

Evolución cristalográfica de electrocerámicos de BaTiO₃ dopadas con Y³⁺: Perspectivas a partir del refinamiento de Rietveld

Crystallographic Evolution of Y³⁺-Doped BaTiO₃ Electroceramics: Insights from Rietveld Refinement

Y. Ramírez-Agis^a, E. D. German-Magaldi^{a,*}, M. Pérez-Labra^a, A. Hernández-Ramírez^b, I. Mendoza-Sánchez^a, M. Reyes-Pérez^a

^aÁrea Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Carretera Pachuca - Tulancingo km 4.5 Mineral de la Reforma C.P. 42184, Hidalgo, México.

^bDepartamento de Metalurgia y Materiales, ESIQIE, Instituto Politécnico Nacional, Zacatenco, Código Postal 07738, Ciudad de México, México

Resumen

Se sintetizaron soluciones sólidas tipo Ba_{1-x}Y_xTi_{1-x/4}O₃ (x = 0.0, 0.005 y 0.015) mediante reacción en estado sólido y molienda mecánica para evaluar el efecto de la incorporación de Y³⁺ sobre la estructura cristalina del BaTiO₃. La caracterización estructural mediante difracción de rayos X (DRX) y análisis de Rietveld, confirmó la formación de la fase perovskita con simetría tetragonal, evidenciada por el doblete (002) / (200) cercano a 2θ ≈ 45°. El incremento de Y³⁺ produjo un corrimiento de los picos hacia menores ángulos, indicando una expansión de la red, atribuido a la sustitución parcial del ion Ti⁴⁺ (0.68 Å) por Y³⁺ (0.90 Å) en el sitio B. Se observó una reducción gradual de la tetragonalidad (c/a) de 1.00983 a 1.00801, simultáneo a un incremento en el tamaño de cristalita de 76.28 a 95.35 nm. El dopaje con Y³⁺ disminuye la distorsión tetragonal y favorece el crecimiento de cristalitas, lo que sugiere un impacto directo en las propiedades ferroeléctricas del material.

Palabras Clave:

BaTiO₃, Dopaje con Y³⁺, Electrocerámicos.

Abstract

Solid solutions of Ba_{1-x}Y_xTi_{1-x/4}O₃ (x = 0.0, 0.005 y 0.015) were synthesized via solid-state reaction through mechanical milling to evaluate the effect of progressive Y³⁺ incorporation on the BaTiO₃ crystal structure. Structural characterization was performed using X-ray Diffraction (XRD) and Rietveld analysis, confirming the formation of a tetragonal perovskite phase, evidenced by the characteristic splitting of the (002) / (200) planes around 2θ ≈ 45°. Increasing Y³⁺ content produced a systematic shift of the diffraction peaks toward lower angles, indicating lattice expansion. This expansion is attributed to the partial substitution of the Ti⁴⁺ ion (0.68 Å) by the larger Y³⁺ ion (0.90 Å) at the B-site. A gradual reduction in tetragonality (c/a) from 1.00983 to 1.00801 was observed, accompanied by an increase in crystallite size from 76.28 to 95.35 nm. Y³⁺ doping decreases the tetragonal distortion and promotes crystallite growth, suggesting a direct impact on the material's ferroelectric properties.

Keywords:

BaTiO₃, Y³⁺ doping, Electroceramics.

1. Introducción

El Titanato de Bario (BaTiO₃) es un material cerámico ferroeléctrico con estructura tipo perovskita ampliamente utilizado en la industria electrónica. Sus destacadas propiedades dieléctricas y ferroeléctricas lo convierten en un componente esencial para capacitores, sensores y actuadores (Bhalla et al., 2000; Haertling, 1999). La optimización de su desempeño funcional depende en gran medida del control preciso tanto de la microestructura como de la composición química (Kim et al., 2013).

Entre las diversas técnicas de síntesis, destaca el método de reacción en estado sólido debido a su simplicidad, bajo costo y escalabilidad. Este proceso, combinado con la molienda mecánica, favorece la homogeneidad y la alta reactividad entre los precursores (Li et al., 2005; Zhang et al., 2004), facilitando la formación de la fase cristalina deseada.

