumimos una mayor cantidad de energía, contribuyendo al calentamiento global, en lugar de combatirlo.

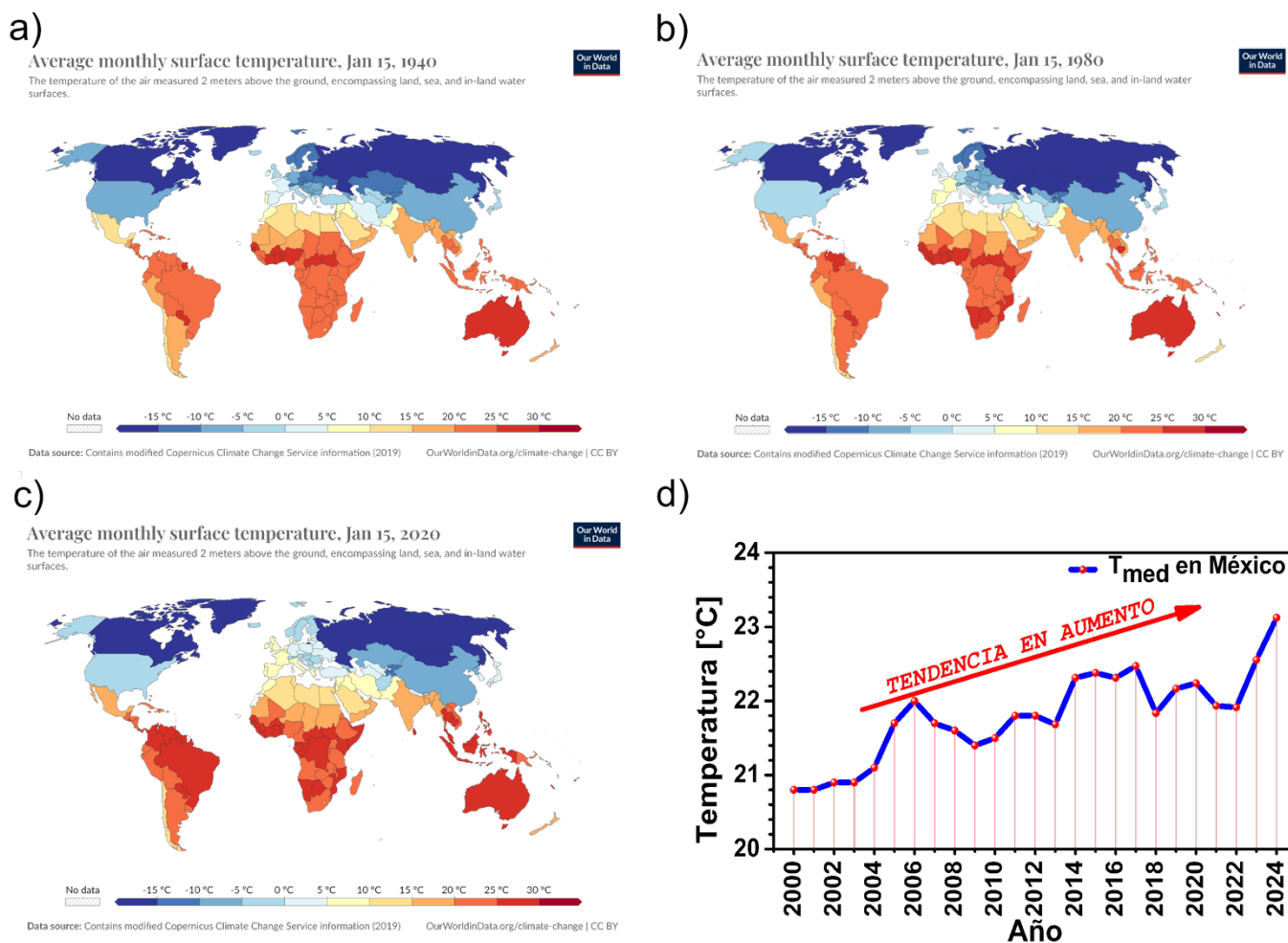


Figura 1. Tendencia del cambio de la temperatura en México y el mundo a lo largo de los años. a) temperatura promedio del mundo en el año de 1940; b) temperatura promedio del mundo en el año de 1980; c) temperatura promedio del mundo en el año de 2020; d) comportamiento de la temperatura promedio anual de México en el periodo de los años 2000-2024. Observar el cambio de la tonalidad, de azul a rojo, del país y de gran parte del planeta conforme transcurre el tiempo. Las imágenes a, b y c fueron tomadas de *Our World in Data* (Samborska, 2024)

Gran parte de la sobredemanda energética de un inmueble se debe a la manera en la que estos están contruidos, ya que no han sido diseñados desde un punto de vista sustentable. Las edificaciones comunes están contruidas con tres elementos principales: 1) techos, 2) paredes y 3) ventanas. De estos tres componentes, las ventanas son, energéticamente hablando, el eslabón más débil, debido al material con el que normalmente están fabricadas (vidrio). El vidrio posee una transmitancia óptica alta, es decir, permite que la mayor cantidad de la radiación proveniente del Sol pase a través de él. Recordemos que la transmitancia óptica se define como la cantidad de luz incidente que atraviesa un material específico (Bagan & Yamagata, 2015; Chen *et al.