

Potencial óptico de nanoestructuras de ZrB_2 en sistemas de concentración solar: síntesis, caracterización y desempeño térmico en receptores de torre central

Yannely Carvajal-Campos¹, Jonathan C. Luque-Ceballos², José Campos-Gaxiola¹, Francisco Baldenebro-López¹, Jesús Baldenebro-López¹ y Laura G. Ceballos-Mendivil^{1,†}

¹Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa, Los Mochis, Sinaloa, México

²Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales, Hermosillo, Sonora, México

Resumen

La energía solar de concentración (CSP) consiste en el uso de sistemas ópticos para concentrar la radiación solar y generar calor a altas temperaturas, permitiendo una conversión eficiente de electricidad mediante ciclos termodinámicos. En este contexto, el desarrollo de materiales capaces de soportar condiciones operativas extremas ha impulsado el interés en los cerámicos de ultra alta temperatura (UHTCs), caracterizados por puntos de fusión superiores a 3000 °C y alta resistencia a la oxidación. El diboruro de zirconio (ZrB_2) pertenece a esta familia de materiales y se distingue por la combinación de propiedades metálicas, como alta conductividad térmica y eléctrica, junto con características cerámicas, como elevada dureza y alto punto de fusión. Estas propiedades lo convierten en un material prometedor para aplicaciones en sistemas CSP, particularmente en receptores solares de torre central. En este trabajo se sintetizó ZrB_2 mediante el método de reducción carbotérmica a 1500 °C durante 1 h, en atmósfera de argón, utilizando ácido bórico, sorbitol y *n*-propóxido de zirconio como precursores de boro, carbono y zirconio, respectivamente. Para analizar la microestructura y la morfología del ZrB_2 sintetizado, se realizó la caracterización mediante difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (SEM), respectivamente, mientras que la evaluación de sus propiedades ópticas para aplicaciones en receptores solares se llevó a cabo mediante espectroscopía ultravioleta-visible-infrarrojo cercano (UV-Vis-NIR). Los resultados demostraron la obtención de ZrB_2 como fase cristalina única, con partículas de tamaño submicrométrico y una absorptancia solar del 92 % en el intervalo UV-Vis-NIR, mostrando una selectividad óptica prometedora y un punto de fusión superior en comparación con recubrimientos comerciales reportados para aplicaciones en receptores solares. Esta combinación de propiedades posiciona al ZrB_2 sintetizado como un material de vanguardia con potencial para incrementar significativamente la eficiencia térmica de los receptores solares de torre central que operan bajo condiciones extremas de temperatura.

Keywords: ZrB_2 , caracterización, receptor solar, absorptancia

†Autor de correspondencia: Laura G. Ceballos-Mendivil Correo electrónico: laura.ceballos@uas.edu.mx

DOI: <https://www.doi.org/10.59730/rer.v13n60a3>

Recibido: 7 de abril, 2026 Revisado: 8 de mayo, 2026 Aceptado: 13 de mayo, 2026 Publicado: 23 de julio, 2026

1. Introducción

Los sistemas CSP representan una de las tecnologías solares más avanzadas, ya que emplean receptores térmicos para captar y convertir la radiación solar concentrada en calor a alta temperatura. Este calor se utiliza posteriormente en diversas aplicaciones, como la generación de electricidad mediante turbinas de vapor o el suministro de energía térmica para procesos industriales, incluidos la desalinización y la producción de compuestos químicos Reda (2026). Sin embargo, los materiales utilizados actualmente como recubrimientos para receptores solares presentan diversas limitaciones que restringen su desempeño a altas temperaturas, tales como susceptibilidad a la oxidación, degradación térmica progresiva, pérdida de selectividad óptica debido al incremento de la emisividad y fenómenos de sinterización que afectan la estabilidad microestructural. Estas problemáticas motivan la búsqueda y el desarrollo de nuevos materiales avanzados con elevada estabilidad termoquímica y propiedades ópticas optimizadas para su aplicación en sistemas solares de concentración Ávila-Marín (2011).