Por otro lado, la adición de dopantes es una estrategia clave para modificar y optimizar las propiedades estructurales y funcionales del BaTiO₃. En particular, el dopaje con itrio (Y³⁺) ha demostrado ser favorable, ya que a bajas concentraciones influye en la densidad, la porosidad y, especialmente, en la estabilidad de

*Autor para la correspondencia: ge266658@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: ra465361@uaeh.edu.mx (Yarely Ramírez-Agis), ge266658@uaeh.edu.mx (Edna Dalila German-Magaldi), miguel_perez5851@uaeh.edu.mx (Miguel Pérez-Labra), ahernandezr@ipn.mx (Aurelio Hernández-Ramírez), me276575@uaeh.edu.mx (Irma Mendoza-Sánchez), mreyes@uaeh.edu.mx (Martín Reyes-Pérez)

la fase tetragonal, mejorando las propiedades dieléctricas del BaTiO₃ (Zhi et al., 1999). La incorporación del ion Y³⁺ en la estructura del BaTiO₃ se logra a través de un complejo proceso de sustitución iónica y compensación de carga. El Y³⁺ puede sustituir a los iones Ti⁴⁺ (sitio B) o Ba²⁺ (sitio A), lo que requiere la generación de vacantes de oxígeno o de bario, respectivamente, para preservar la neutralidad eléctrica del sistema. Este dopaje es crucial porque induce tensiones internas en la red cristalina, alterando directamente la estructura y la transición ferroeléctrica-paraeléctrica, permitiendo así ajustar de forma controlada la conductividad, la polarización y la estabilidad térmica del material.

El dopaje con Y³⁺ optimiza la microestructura del BaTiO₃ ya que promueve la densificación a menores temperaturas de sinterización al facilitar la difusión catiónica. Este efecto resulta en microestructuras más uniformes, compactas y con menor porosidad, lo cual es esencial para mejorar las propiedades eléctricas y mecánicas. Además, el itrio inhibe el crecimiento exagerado de los granos, asegurando una morfología controlada y una mejor reproducibilidad de las propiedades finales. Estas mejoras microestructurales, combinadas con la compensación de defectos que realiza el Y³⁺, no solo optimizan las propiedades funcionales, sino que también confieren una mayor resistencia química al BaTiO₃ frente a la reducción y degradación bajo operación prolongada, extendiendo significativamente su vida útil en dispositivos críticos como los MLCCs y actuadores (Islam et al., 2022; Tihiti et al., 2023).

En este contexto, la presente investigación se centra en analizar de manera sistemática el efecto de la concentración de Y³⁺ (0, 0.5 y 1.5% en peso) sobre la estructura cristalina de las soluciones sólidas tipo Ba_{1-x}Y_xTi_{1-x/4}O₃. El objetivo principal es evaluar el impacto de la incorporación del dopante en los parámetros de red, la relación de tetragonalidad (c/a) y el tamaño de cristalita. Para ello se empleó la ruta de reacción en estado sólido asistida por molienda mecánica, y las muestras sinterizadas se caracterizaron mediante difracción de rayos X (DRX) y refinamiento de Rietveld. Este estudio busca determinar cómo la incorporación de Y³⁺ modifica la distorsión estructural del BaTiO₃, aportando información relevante para la optimización de sus propiedades ferroeléctricas y dieléctricas (Tihiti et al., 2023).

2. Desarrollo experimental

La síntesis de las soluciones sólidas Ba_{1-x}Y_xTi_{1-x/4}O₃ (x = 0.0, 0.005, 0.015) se llevó a cabo mediante la ruta de reacción en estado sólido, empleando precursores de alta pureza (≥ 99.9%) de Sigma-Aldrich: BaCO₃ (CAS 513-77-9), TiO₂ (CAS 13463-67-7) e Y₂O₃ (CAS 1314-36-9). los cuales fueron previamente secados a 120 °C durante 8 horas. Las cantidades de reactivos se calcularon estrictamente en función de la estequiometría deseada, y su mezcla se realizó mediante molienda mecánica en medio húmedo con acetona, utilizando un molino de polietileno de baja densidad LDPE y bolas de zirconia de tres diámetros (2.95 mm, 5.05 mm, and 6.48 mm), siguiendo la metodología reportada por Trumić et al. (Trumić et al., 2007). La molienda se llevó a cabo por molienda mecánica en medio húmedo, utilizando acetona como agente de control, utilizando un molino de polietileno de baja densidad (LDPE) con bolas de zirconia de tres diámetros (2.95, 5.05 y 6.48 mm), la mezcla se realizó durante 6 h a una velocidad controlada de 160 rpm para asegurar la máxima homogeneidad. Posteriormente, las suspensiones fueron decantadas y secadas nuevamente a 120 °C durante 8 h (Carter & Norton, 2013), las mezclas resultantes se caracterizaron mediante DRX utilizando un difractómetro Bruker D8 Advance, con

