

## síntesis y caracterización de capacitores basados en $\text{BaTiO}_3$ co-dopados con $\text{Er}^{3+}$ y $\text{Cr}^{3+}$ synthesis and characterization of $\text{BaTiO}_3$ -based capacitors co-doped with $\text{Er}^{3+}$ and $\text{Cr}^{3+}$

I. P. Zamudio-García <sup>a</sup> , E. R. Ramírez-Martínez <sup>a,\*</sup> , M. Pérez-Labra <sup>a</sup> , M. Reyes-Pérez <sup>a</sup>  & E. Gómez-Merino <sup>b</sup> 

<sup>a</sup> Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

<sup>b</sup> Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ingeniería Edificio ING1, Ciudad Universitaria, 72570, Puebla, México.

### Resumen

Se sintetizaron soluciones sólidas de  $\text{Ba}_{1-3x}\text{Cr}_{2x}\text{Ti}_{1-3x}\text{Er}_{4x}\text{O}_3$  con  $x = 0$  y 0.25 % en peso mediante molienda mecánica seguido de tratamiento térmico. Los polvos precursores se molieron durante 6 h utilizando bolas de zirconia de distintos diámetros y acetona como agente de control. Las mezclas resultantes se calcinaron y sinterizaron a 1200 °C durante 6 h (5 °C/min de calentamiento) en atmósfera de aire. La difracción de rayos X confirmó la formación de una fase principalmente tetragonal de  $\text{BaTiO}_3$ . Se fabricaron muestras tipo capacitor (10 mm) y se sinterizaron bajo las mismas condiciones. Las mediciones dieléctricas mostraron que el co-dopaje con  $\text{Er}^{3+}$  y  $\text{Cr}^{3+}$  mejoró significativamente la respuesta dieléctrica a 8 kHz y 15 kHz en comparación con el  $\text{BaTiO}_3$  puro. El análisis HRSEM-EDS evidenció microestructuras densas y homogéneas, con una distribución uniforme de dopantes, indicando una incorporación efectiva en la red perovskita. Estos resultados destacan el potencial de los cerámicos  $\text{BaTiO}_3$  co-dopados con  $\text{Er}^{3+}/\text{Cr}^{3+}$  para aplicaciones avanzadas en capacitores.

Palabras Clave:  $\text{BaTiO}_3$ , Cerámicos. Molienda mecánica, Perovskita

### Abstract

$\text{Ba}_{1-3x}\text{Cr}_{2x}\text{Ti}_{1-3x}\text{Er}_{4x}\text{O}_3$  solid solutions with  $x = 0$  and 0.25 wt.% were synthesized using the ball milling technique followed by thermal treatment. The precursor powders were milled for 6 h with zirconia balls of different sizes, employing acetone as the process control agent. The obtained mixtures were calcined and sintered at 1200 °C for 6 h (5 °C/min heating rate) in air. X-ray diffraction confirmed the formation of a mainly tetragonal  $\text{BaTiO}_3$  phase. Disc-shaped capacitor samples (10 mm) were subsequently sintered under identical conditions. Dielectric measurements revealed that  $\text{Er}^{3+}/\text{Cr}^{3+}$  co-doping notably improved the dielectric response at 8 kHz and 15 kHz relative to pure  $\text{BaTiO}_3$ . HRSEM-EDS analysis exhibited well-sintered grains with evident necking and uniform dopant distribution, confirming effective incorporation into the perovskite lattice. These findings highlight the potential of  $\text{Er}^{3+}$  and  $\text{Cr}^{3+}$  co-doped  $\text{BaTiO}_3$  ceramics as advanced materials for high-performance capacitor applications.

Keywords:  $\text{BaTiO}_3$ , Ceramics, Ball Milling, Perovskite

### 1. Introducción

Los cerámicos han evolucionado a lo largo de los siglos; aunque las primeras culturas los fabricaban y utilizaban de manera muy primitiva, en la actualidad existe la necesidad de emplear cerámicos avanzados, como el titanato de bario (BTO) (Pizaña-Porras *et al.*, 2025). El BTO es el primer material policristalino que presenta tanto ferroelectricidad como piezoelectricidad. Debido a su alta constante dieléctrica y baja pérdida dieléctrica, el BTO puede utilizarse en capacitores cerámicos multicapa (MLCC), termistores y memorias dinámicas de acceso aleatorio (DRAM) (Tewatia *et al.*, 2021). Las múltiples funcionalidades de un solo material hacen que el