En este contexto, los UHTCs, constituidos principalmente por carburos, boruros y nitruros de metales de transición, han emergido como candidatos prometedores Li et al. (2025). Entre ellos, el ZrB_2 destaca como un material perteneciente a esta familia, con un punto de fusión superior a 3000 °C, elevada conductividad térmica, alta resistencia mecánica y notable dureza a altas temperaturas, propiedades que lo hacen idóneo para aplicaciones en sistemas de protección térmica y receptores solares De Prisco et al. (2026). Adicionalmente, el ZrB_2 presenta selectividad espectral intrínseca y baja emitancia térmica, características que lo posicionan como un candidato prome-

tedor para su uso en receptores solares. Estas propiedades permiten mantener un desempeño térmico y mecánico eficiente por encima de los niveles actuales de operación, lo cual resulta fundamental para incrementar la eficiencia global de las plantas CSP Sani et al. (2016).

Materiales convencionales como el carburo de silicio (SiC) se han utilizado ampliamente en receptores solares debido a su buena conductividad térmica y estabilidad hasta temperaturas del orden de 1000 °C Casalegno et al. (2021). Sin embargo, su desempeño se encuentra limitado a temperaturas moderadas en comparación con materiales UHTC como el ZrB_2 , los cuales presentan temperaturas de fusión superiores a 3000 °C y una mayor estabilidad termoquímica Zoli et al. (2022). Adicionalmente, los recubrimientos selectivos basados en sistemas Al_2O_3 -WC muestran una alta absorptancia solar, pero sufren degradación térmica y pérdida de sus propiedades ópticas a temperaturas elevadas, por lo que su estabilidad se limita al intervalo de 350–500 °C Gao et al. (2016). A temperaturas superiores a 1100 °C, la evaporación de la capa protectora de B_2O_3 acelera la oxidación del ZrB_2 y favorece la formación de capas porosas de ZrO_2 . Asimismo, en sistemas ZrB_2 -SiC expuestos a temperaturas extremas pueden presentarse fenómenos de degradación asociados con la oxidación activa, la volatilización del SiO_2 y la formación de capas empobrecidas en SiC Inoue et al. (2018). Por lo tanto, el ZrB_2 y sus compuestos han demostrado superar la absorptancia del SiC y mantener una menor emisividad térmica, posicionándose como una alternativa prometedora para aplicaciones en receptores solares de alta temperatura.

En este trabajo se sintetizó ZrB_2 mediante el método de reducción carbotérmica a 1500 °C durante 1 h, en atmósfera de argón. El ma-

terial obtenido presentó partículas de tamaño submicrométrico y una absorptancia solar del 92 %, características que lo convierten en un candidato prometedor para aplicaciones en receptores solares de sistemas de torre central.

2. Metodología

2.1. Materiales

Los materiales utilizados para la síntesis del ZrB_2 fueron: *n*-propóxido de zirconio [$\text{Zr}(\text{OPr})_4$, pureza ≥ 70 wt. %, Aldrich[®]], ácido bórico (H_3BO_3 , pureza ≥ 99.5 %, Sigma-Aldrich[®]), ácido acético ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$, pureza ≥ 99.7 %, Sigma-Aldrich[®]) y hexano-1,2,3,4,5,6-hexol, comúnmente denominado sorbitol ($\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_6$, Fluka[®]).

2.2. Experimento

El ZrB_2 se sintetizó en dos etapas. En la primera se obtuvieron los polvos precursores a partir de los reactivos mediante un proceso sol-gel a baja temperatura (120°C). En la segunda etapa se sintetizó el ZrB_2 a partir de los polvos precursores mediante el método de reducción carbotérmica a alta temperatura (1500°C). Ambas etapas se describen a continuación.

Etapla 1: se disolvieron 2 g de ácido bórico y 3 g de sorbitol en 30 mL de ácido acético, bajo agitación a 60°C durante 1 h, hasta obtener una solución homogénea. Posteriormente, se añadió *n*-propóxido de zirconio, con relaciones molares $\text{B}/\text{Zr} = 3$ y $\text{C}/\text{Zr} = 6$, gota a gota y bajo agitación a temperatura ambiente, generándose un sol viscoso de color amarillo claro. El sol se sometió a un tratamiento térmico a 70°C durante 4 h y, posteriormente, a un proceso de secado a 120°C durante 6 h, obteniéndose un material sólido de tonalidad amarillenta. Finalmente, el producto se molió en un mortero de ágata para obtener los polvos precursores de ZrB_2 .