*, 2019). Al conjunto de la radiación solar se le conoce como espectro solar y está compuesta, a grandes rasgos, por radiación ultravioleta (UV), que es la más energética y la que desencadena enfermedades como el cáncer (Madronich & de Grijl, 1993); visible (Vis), la que nuestro ojo es capaz de detectar; e infrarroja (IR), la menos energética de las tres y que es responsable de la sensación de calor. Por tanto, ahora somos capaces de inferir que la alta transmitancia óptica de las ventanas es el factor clave en el incremento de la temperatura al interior de las construcciones durante las estaciones calurosas (Ke *et al.*, 2018), así como las responsables de una pérdida de energía, en forma de calor, en las estaciones frías. Dichas pérdidas pueden llegar a ser cercanas al 60% (Wang *et al.*, 2021).

Desarrollo

Convencionalmente, una ventana está fabricada de vidrio, el cual puede contener ciertos recubrimientos para cumplir con necesidades específicas, tales como dureza (vidrio templado), inastillable (laminado), que bloqueé la luz (tintado,

polarizado), etc. Una de las primeras propuestas más interesantes que ha logrado entrar al mercado con producción industrial son las ventanas de baja emisividad (baja-E). Tales ventanas están equipadas con capas delgadas de materiales que disminuyen completamente el paso de la luz, lo cual ha resultado en un ahorro energético de aproximadamente 10% en grandes edificaciones, al evitar que la radiación responsable del calentamiento penetre al interior, Figura 2. Sin embargo, la cantidad de luz que bloquea estas ventanas es imposible de modificar. Dicho en otras palabras, el cambio sobre las propiedades del vidrio es permanente. A dicho tipo de ventanas, en las cuales el cambio o modificación realizado no es manipulable, se les denomina *ventanas estáticas*.