BTO sea importante para una amplia gama de aplicaciones. Al ser un material tipo perovskita ( $\text{ABO}_3$ ), el catión  $\text{Ba}^{2+}$  ocupa el sitio A en las esquinas de la celda unitaria de la perovskita, y cada catión en el sitio A está coordinado 12 veces con aniones oxígeno. En el centro de la celda (en el sitio B), el  $\text{Ti}^{4+}$  está rodeado por un octaedro de oxígeno (coordinación 6) (Wei *et al.*, 2011). El método convencional de síntesis de cerámicos de  $\text{BaTiO}_3$  requiere el uso de altas temperaturas (alrededor de 1350 °C) para llevar a cabo la reacción en fase sólida entre los polvos de carbonato de bario y dióxido de titanio. El empleo de temperaturas tan elevadas da como resultado una baja pureza del producto y la formación de partículas de gran tamaño (superiores a 1  $\mu\text{m}$ ) con una distribución de tamaño de

\*Autor para la correspondencia: ra484940@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: za381946@uaeh.edu.mx (I. P. Zamudio-García), ra484940@uaeh.edu.mx (E. R. Ramírez-Martínez), miguel\_perez5851@uaeh.edu.mx (M. Pérez-Labra), mreyes@uaeh.edu.mx (M. Reyes-Pérez) & esmegomez150@gmail.com (E. Gómez-Merino).

grano no uniforme. Debido a la alta importancia tecnológica de este tipo de materiales y a la demanda de polvos cerámicos submicrónicos de alta calidad con una distribución de tamaño controlada, numerosos investigadores se han enfocado en desarrollar métodos de síntesis a baja temperatura (Ramírez-Martínez *et al.*, 2025).”

La transición de fase del BTO (fase tetragonal a temperatura ambiente) de una fase ferroeléctrica a una paraeléctrica (fase cúbica por encima de  $T_c$ ) ocurre aproximadamente a 120 °C. Se requieren distintos dopantes para mejorar sus propiedades microelectrónicas (Arshad *et al.*, 2020). El dopaje en el sitio A, en el sitio B o en ambos para ajustar las propiedades del BaTiO<sub>3</sub> ha sido ampliamente investigado (Li *et al.*, 2022). De hecho, añadir dopantes adecuados al BaTiO<sub>3</sub>, incluso en cantidades mínimas, tiene una influencia significativa en sus propiedades eléctricas. Por ejemplo, Acosta *et al.* (2017) revisaron la mejora en las propiedades piezoeléctricas del BaTiO<sub>3</sub> dopado y las propiedades dieléctricas del BaTiO<sub>3</sub> dopado con tierras raras. Este tipo de estudios es fundamental para optimizar cerámicos funcionales elaborados por rutas convencionales de bajo costo, contribuyendo al diseño de dispositivos electrónicos más estables, eficientes y con propiedades ajustables para aplicaciones avanzadas, especialmente en capacitores y componentes operados a temperaturas elevadas.

El presente trabajo se enfoca en la síntesis y caracterización estructural, microestructural y dieléctrica de cerámicos de BaTiO<sub>3</sub> co-dopados con Er<sup>3+</sup> y Cr<sup>3+</sup>, obtenidos mediante un método convencional de molienda mecánica seguido de sinterización a baja temperatura. A partir de este enfoque, se analiza el efecto del co-dopaje sobre la transición ferroeléctrica–paraelectrica, la permitividad relativa y la estabilidad térmica del material, así como su relación con la microestructura resultante. Los resultados se discuten en función de su potencial aplicación en dispositivos tipo capacitor, destacando las ventajas que ofrece esta ruta de síntesis de bajo costo para el diseño de cerámicos funcionales con propiedades dieléctricas ajustables.

## 2. Procedimiento

Las soluciones sólidas con composición Ba<sub>1-3x</sub>Cr<sub>2x</sub>Ti<sub>1-3x</sub>Er<sub>4x</sub>O<sub>3</sub>, correspondientes a  $x = 0$  y 0.25 % en peso, se sintetizaron mediante el método de estado sólido. Para ello se emplearon los siguientes reactivos de alta pureza: BaCO<sub>3</sub> (Sigma-Aldrich, 99.9 %, CAS No. 513-77-9), TiO<sub>2</sub> (Sigma-Aldrich, 99.9 %, CAS No. 13463-67-7), Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Sigma-Aldrich, 99.9 %, CAS No. 12061-16-4), y Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Sigma-Aldrich, 99.9 %, CAS No. 1308-38-9). Todos los precursores fueron previamente secados durante 24 horas a 150 °C para eliminar humedad superficial y garantizar la correcta relación estequiométrica en la mezcla.