Etapla 2: la formación de ZrB_2 se llevó a cabo en un horno tubular de alúmina mediante la pirólisis de los polvos precursores obtenidos en la etapa anterior. El tratamiento se realizó a 1500°C durante 1 h, en atmósfera de argón, con un flujo de $50\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ y una velocidad de calentamiento de $5^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. Con el propósito de evaluar la influencia de la temperatura de síntesis, se realizaron ensayos adicionales a 1200°C bajo las mismas condiciones experimentales. Esto permitió comparar el grado de conversión de los precursores hacia la fase ZrB_2 .

2.3. Caracterización

Las fases cristalinas de los polvos sintetizados de ZrB_2 se determinaron mediante difracción de rayos X (DRX), utilizando un difractómetro Rigaku ULTIMA IV. La morfología de las partículas se examinó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), empleando un microscopio HITACHI S-5500. Finalmente, las propiedades ópticas del material se evaluaron mediante mediciones de absorptancia en un espectrofotómetro UV-Vis-NIR, en el intervalo de longitud de onda de $0.25\text{--}2.5\text{ }\mu\text{m}$, el cual abarca una parte significativa del espectro solar.

3. Resultados

La Figura 1 muestra los patrones de difracción de rayos X de los polvos precursores sometidos a tratamientos térmicos de 1200°C (Figura 1(a)) y 1500°C (Figura 1(b)). A 1200°C se identifican picos asociados con fases residuales de óxidos, principalmente óxido de zirconio (ZrO_2) en sus fases monoclinica (*m*- ZrO_2) y tetragonal (*t*- ZrO_2), lo que evidencia una reducción carbotérmica incompleta. En contraste, el tratamiento térmico a 1500°C conduce a la formación de ZrB_2 como fase predominante (PDF #34-0423), sin presencia detectable de fases secundarias, confirmando la conversión completa del sistema bajo estas condiciones.

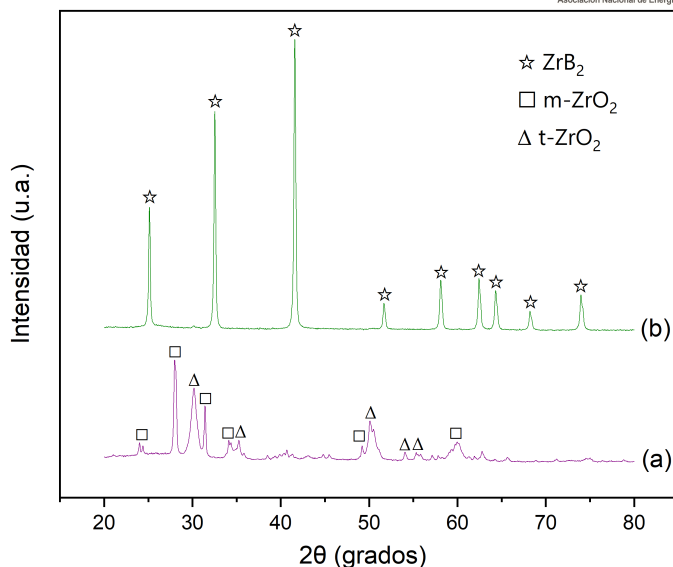


Figura 1. Patrones de difracción de los precursores sometidos a tratamiento térmico durante 1 h en atmósfera de argón: (a) 1200°C y (b) 1500°C .

La micrografía obtenida mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), mostrada en la Figura 2, revela una microestructura compuesta por partículas de morfología irregular y carácter angular, características típicas de materiales cerámicos procesados mediante reacciones en estado sólido a altas temperaturas. Asimismo, se observa una distribución heterogénea del tamaño de partícula, en el orden submicrométrico, así como una marcada rugosidad superficial. Esta textura rugosa sugiere un mecanismo de nucleación en el que las altas temperaturas promovieron el crecimiento de núcleos cristalinos sobre la superficie de los precursores. Esta morfología resulta altamente deseable, ya que la presencia de partículas submicrométricas y superficies rugosas incrementa el área superficial específica, lo que puede potenciar la reactividad del polvo y facilitar su posterior consolidación mediante procesos de sinterización.