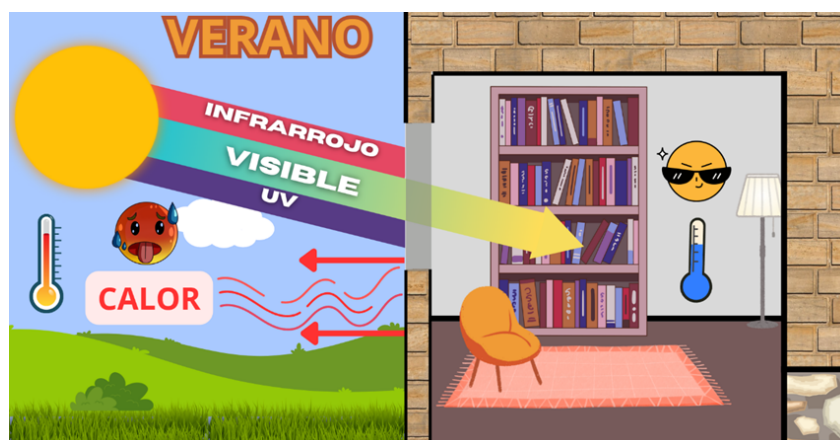


Figura 2. Esquema del comportamiento esperado de una ventana capaz de bloquear radiación UV e IR. Se puede observar que, mientras en el exterior la temperatura es alta, en el interior el ambiente es fresco (radiación IR disminuida). Adicionalmente, la radiación UV es bloqueada, lo que podría disminuir la aparición de ciertos tipos de cáncer.

En el ejemplo de las ventanas estáticas de baja emisividad el recubrimiento evita que la luz penetre al interior, lo cual es evidentemente favorable para todos nosotros, especialmente en días soleados y calurosos. En contraste, situémonos en un escenario donde la intensidad de la luz disminuye, como en las mañanas y las noches o, por ejemplo, días nublados. En este nuevo contexto, donde hay poca iluminación y calor, estaríamos forzados a permanecer en una cierta penumbra, a menos que, claro está, encendamos la luz (cayendo nuevamente en el círculo sin fin de gastar más energía \rightarrow calentamiento global \rightarrow etc.). Por tanto, queda claro que este tipo de ventanas, a pesar de contar con indudables ventajas, presenta el inconveniente de bloquear constantemente a la luz que recibe.

Por otro lado, desde hace tiempo se conocen materiales que cambian de color bajo ciertas circunstancias. A dichos materiales se les conoce como cromogénicos (Behera, 2022). De manera interesante, hay materiales en los que ese cambio de color se da de manera reversible. Un ejemplo podría ser un material que exhibe un color en ambientes fríos y un color distinto en ambientes cálidos, pudiendo repetir el ciclo determinado número de veces. Esto nos lleva a tener materiales con *transmitancia óptica dinámica*, ya que el cambio de color, e inherentemente su transmitancia óptica, es modulable, y por tanto controlable, en función del estímulo que le proporcionemos (la temperatura en nuestro ejemplo). Utilizando dichos materiales cromogénicos y teniendo en mente la problemática respecto a las ventanas estáticas, se ha considerado la idea de construir dispositivos que sean capaces, mediante cierto estímulo, de disminuir su transmitancia óptica de manera reversible. Tales dispositivos se han llamado *ventanas dinámicas inteligentes*.

Es importante definir que el adjetivo inteligente, en este contexto, está relacionado con que el material con el cual están modificados los vidrios que se ocupan como ventanas, responderá a algún estímulo: luz, electricidad, o calor, entre otros. Mientras que el adjetivo dinámicas indica que ese cambio que experimentan no es estático o permanente, sino que dicho material experimenta procesos reversibles entre los estados iniciales y finales determinado número de ciclos (material incoloro \rightarrow material coloreado \rightarrow material incoloro...). Por tanto, al tipo de ventanas que pueden cambiar sus propiedades de manera reversible y controlada, como el color (y en consecuencia su transmitancia óptica) dependiendo de los estímulos que reciba, se le conoce como *ventana dinámica inteligente*.

Se han evaluado ciertos estímulos con los que se puede modificar el color y por tanto la transmitancia de un material, dentro de los más representativos, se tienen:

- Fotocromismo: fenómeno en el cual el material cambia de un color inicial a un color final al ser expuesto a luz de cierta longitud de onda (Groeneveld *et al.*, 2020; Pan *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2024);
- Electrocromismo: fenómeno en el cual el material cambia de un color inicial a un color final mediante el uso de electricidad (Wang *et al.*, 2024; Shancheng Wang *et al.*, 2018; Sai Wang *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2024);
- Termocromismo: fenómeno en el cual el material cambia de un color inicial a un color final al modificar la temperatura. Existen las variables en las que el proceso es reversible, pero también en la que el fenómeno, una vez observado, es imposible regresar al estado inicial. (Elattar *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2022; Pareja-Rivera & Solis-Ibarra, 2021; Teri *et al.*, 2023).