Una vez pesados según la composición objetivo, los polvos se sometieron a un proceso de molienda mecánica durante 6 h utilizando un molino equipado con bolas de zirconia de diferentes diámetros. Durante la molienda se añadió acetona como agente de control para evitar la aglomeración y favorecer la dispersión homogénea de los precursores.

Las mezclas obtenidas se colocaron en crisoles de platino y se sinterizaron a 1200 °C durante 6 h, empleando una rampa de calentamiento de 5 °C/min en atmósfera de aire. Este tratamiento permitió promover las reacciones en estado sólido responsables de la formación de la fase BaTiO<sub>3</sub> y la incorporación simultánea de los iones Er<sup>3+</sup> y Cr<sup>3+</sup> en la red perovskita.

La confirmación estructural se llevó a cabo mediante difracción de rayos X en un difractor Equinox 2000 (Thermo Scientific) empleando radiación Cu K $\alpha$  ( $\lambda = 0.15418$  nm). Las mediciones se realizaron en el intervalo de 10°–80° (2 $\theta$ ), con un paso angular de 0.02°. Los difractogramas se procesaron para confirmar la formación de la fase tetragonal de BaTiO<sub>3</sub> y verificar la incorporación de los dopantes Er<sup>3+</sup> y Cr<sup>3+</sup>, observándose la formación de una fase predominantemente tetragonal. Con los polvos sinterizados se fabricaron pellets de 10 mm de diámetro mediante prensado uniaxial, los cuales se sinterizaron nuevamente a 1200 °C para su empleo como prototipos tipo capacitor y posterior mente se les colocó una capa de pintura plata/platino a los extremos para las mediciones dieléctricas. La Figura 1 muestra una representación esquemática del dispositivo tipo capacitor fabricado a partir de los cerámicos de BaTiO<sub>3</sub> co-dopados con Er<sup>3+</sup> y Cr<sup>3+</sup>, incluyendo la disposición del material dieléctrico.

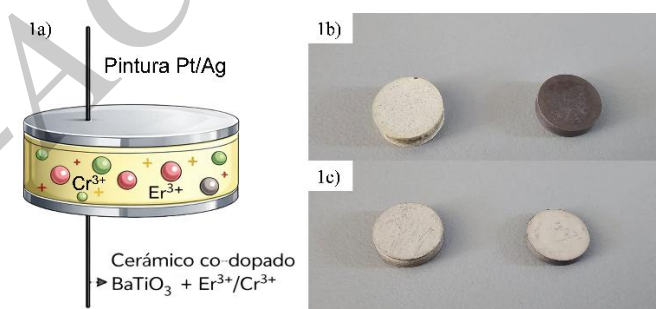


Figura 1a) Representación esquemática de los capacitores cerámicos basados en BaTiO<sub>3</sub> co-dopado con Er<sup>3+</sup> y Cr<sup>3+</sup>, 1b) pellets sin pintura Pt/Ag y 1c) con pintura Pt/Ag.

El análisis microestructural mediante microscopía electrónica de barrido de alta resolución (HRSEM) y espectroscopía EDS mostró superficies densas y uniformes, así como una distribución homogénea de los dopantes dentro de la matriz cerámica. Las propiedades dieléctricas se evaluaron mediante mediciones de capacitancia a 4 kHz y 10 kHz. Con estos valores se determinó la constante dieléctrica, observándose que el co-dopaje con Er<sup>3+</sup> y Cr<sup>3+</sup> modifica la respuesta dieléctrica del BaTiO<sub>3</sub> en función de la frecuencia y la temperatura, lo que resalta su potencial para aplicaciones en dispositivos cerámicos de almacenamiento energético.

## 3. Resultados y discusiones

### Difracción de rayos X (DR-X)

El patrón de difracción de rayos X obtenido para las soluciones sólidas Ba<sub>1-3x</sub>Cr<sub>2x</sub>Ti<sub>1-3x</sub>O<sub>3</sub> revela picos bien definidos correspondientes a la fase perovskita tetragonal del BaTiO<sub>3</sub> como se muestra en la figura 2. Las reflexiones más intensas

se localizaron en  $2\theta \approx 22^\circ, 31^\circ, 38^\circ, 45^\circ$  y  $56^\circ$ , sin indicios de fases secundarias, lo que confirma que el método de sales fundidas favoreció la reacción completa de los precursores.