radiación Cu Kα₁, con condiciones de operación: 35 kV, 25 mA, λ = 1.5418 Å, las mediciones se efectuaron en un rango de 2θ entre 20° y 90°, para confirmar su fase cristalina y verificar la posible formación de fases intermedias. Las mezclas resultantes se sometieron a un tratamiento térmico en dos etapas (decarbonatación y sinterización), acorde a metodologías previas para la síntesis de BaTiO₃ dopado (Berbenni et al., 2001; Islam et al., 2022). Las muestras dopadas (x = 0.005 y 0.015) fueron sinterizadas a 1100 °C durante 5 h, mientras que la muestra pura (x = 0.0) se sinterizó a 1200 °C para garantizar la formación de la fase perovskita pura. En ambos casos, se empleó una rampa de calentamiento/enfriamiento de 4 °C/min, resultando en un ciclo térmico total de 850 minutos. Finalmente, la caracterización estructural de las muestras sinterizadas se llevó a cabo mediante DRX y se realizó un análisis detallado de sus propiedades cristalográficas (parámetros de red, tetragonalidad y tamaño de cristalita) utilizando el método de refinamiento de Rietveld utilizando el software FullProf versión 8.2.

3. Resultados y Discusión

3.1. Caracterización Estructural de las Mezclas Físicas

Se empleó la técnica de difracción de rayos X para identificar las fases cristalinas presentes en las mezclas físicas después de la molienda mecánica, antes de la aplicación del tratamiento térmico. Esta caracterización es esencial para verificar si durante la etapa de molienda se produjo alguna reacción prematura entre los precursores. La Figura 1a, 1b, y 1c muestra los patrones de difracción correspondientes a las mezclas físicas para las concentraciones de x = 0.0, 0.005, 0.015 respectivamente, los cuales revelan únicamente la presencia de los compuestos precursores: BaCO₃, TiO₂ e Y₂O₃. No se detectaron fases secundarias ni productos de reacción no deseados, lo que indica que el proceso de molienda no alteró químicamente la composición de los materiales. Estos resultados coinciden con los hallazgos de estudios previos donde la molienda mecánica, bajo condiciones controladas, no induce reacciones inmediatas entre precursores, sino que prepara las superficies para la reacción durante el posterior tratamiento térmico (Gomez-Yañez et al., 2000; Kudłacik-Kramarczyk et al., 2020). Estos resultados confirman que las condiciones de molienda empleadas fueron adecuadas para obtener mezclas físicas homogéneas sin inducir reacciones químicas prematuras. Este control previo al tratamiento térmico garantiza una evolución estructural estable y favorece la formación de la fase perovskita pura durante la posterior etapa de sinterización.