Dispositivos fotocromáticos

Diseñar dispositivos con un material fotocromático surge como una opción muy llamativa, debido a que se puede accionar su mecanismo de respuesta sin la necesidad de invertir en un costo energético extra. Dicho proceso es desencadenado por la presencia (o ausencia) de radiación UV, presente de manera natural en la radiación solar (Kumar Babu *et al.*, 2020).

Los ejemplos más representativos de estos materiales están basados en cristales líquidos, moléculas orgánicas o compuestos híbridos orgánicos-inorgánicos. Los primeros dos tienen la ventaja de ofrecer una gran gama de colores y, además, lograr el cambio de color en tiempos inferiores a un segundo! (Han *et al.*, 2023). No obstante, presentan el inconveniente relacionado con la opacidad de una de las fases (lo que puede llegar a ser, sin embargo, una ventaja dependiendo la aplicación). Mientras que, en la mayoría de los casos, los últimos presentan un cambio de color que solo va del amarillo al café, siendo necesario, además, contar con una atmósfera de nitrógeno, ya que estos materiales suelen ser inestables en la presencia de aire (Groeneveld *et al.*, 2020).

Un ejemplo muy conocido donde se aplica un material cromogénico está representado por las gafas fotocromáticas.

Las lentes que se usan están recubiertas por materiales que experimentan ciclos de oscurecimiento/aclaramiento en función del tipo de luz a la que están expuestas (oscuras, con luz solar con una alta concentración de radiación UV; claras, con luz solar con una concentración limitada de radiación UV, como en las mañanas o tardes, así como con luz artificial). La radiación que bloquean es la conocida como UV-A (320-400 nm) y UV-B (280-320 nm), al igual que algunas cubren la luz azul en una radiación comprendida entre 400-500 nm.

Desafortunadamente esta tecnología es relativamente costosa, pues estas gafas se pueden conseguir en ópticas comunes en precios que oscilan los \$6000 MXN (ahora, es inevitable no pensar en la cantidad necesaria para fabricar el recubrimiento preciso de la superficie de una ventana convencional y, en consecuencia, el coste resultante).

Dispositivos electrocromáticos

Uno de los mecanismos en el que se basan las ventanas de este tipo consiste en el depósito de una película de cierto material mediante el uso de una corriente eléctrica (algo parecido podría ser el cromado de una superficie metálica). Este proceso es reversible, lo que lleva a obtener desde ventanas transparentes, que permiten ver a través de ellas, hasta materiales completamente opacos, Figura 4. Dentro de los materiales más comúnmente empleados están ciertos óxidos metálicos, así como polímeros.

No obstante, el uso de electricidad en este tipo de tecnología se traduce en ventajas y desventajas. Una de las ventajas más evidentes es la capacidad de modular el color de manera muy específica, pues es posible activar su mecanismo de acción en el momento y por el tiempo que se desee (lo cual se traduce en ciertos grados de opacidad). Por otro lado,

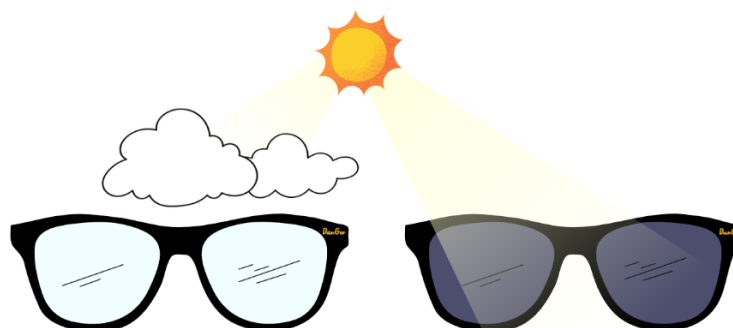


Figura 3. Aplicación de materiales fotocromáticos en gafas de sol. En ausencia de radiación o radiación limitada, las gafas son claras. Con radiación intensa, las gafas se oscurecen.