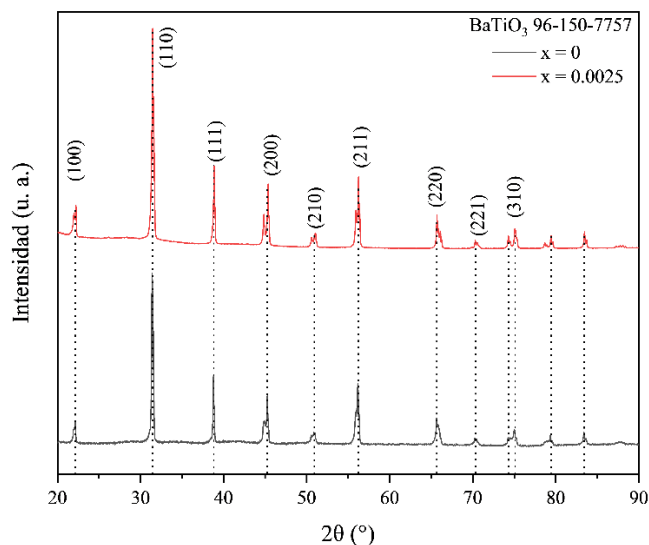


Figura 2. Patrón de difracción de Rayos X

Se observó un ligero ensanchamiento y desplazamiento de los picos hacia ángulos mayores, atribuible a la incorporación de  $\text{Cr}^{3+}$  en la red perovskita y a la consecuente distorsión estructural. Estos resultados sugieren una sustitución efectiva en las posiciones B del octaedro  $\text{TiO}_6$ , consistente con reportes previos para sistemas dopados obtenidos mediante síntesis en medio salino.

### Comportamiento dieléctrico ( $C_p$ ) en función de la temperatura

La Figura 3 muestra los valores de capacitancia obtenidos a 8 kHz. La composición de  $\text{BaTiO}_3$  dopada con  $x = 0.0025$  de  $\text{Er}^{3+}$  y  $\text{Cr}^{3+}$  alcanza la mayor respuesta dieléctrica, con un valor máximo de  $3.3032 \times 10^{-9}$  F, registrado alrededor de  $110^\circ\text{C}$ . En contraste, la muestra sin dopaje presenta un pico menor de  $8.67 \times 10^{-10}$  F, cuya temperatura máxima se sitúa en  $119^\circ\text{C}$ , en concordancia con la temperatura de Curie habitualmente reportada para  $\text{BaTiO}_3$  ( $\sim 120^\circ\text{C}$ ). A partir de estos máximos, la capacitancia decrece progresivamente con el aumento de la temperatura hasta estabilizarse por encima de los  $200^\circ\text{C}$ .

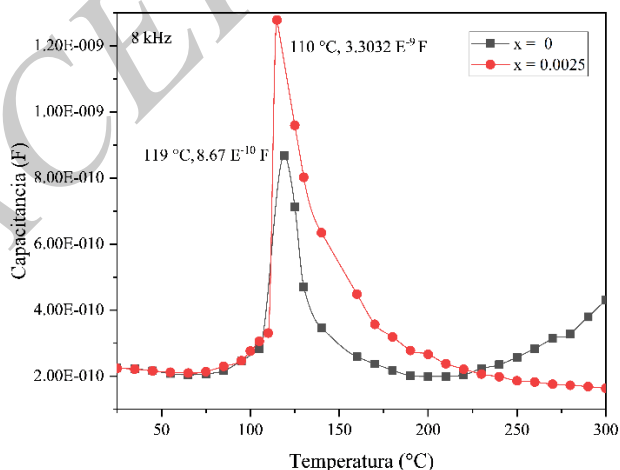


Figura 3. Capacitancia de las muestras a 8 kHz.