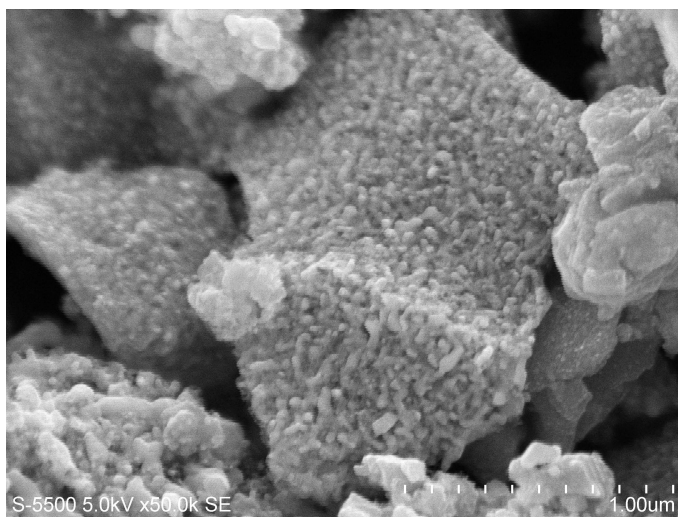


Figura 2. Micrografía SEM del ZrB_2 sintetizado a 1500°C durante 1 h en atmósfera de argón.

El espectro de reflectancia difusa, mostrado en la Figura 3, presenta un valor promedio de 8 % en el intervalo de 250 a 2500 nm, lo que equivale a una absorptancia solar aproximada de 92 %. Este valor es significativamente mayor que los reportados por Sani et al. Sani et al. (2014) tanto para el ZrB_2 comercial, cuya absorptancia es de aproximadamente 50 % y se atribuye a un menor control microestructural, como para el carburo de silicio (SiC), material de referencia en recep-

tores solares que presenta valores cercanos a 80 % bajo condiciones comparables.

La superioridad de las propiedades ópticas del ZrB_2 sintetizado se atribuye a su morfología con elevada rugosidad superficial, observada en la Figura 2, la cual favorece una absorción más eficiente de la radiación solar en comparación con las superficies de los materiales comerciales. En particular, su microestructura submicrométrica y su superficie rugosa promueven múltiples reflexiones internas, la dispersión de la luz y el incremento de la trayectoria óptica, reduciendo la reflectancia y favoreciendo la absorción en el espectro solar. El aumento de la absorción solar de los compuestos de ZrB_2 también se relaciona con la porosidad, debido a que la rugosidad microestructural puede actuar como una cavidad de absorción Zoli et al. (2022).

Además, se ha reportado que los boruros de esta familia presentan una baja emitancia térmica, de aproximadamente 0.3, en comparación con un valor cercano a 0.8 para el SiC Azzali et al. (2021). Esta característica refuerza el potencial del ZrB_2 para su aplicación en receptores solares de alta temperatura. La combinación de una elevada absorción solar y una baja emitancia térmica es fundamental para minimizar las pérdidas de calor por radiación, posicionando a este material como un candidato avanzado para incrementar la eficiencia de los sistemas CSP.

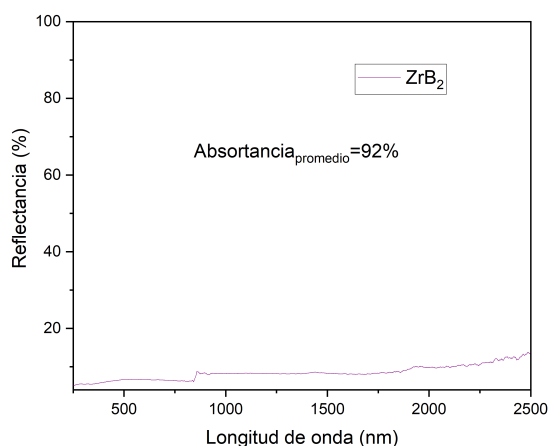


Figura 3. Espectro UV-Vis-NIR de los polvos de ZrB_2 en el intervalo de 250–2500 nm.

4. Conclusiones

La presente investigación confirma la síntesis exitosa de ZrB_2 mediante el método de reducción carbotérmica a 1500 °C, obteniéndose un material con elevada pureza de fase y propiedades ópticas favorables para su aplicación en sistemas de energía solar de concentración. Los resultados de difracción de rayos X (DRX) demuestran una conversión eficiente de los precursores, sin presencia detectable de fases residuales de óxidos, mientras que el análisis mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) revela una microestructura constituida por partículas irregulares, de tamaño submicrométrico y con una marcada rugosidad superficial, características que pueden incrementar la reactividad del material.