la principal desventaja es el evidente gasto energético que se necesita para activar las propiedades ópticas del material, situación que contrasta con uno de los objetivos prioritarios acerca del ahorro energético. Paralelamente, se espera que el ahorro energético y económico derivado de la disminución del uso de dispositivos como aires acondicionados, compense la inversión realizada para la adquisición de este tipo de *ventanas inteligentes y dinámicas* que ciertamente es tecnológicamente costosa.

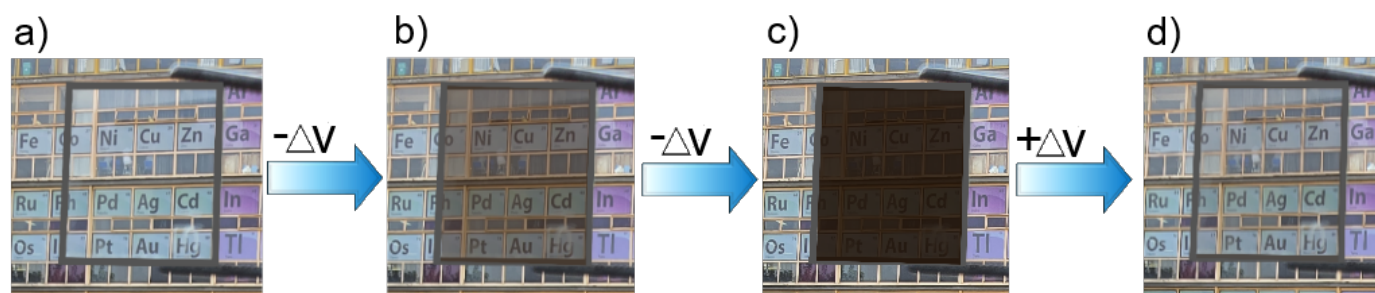


Figura 4. a) Material sin haber sido estimulado. b) Electrodeposición del material activo durante 15 segundos, lo que permite observar cierta opacidad. c) Electrodeposición del material activo durante 30 segundos, generando un material completamente opaco. La electrodeposición se realizó utilizando un voltaje de -0.6 V . d) Para aclarar la ventana se realizó el procedimiento inverso, la redisolución inducida por voltaje, utilizando un voltaje de $+0.8\text{ V}$ durante 30 segundos. La imagen mostrada no es la imagen original y se utiliza solamente con el fin de representar esquemáticamente al dispositivo inicialmente reportado por Barile (Barile et al., 2017), y el proceso que experimenta. La imagen utilizada corresponde a un edificio de la Facultad de Química de la UNAM.

Dispositivos termocrómicos

Los materiales termocrómicos son una gran promesa para fabricar *ventanas dinámicas inteligentes*, pues, en principio, pueden activarse mediante la temperatura ambiental, sin la necesidad de un suministro extra de energía. Un material termocrómico modifica su color y, por tanto, su transmitancia óptica mediante gradientes de temperatura. Uno de los materiales usados exitosamente es el dióxido de vanadio (VO_2) que presenta un cambio de color de café a azul, este cambio se puede observar a partir de una temperatura de $68\text{ }^\circ\text{C}$ (Sheng et al., 2023; Wang et al., 2024; Shancheng Wang et al., 2018). Esta temperatura, aunque pareciera alta al compararla con temperaturas promedio observada en zonas habitacionales, se puede lograr normalmente en superficies como las ventanas, aunque es necesario especificar que se alcanza especialmente en días calurosos. Otros candidatos potenciales son los materiales híbridos orgánicos-inorgánicos. Estos materiales se llaman híbridos ya que cuentan con componentes inorgánicos, como los óxidos metálicos y componentes orgánicos, análogos en naturaleza a los bien conocidos polímeros o plásticos. En estos, el cambio de color se relaciona con una modificación en su estructura microscópica como respuesta a un estímulo térmico, Figura 5.