En la Figura 4 se observa el comportamiento de la capacitancia a 15 kHz. El compuesto con  $x = 0.0025$  de  $\text{Er}^{3+}$  y  $\text{Cr}^{3+}$  nuevamente presenta el mayor valor registrado, alcanzando  $1.24 \times 10^{-9}$  F, con un máximo cercano a  $107^\circ\text{C}$ . Por su parte, la composición no dopada exhibe un valor pico de  $8.67 \times 10^{-10}$  F alrededor de  $120^\circ\text{C}$ . Al comparar ambas frecuencias, puede notarse que el dopaje incrementa de forma consistente la capacitancia máxima, pero también provoca un desplazamiento del pico hacia temperaturas más bajas, además de ensanchar la transición. Asimismo, el aumento de la frecuencia reduce ligeramente el valor máximo de capacitancia y acentúa la caída posterior, lo que coincide con el comportamiento esperado en materiales ferroeléctricos policristalinos sometidos a campos alternos de mayor frecuencia.

El incremento en la capacitancia observado en las muestras codopadas con  $\text{Er}^{3+}$  y  $\text{Cr}^{3+}$  a 8 kHz y 15 kHz es consistente con reportes previos donde la incorporación de iones trivalentes en la red de  $\text{BaTiO}_3$  induce una modificación del orden ferroeléctrico y de las fronteras de grano. Por ejemplo, Arshad et al. (2020) y Li et al. (2022) reportaron que el dopaje con tierras raras genera una transición ferroeléctrica más difusa y un desplazamiento de la temperatura de Curie hacia valores menores, acompañado de cambios en la permitividad y la capacitancia dependientes de la frecuencia. En comparación con estos estudios, el sistema  $\text{Er}^{3+}$  y  $\text{Cr}^{3+}$  analizado en este trabajo presenta un comportamiento similar, pero con una mayor estabilidad dieléctrica a temperaturas superiores a  $200^\circ\text{C}$ , lo cual resulta ventajoso para aplicaciones en capacitores sometidos a condiciones térmicas exigentes.

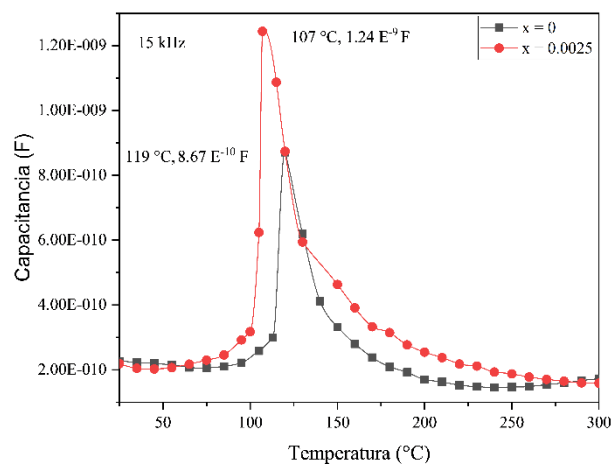


Figura 4. Capacitancia de las muestras a 15 kHz.

### Permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ) en función de la temperatura

En la Figura 5 se presentan los valores de permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ) obtenidos a 8 kHz para las composiciones  $x = 0$  y  $x = 0.0025$  dopadas con  $\text{Er}^{3+}$  y  $\text{Cr}^{3+}$ . La muestra sin dopar alcanzó un máximo de 3567, con una temperatura de Curie cercana a  $119^\circ\text{C}$ , concordante con lo reportado para  $\text{BaTiO}_3$  convencional. En el caso del material dopado, el valor máximo disminuyó a 2886, acompañado de un desplazamiento del pico hacia  $115^\circ\text{C}$ . La reducción tanto del máximo dieléctrico como

de la temperatura de transición indica que la introducción de dopantes induce una transición más difusa y altera la polarización espontánea típica del material. A temperaturas superiores a 200 °C, la permitividad tiende a disminuir y estabilizarse, comportamiento que podría resultar favorable para dispositivos que operan a temperaturas elevadas.

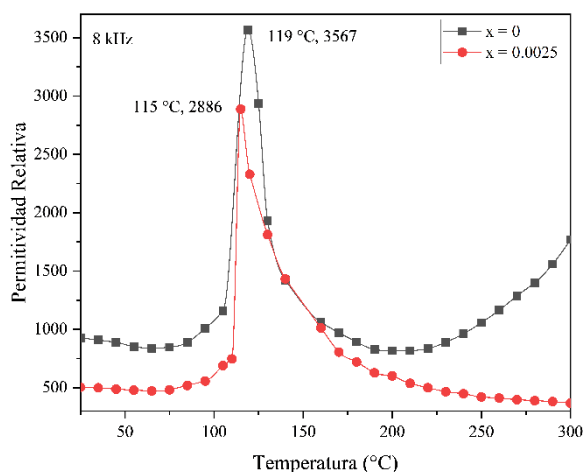


Figura 5. Permitividad Relativa obtenida a 8 kHz.