El resultado más sobresaliente corresponde al desempeño óptico del ZrB_2 , el cual presentó una absorción solar de 92 % en el intervalo UV-Vis-NIR. Este valor es significativamente mayor que los reportados en la literatura tanto para el ZrB_2 comercial, con una absorción aproximada de 50 %, como para el carburo de silicio (SiC), que presenta valores cercanos a 80 %. En conjunto con la baja emitancia térmica reportada en la literatura, de aproximadamente 0.3–0.4 para el ZrB_2 , el material sintetizado se posiciona como un candidato prometedor para optimizar la eficiencia térmica de los receptores solares de torre central.

5. Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento por la valiosa asistencia técnica brindada por M. L. Ramón García en los análisis de difracción de rayos X, así como por R. Morán Elvira en la caracterización mediante microscopía electrónica de barrido, ambos adscritos al IER-UNAM.

■ Referencias

- Ávila-Marín, A. L. (2011), 'Volumetric receivers in solar thermal power plants with central receiver system technology: A review', *Solar Energy* **85**(5), 891–910.
 URL: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.02.002>
- Azzali, N., Meucci, M., Di Rosa, D., Mercatelli, L., Silvestroni, L., Sciti, D. & Sani, E. (2021), 'Spectral emittance of ceramics for high temperature solar receivers', *Solar Energy* **222**, 74–83.
 URL: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.019>
- Casalegno, V., Ferrari, L., Jimenez Fuentes, M., De Zanet, A., Gianella, S., Ferraris, M. & Candelario, V. M. (2021), 'High-performance SiC-based solar receivers for CSP: Component manufacturing and joining', *Materials* **14**(16), 4687.
 URL: <https://doi.org/10.3390/ma14164687>
- De Prisco, D., Mungiguerra, S., Costanzo, R., Cecere, A., Savino, R. & Silvestroni, L. (2026), 'Aerothermodynamic response of ZrB_2 -based compositionally complex ultra-high-temperature ceramics in hypersonic and supersonic flow conditions', *Journal of the European Ceramic Society* **46**(8), 118184.
 URL: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2026.118184>
- Gao, X.-H., Wang, C.-B., Guo, Z.-M., Geng, Q.-F., Theiss, W. & Liu, G. (2016), 'Structure, optical properties and thermal stability of Al_2O_3 -WC nanocomposite ceramic spectrally selective solar absorbers', *Optical Materials* **58**, 219–225.
 URL: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2016.05.037>
- Inoue, R., Arai, Y., Kubota, Y., Kogo, Y. & Goto, K. (2018), 'Oxidation of ZrB_2 and its composites: a review', *Journal of Materials Science* **53**(21), 14885–14906.
 URL: <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2601-0>
- Li, X., Zhang, Y., Fu, Y., Zhao, J. & Meng, J. (2025), 'From molecular precursors to ultra-high temperature ceramics: A novel synthesis of hafnium carbonitride nanoceramics', *Journal of Materials Science and Technology* **223**, 11–21.
 URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2024.10.021>
- Reda, A. (2026), 'Ceramics and ceramic matrix composites as solar thermal receivers: recent advances', *Main Group Chemistry* **25**(1), 103–121.
 URL: <https://doi.org/10.1177/10241221251365379>
- Sani, E., Mercatelli, L., Meucci, M., Silvestroni, L., Balbo, A. & Sciti, D. (2016), 'Process and composition dependence of optical properties of zirconium, hafnium and tantalum borides for solar receiver applications', *Solar Energy Materials and Solar Cells* **155**, 368–377.
 URL: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.06.028>
- Sani, E., Meucci, M., Mercatelli, L., Jafrancesco, D., Sans, J.-L., Silvestroni, L. & Sciti, D. (2014), 'Optical properties of boride ultrahigh-temperature ceramics for solar thermal absorbers', *Journal of Photonics for Energy* **4**(1), 045599.
 URL: <https://doi.org/10.1117/1.JPE.4.045599>
- Zoli, L., Failla, S., Sani, E. & Sciti, D. (2022), 'Novel ceramic fibre - zirconium diboride composites for solar receivers in concentrating solar power systems', *Composites Part B: Engineering* **242**, 110081.
 URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110081>