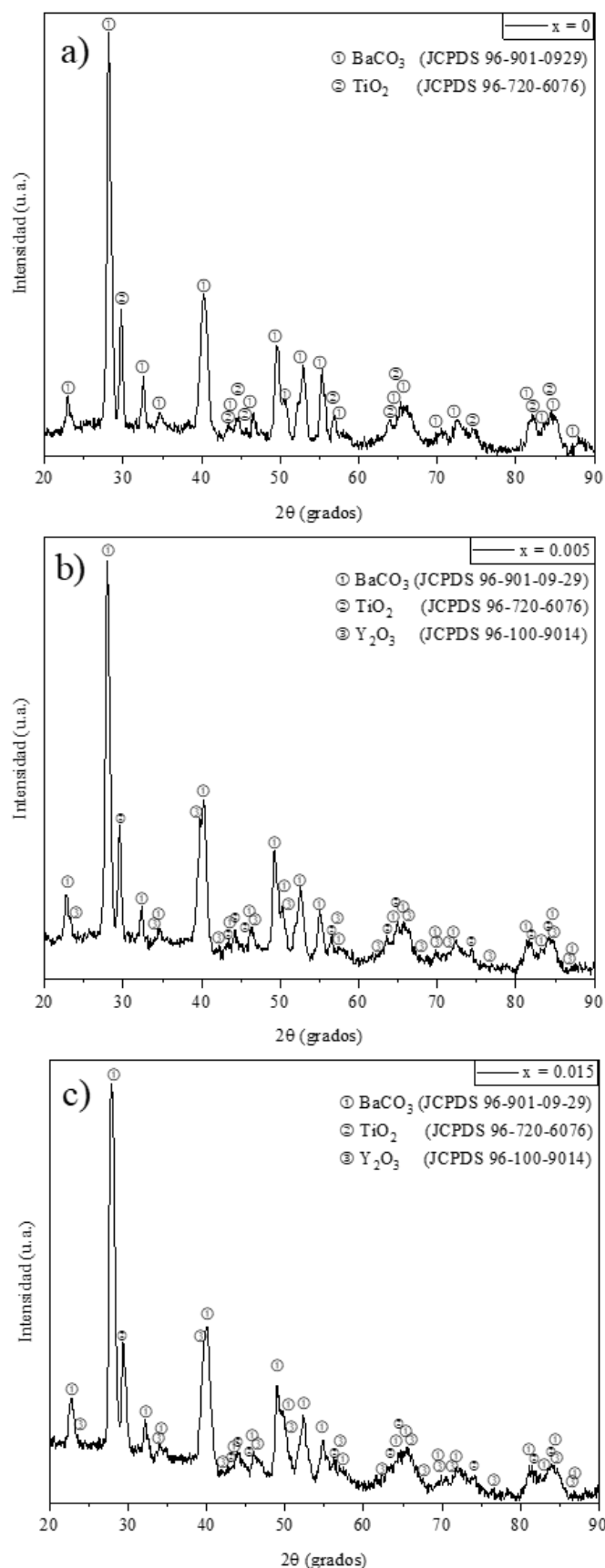


Figura 1: Patrones de difracción de rayos X de las mezclas físicas $\text{Ba}_{1-x}\text{Y}_x\text{Ti}_{1-x/4}\text{O}_3$, a) $x = 0.0$, b) $x = 0.005$ y c) $x = 0.015$.

3.2. Análisis estructural mediante DRX para polvos sinterizados

Se realizó el análisis de DRX de los polvos sinterizados tipo $\text{Ba}_{1-x}\text{Y}_x\text{Ti}_{1-x/4}\text{O}_3$ ($x = 0, 0.005$ y 0.015), previamente procesados mediante molienda mecánica. Las mediciones se efectuaron en un rango de 2θ entre 20° y 90° , con el propósito de evaluar la pureza de fase y el grado de cristalinidad de las muestras. Los difractogramas obtenidos ilustrados en la Figura 2 confirman la formación de una fase perovskita pura en las tres muestras analizadas, cuyos picos de difracción coinciden con los valores reportados para el BaTiO_3 (JCPDS 96-151-3253), mostrando concordancia en los espaciados interplanares y en el ancho de los picos.