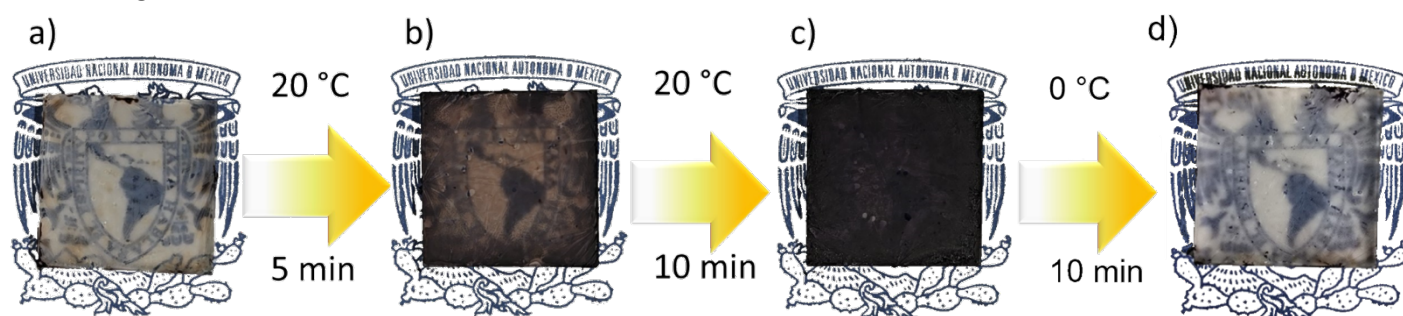


Figura 5. Ejemplo de material híbrido orgánico-inorgánico variando su temperatura. El material mostrado fue preparado en nuestro laboratorio. Actualmente estamos trabajando en optimizar las condiciones para lograr películas delgadas de alta calidad y de elevada transparencia. a) Vidrio recubierto con una película de un material híbrido preparado en nuestro laboratorio a $0\text{ }^\circ\text{C}$. b) Misma película calentada a una temperatura de $20\text{ }^\circ\text{C}$ durante 5 minutos. c) Misma película mantenida a una temperatura de $20\text{ }^\circ\text{C}$ durante 10 minutos. d) Misma película de nuevo a una temperatura de $0\text{ }^\circ\text{C}$ durante 10 minutos. Se observa que cuando el material se encuentra a $0\text{ }^\circ\text{C}$, es incoloro y permite ver a través de él; mientras que a $20\text{ }^\circ\text{C}$ el material es oscuro y prácticamente no es posible ver a través de él.

La preparación de estos materiales suele ser sencilla y a costos accesibles, lo que les confiere una ventaja difícil de superar. Además, la cantidad de combinaciones de distintos compuestos químicos posibilita la generación de una vasta biblioteca de materiales, lo que podría significar una gran cantidad de colores, así como propiedades *a la carta*. Además, dado que el mecanismo mediante el cual se modifica su transmitancia óptica es la temperatura, en días cálidos el material se oscurecerá, limitando la cantidad de radiación que la atraviesa. Mientras que, por las mañanas/tardes, días nublados, o meses de las estaciones frías, donde no es necesario que disminuyan las temperaturas interiores, las ventanas permanecerían claras, permitiendo que la radiación solar llegue al interior.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los distintos grupos cromogénicos.