Los resultados a 15 kHz Figura 6 confirman un comportamiento similar. El BaTiO<sub>3</sub> puro mostró un máximo de 3567 alrededor de 120 °C, evidenciando una transición ferroeléctrica bien definida. Por su parte, la composición dopada ( $x = 0.0025$ ) presentó un pico reducido de 2809, desplazado a 107 °C, lo que refleja nuevamente la perturbación del orden ferroeléctrico de largo alcance causada por la incorporación de Er<sup>3+</sup> y Cr<sup>3+</sup>. Al comparar ambas frecuencias, se observa que el dopaje no solo disminuye la magnitud de la permitividad y desplaza la temperatura de Curie, sino que además hace más difusa la transición, efecto que se intensifica al aumentar la frecuencia. A pesar de esta disminución, la estabilidad de la permitividad por encima de 200 °C en la muestra dopada sugiere una mayor confiabilidad térmica.

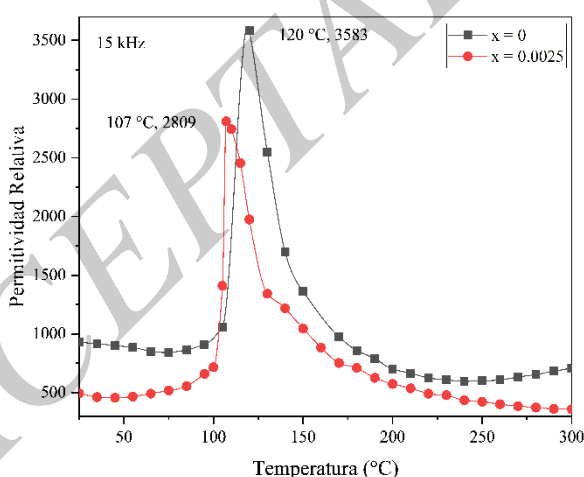


Figura 6. Permitividad Relativa obtenida a 15 kHz.

### Microscopia electrónica de barrido

Las micrografías MEB de las composiciones Ba<sub>1-3x</sub>Cr<sub>2x</sub>Ti<sub>1-3x</sub>Er<sub>4x</sub>O<sub>3</sub> ( $x = 0$  y 0.25 %) muestran cambios significativos en la microestructura inducidos por el co-dopaje

con Er<sup>3+</sup> y Cr<sup>3+</sup> después de la sinterización a 1200 °C. A 2,000 x, el BaTiO<sub>3</sub> puro presenta una microestructura más porosa, mientras que la muestra co-dopada exhibe una mayor compactación y cierre de poros, lo cual sugiere un proceso de densificación más eficiente debido a la presencia de los dopantes trivalentes.

A partir de las micrografías HRSEM a 10000x y considerando la barra de escala de 1 μm, se estimó que el tamaño promedio de grano del BaTiO<sub>3</sub> sin dopar se encuentra en el intervalo de 0.5–0.7 μm, mientras que la muestra co-dopada con Er<sup>3+</sup> y Cr<sup>3+</sup> presenta granos de mayor tamaño, del orden de 1.1–1.4 μm como se observa en la figura 7. Este incremento en el tamaño de grano, acompañado de una reducción visible de la porosidad, favorece la densificación del material y reduce la contribución resistiva de las fronteras intergranulares. Como consecuencia, se observa un incremento significativo en la capacitancia máxima medida, en concordancia con lo reportado para cerámicos ferroeléctricos densificados con granos de mayor tamaño.