Grupo cromogénico	Ventajas	Desventajas
Electrocromismo	✓ Alto contraste óptico	⊗ Falta de uniformidad
	✓ Control del cambio de color	⊗ Alto gasto energético y económico
Fotocromismo	✓ Gran variedad de color	⊗ Inestabilidad ambiental para ciertos materiales
	✓ Cambios de color rápidos	⊗ Altos costos
	✓ Filtran el UV principalmente	
Termocromismo	✓ Gran variedad de color	⊗ Temperaturas altas de transición
	✓ Estimulación ambiental	⊗ Control del cambio de color en estudio
	✓ Bajo coste	
	✓ Podrían filtrar el UV, visible e infrarrojo	
	✓ Facilidad de modificar su estructura	

Conclusiones

Las ventanas dinámicas inteligentes, aunque son dispositivos en desarrollo, las veremos indudablemente de manera cada vez más común ya sea en edificaciones, automóviles o filtros en distintas aplicaciones. Ofrecen múltiples ventajas sobre materiales utilizados regularmente, como la madera, vidrios comunes (aparejados a sus inseparables cortinas o persianas) y las modernas, pero limitadas, ventanas estáticas. El desarrollar tecnología como las ventanas dinámicas inteligentes, que funcione mediante estímulos ambientales, sin la necesidad de gastar energía proveniente de fuentes fósiles, es una manera de combatir los efectos que vivimos del cambio climático sin contribuir de ninguna manera a incrementar el calentamiento global.

Agradecimientos y financiamiento: Los autores agradecen a la UNAM por el financiamiento otorgado mediante los programas PAIP 5000- 9190 y PAPIIT IA208621 a través de los cuales es posible realizar la investigación en este campo. G. D. R. P. con número de CVU 1340918 agradece al CONAHCYT por el financiamiento para la realización de estudios de posgrado. A. J. F. M. con número de CVU 1339689 agradece al CONAHCYT por el financiamiento para la realización de estudios de posgrado. M. G. con número de CVU 1341568 agradece al CONAHCYT por el financiamiento para la realización de estudios de posgrado.

Bibliografía

- Bagan, H., & Yamagata, Y. (2015). Analysis of urban growth and estimating population density using satellite images of nighttime lights and land-use and population data. *GIScience & Remote Sensing*, 52(6), 765-780. <https://doi.org/10.1080/15481603.2015.1072400>
- Barile, C. J., Slotcavage, D. J., Hou, J., Strand, M. T., Hernandez, T. S., & McGehee, M. D. (2017). Dynamic Windows with Neutral Color, High Contrast, and Excellent Durability Using Reversible Metal Electrodeposition. *Joule*, 1(1), 133-145. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.06.001>
- Behera, A. (2022). Chromogenic Materials. In A. Behera (Ed.), *Advanced Materials: An Introduction to Modern Materials Science* (pp. 157-191). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80359-9_5
- Chen, H., Baitenov, A., Li, Y., Vasileva, E., Popov, S., Sychugov, I.,...Berglund, L. (2019). Thickness Dependence of Optical Transmittance of Transparent Wood: Chemical Modification Effects. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(38), 35451-35457. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b11816>
- CONAGUA. (2024). *Resúmenes Mensuales de Lluvia y Temperatura*. Gobierno de México.
- Elattar, A., Tsutsumi, K., Suzuki, H., Nishikawa, T., Kyaw, A. K. K., & Hayashi, Y. (2022). Mixed-halide copper-based perovskite R₂Cu(Cl/Br)₄ with different organic cations for reversible thermochromism [10.1039/D2NJ04693H]. *New Journal of Chemistry*, 46(45), 21737-21745. <https://doi.org/10.1039/D2NJ04693H>