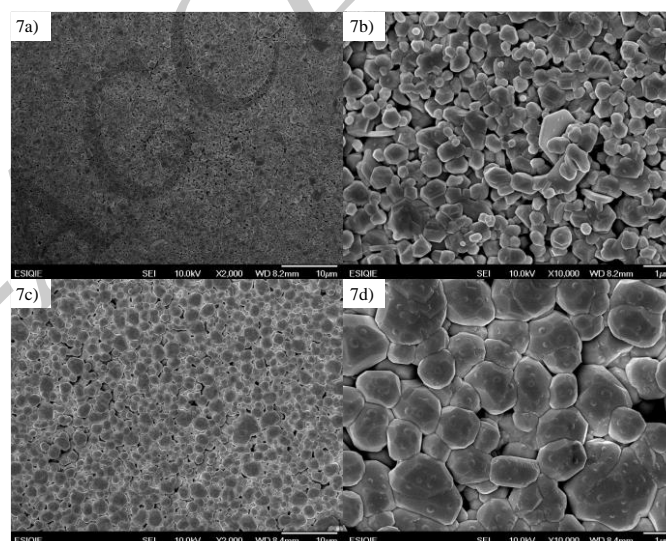


Figura 7. Micrografías obtenidas por HRSEM de BaTiO<sub>3</sub> co-dopado con Er<sup>3+</sup> y Cr<sup>3+</sup>.  $x = 0$  6a) 2000x, 6b) 10000x y  $x = 0.0025$  6c) 2000x, 6d) 10000x.

### Análisis EDS

Los espectros EDS obtenidos para las muestras con  $x = 0$  y  $x = 0.25$  confirman la composición elemental esperada de los materiales sintetizados. En la muestra sin dopar  $x = 0$  se identifican únicamente los picos característicos de Ba, Ti y O, correspondientes a la estructura base de BaTiO<sub>3</sub>, además de señales de Au provenientes del recubrimiento para el análisis. En contraste, el espectro de la muestra co-dopada  $x = 0.25$  revela, además de los elementos de la matriz, la presencia clara de los picos asociados a Cr y Er, evidenciando su incorporación efectiva en el material, ver figura 8. La definición de estos picos y su intensidad relativa indican una distribución homogénea de los dopantes dentro del cerámico.

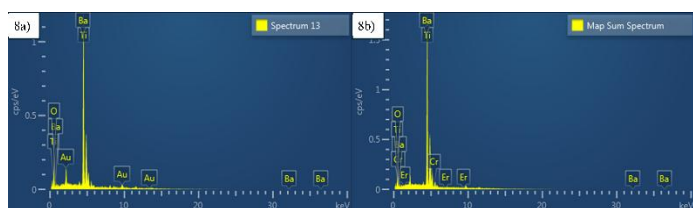


Figura 8. EDS de BaTiO<sub>3</sub> co-dopado con Er<sup>3+</sup> y Cr<sup>3+</sup>. 7a) para  $x = 0$  y 7b) para  $x = 0.0025$ .

#### 4. Conclusiones

El co-dopaje de BaTiO<sub>3</sub> con Er<sup>3+</sup> y Cr<sup>3+</sup> mostró un efecto significativo en las propiedades dieléctricas y microestructurales del material. En particular, la composición co-dopada  $x = 0.0025$  presentó un incremento en la capacitancia respecto al BaTiO<sub>3</sub> sin dopar, alcanzando valores máximos de  $\sim 3.3 \times 10^{-9}$  F a 8 kHz y  $\sim 1.2 \times 10^{-9}$  F a 15 kHz, mientras que la muestra pura registró valores del orden de  $10^{-10}$  F en el mismo intervalo de temperatura, estos datos se encuentran resumidos en la tabla 1.

Tabla 1. Comparación microestructural y dieléctrica de los cerámicos de BaTiO<sub>3</sub> sin dopar y co-dopados con Er<sup>3+</sup> y Cr<sup>3+</sup>.

Composición	Tamaño de grano ( $\mu\text{m}$ )	Capacitancia máx. (8 kHz)	$\epsilon_r$ máx. (8 kHz)	Microestructura
$x = 0$	0.5–0.7	$\sim 8.7 \times 10^{-10}$ F	$\sim 3567$	Porosa, granos irregulares
$x = 0.0025$	1.1–1.4	$\sim 3.3 \times 10^{-9}$ F	$\sim 2886$	Densa, granos poligonales

En cuanto a la permitividad relativa, el BaTiO<sub>3</sub> sin dopar exhibió un valor máximo cercano a 3567 alrededor de 120 °C, mientras que la muestra co-dopada presentó valores máximos del orden de 2800–2900, acompañados de un desplazamiento de la temperatura de Curie hacia valores menores y una transición ferroeléctrica más difusa. Esta reducción del máximo dieléctrico, junto con una mayor estabilidad térmica por encima de 200 °C, sugiere que el co-dopaje Er<sup>3+</sup>/Cr<sup>3+</sup> favorece un comportamiento más estable para aplicaciones en capacitores sometidos a condiciones térmicas exigentes.

El análisis microestructural mediante HRSEM mostró que el co-dopaje con Er<sup>3+</sup> y Cr<sup>3+</sup> induce un crecimiento de grano significativo, pasando de tamaños submicrométricos ( $\sim 0.5$ – $0.7$   $\mu\text{m}$ ) en el BaTiO<sub>3</sub> sin dopar a granos del orden de 1.1–1.4  $\mu\text{m}$  en la composición co-dopada, además de una reducción apreciable de la porosidad. Esta evolución microestructural explica directamente el incremento observado en la capacitancia y la mejora en la estabilidad dieléctrica del material, confirmando la estrecha relación entre microestructura y propiedades eléctricas.

Adicionalmente, al comparar con estudios donde el BaTiO<sub>3</sub> dopado se obtiene mediante rutas químicas más complejas, como sol–gel o métodos hidrotérmicos, los valores de respuesta dieléctrica obtenidos en este trabajo son

comparables, a pesar de emplear un método convencional de bajo costo como la molienda mecánica. Esto concuerda con lo reportado por Tewatia et al. (2021), quienes destacan que la optimización del procesamiento y la microestructura puede ser tan determinante como el método de síntesis en el desempeño dieléctrico final del material.

En conjunto, estos resultados confirman que el co-dopaje con Er<sup>3+</sup> y Cr<sup>3+</sup> permite ajustar de manera controlada la respuesta dieléctrica y la microestructura del BaTiO<sub>3</sub>, manteniendo una buena estabilidad térmica y estructural, lo que posiciona a estos cerámicos como candidatos prometedores para aplicaciones avanzadas en dispositivos tipo capacitor.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI México), AACTyM de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por el apoyo técnico, así como a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP).

#### Referencias

- Acosta, M., Novak, N., Rojas, V., Patel, S., Vaish, R., Koruza, J., ... & Rödel, J. J. A. P. (2017). BaTiO<sub>3</sub>-based piezoelectrics: Fundamentals, current status, and perspectives. *Applied Physics Reviews*, 4(4). DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4990046>
- Arshad, M., Du, H., Javed, M. S., Maqsood, A., Ashraf, I., Hussain, S., ... & Ran, H. (2020). Fabrication, structure, and frequency-dependent electrical and dielectric properties of Sr-doped BaTiO<sub>3</sub> ceramics. *Ceramics International*, 46(2), 2238–2246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.208>
- Li, Z., Yu, J., Hao, S., & Janolin, P. E. (2022). Enhancing properties of lead-free ferroelectric BaTiO<sub>3</sub> through doping. *Journal of the European Ceramic Society*, 42(12), 4693–4701. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.05.023>
- Pizaña-Porras, H., Pérez-Labra, M., Barrientos-Hernández, F. R., Palmas-León, J. A., Reyes-Pérez, M., Acosta-Sánchez, V., ... & Reyes-Cruz, V. E. (2025, February). Effect of Sintering Speed (2° C/min and 6° C/min) on Microstructural and Morphological Properties of Ni<sup>2+</sup>-Doped BaTiO<sub>3</sub>. In TMS Annual Meeting & Exhibition (pp. 129–138). Cham: Springer Nature Switzerland. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-80664-3\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-031-80664-3_11)
- Ramírez-Martínez, E. R., Pérez-Labra, M., Barrientos-Hernández, F. R., Romero-Serrano, J. A., Hernández-Ramírez, A., Reyes-Pérez, M., ... & Urbano-Reyes, G. (2025, February). Synthesis, Structural, and Dielectric Characterization of Capacitors Based on BaTiO<sub>3</sub> Co-doped Er<sup>3+</sup> and Cr<sup>3+</sup>. In TMS Annual Meeting & Exhibition (pp. 189–198). Cham: Springer Nature Switzerland. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-80664-3\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-031-80664-3_17)
- Tewatia, K., Sharma, A., Sharma, M., & Kumar, A. (2021). Factors affecting morphological and electrical properties of Barium Titanate: A brief review. *Materials Today: Proceedings*, 44, 4548–4556. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.813>
- Wei, X. K., Su, Y. T., Sui, Y., Zhang, Q. H., Yao, Y., Jin, C. Q., & Yu, R. C. (2011). Structure, electrical and magnetic property investigations on dense Fe-doped hexagonal BaTiO<sub>3</sub>. *Journal of Applied Physics*, 110(11). DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3658813>