- Groeneveld, B. G. H. M., Duim, H., Kahmann, S., De Luca, O., Tekelenburg, E. K., Kamminga, M. E.,...Loi, M. A. (2020). Photochromism in Ruddlesden–Popper copper-based perovskites: a light-induced change of coordination number at the surface [10.1039/D0TC03359F]. *Journal of Materials Chemistry C*, 8(43), 15377-15384. <https://doi.org/10.1039/D0TC03359F>
- Han, C., Lee, J., An, C., & Oh, S. (2023). A liquid crystal smart window for energy saving and harvesting. *Applied Materials Today*, 35, 101923. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apmt.2023.101923>
- Ke, Y., Zhou, C., Zhou, Y., Wang, S., Chan, S. H., & Long, Y. (2018). Emerging Thermal-Responsive Materials and Integrated Techniques Targeting the Energy-Efficient Smart Window Application. *Advanced Functional Materials*, 28(22), 1800113. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adfm.201800113>
- Korgel, B. A. (2013). Composite for smarter windows. *Nature*, 500(7462), 278-279. <https://doi.org/10.1038/500278a>
- Kumar Babu, B., Ghosh, S., & Chakraborty, S. (2020). Chapter 10 - Recent developments in smart window engineering: from antibacterial activity to self-cleaning behavior. In G. K. Dalapati & M. Sharma (Eds.), *Energy Saving Coating Materials* (pp. 227-263). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822103-7.00010-8>
- Liu, S., Li, Y., Wang, Y., Yu, K. M., Huang, B., & Tso, C. Y. (2022). Near-Infrared-Activated Thermochromic Perovskite Smart Windows. *Advanced Science*, 9(14), 2106090. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/advs.202106090>
- Madronich, S., & de Grujil, F. R. (1993). Skin cancer and UV radiation. *Nature*, 366(6450), 23-23. <https://doi.org/10.1038/366023a0>
- Pan, X.-w., Wu, G., Wang, M., & Chen, H.-z. (2009). Partially reversible photochromic behavior of organic-inorganic perovskites with copper(II) chloride. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 10(5), 710-715. <https://doi.org/10.1631/jzus.A0820736>
- Pareja-Rivera, C., & Solis-Ibarra, D. (2021). Reversible and Irreversible Thermochromism in Copper-Based Halide Perovskites. *Advanced Optical Materials*, 9(15), 2100633. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adom.202100633>
- Samborska, V. (2024). *How much have temperatures risen in countries across the world?* Our world in Data.
- Sheng, S.-Z., Wang, J.-L., Zhao, B., He, Z., Feng, X.-F., Shang, Q.-G.,...Yu, S.-H. (2023). Nanowire-based smart windows combining electro- and thermochromics for dynamic regulation of solar radiation. *Nature Communications*, 14(1), 3231. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38353-4>
- Teri, G., Jia, Q.-Q., Luo, Q.-F., Ni, H.-F., Fu, D.-W., & Guo, Q. (2023). Reversible phase transition and thermochromic response in hybrid copper-based perovskites [10.1039/D3TC01087B]. *Journal of Materials Chemistry C*, 11(26), 8903-8907. <https://doi.org/10.1039/D3TC01087B>
- Wang, D., Chen, G., & Fu, J. (2024). Multifunctional thermochromic smart windows for building energy saving [10.1039/D4TA01767F]. *Journal of Materials Chemistry A*. <https://doi.org/10.1039/D4TA01767F>
- Wang, S., Owusu, K. A., Mai, L., Ke, Y., Zhou, Y., Hu, P.,...Long, Y. (2018). Vanadium dioxide for energy conservation and energy storage applications: Synthesis and performance improvement. *Applied Energy*, 211, 200-217. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.039>
- Wang, S., Xu, Z., Wang, T., Xiao, T., Hu, X.-Y., Shen, Y.-Z., & Wang, L. (2018). Warm/cool-tone switchable thermochromic material for smart windows by orthogonally integrating properties of pillar[6]arene and ferrocene. *Nature Communications*, 9(1), 1737. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03827-3>
- Wang, S., Zhou, Y., Jiang, T., Yang, R., Tan, G., & Long, Y. (2021). Thermochromic smart windows with highly regulated radiative cooling and solar transmission. *Nano Energy*, 89, 106440. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106440>
- Zhang, S., Hao, P., Zhang, Y., Li, G., Shen, J., & Fu, Y. (2024). The simultaneous modulation effect of N-substituents on the photochromic and electrochromic properties of naphthalenediimide-based coordination polymers [10.1039/D3QI02458J]. *Inorganic Chemistry Frontiers*, 11(4), 1226-1237. <https://doi.org/10.1039/D3QI02458J>