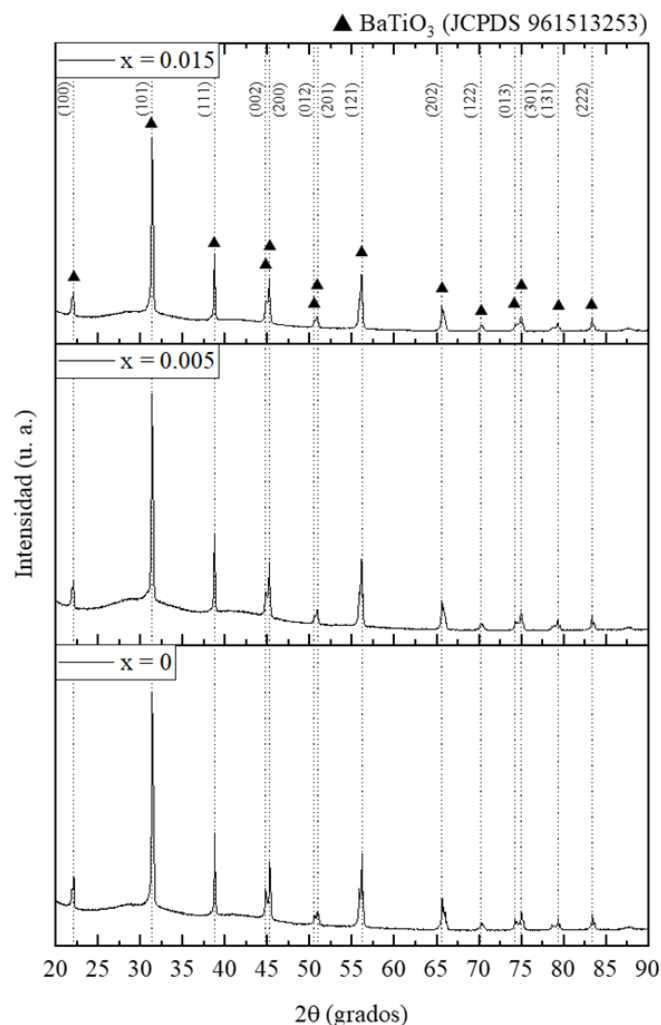


Figura 2: Patrones de difracción de rayos X de las muestras sinterizadas $\text{Ba}_{1-x}\text{Y}_x\text{Ti}_{1-x/4}\text{O}_3$.

La Figura 3 presenta ampliaciones en la región de $2\theta \approx 45^\circ$, donde se aprecia el doblete característico correspondiente a los planos cristalinos (002) y (200). Este desdoblamiento constituye un indicador distintivo de la fase tetragonal ferroeléctrica, en contraste con la estructura cúbica, que se manifiesta mediante un único pico en dicha posición (Hayashi & Ebina, 2018; T. Wang et al., 2023). La separación de estos picos es el criterio de DRX ampliamente utilizado en la literatura para confirmar la simetría tetragonal en el BaTiO_3 y sus compuestos dopados. Al incrementar la concentración de Y^{3+} en las composiciones, se observa un desplazamiento sistemático de los picos de difracción hacia menores ángulos 2θ . Este corrimiento indica un aumento en los parámetros de red y en el volumen de celda unitaria. Esto se

asocia a la expansión de la red perovskita generada por la sustitución parcial de Ti^{4+} (radio iónico 0.68 Å) por el ion Y^{3+} de mayor radio iónico (0.90 Å) en el sitio B. El desplazamiento de picos 2θ hacia menores ángulos al aumentar la concentración de Y^{3+} concuerda con lo reportado por Tihiti et al. (Tihiti et al., 2023) quienes también observaron un aumento en los parámetros de red y volumen unitario con el dopaje de Y^{3+} .

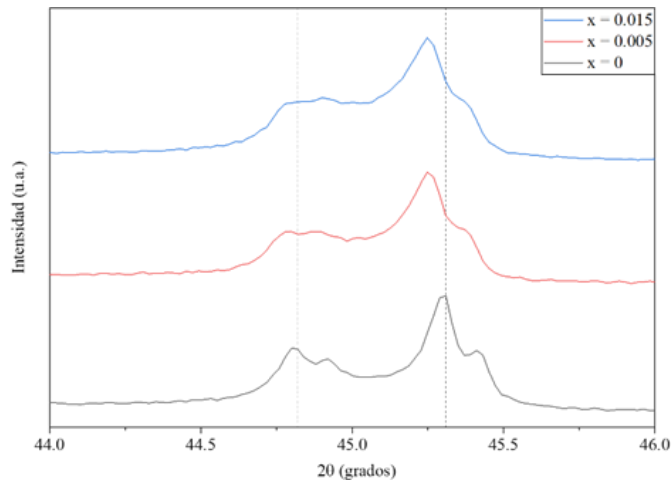


Figura 3: Ampliaciones en la región de $2\theta \approx 45^\circ$ en los difractogramas de los polvos sinterizados $\text{Ba}_{1-x}\text{Y}_x\text{Ti}_{1-x/4}\text{O}_3$.

Asimismo, se nota una disminución gradual en la intensidad y resolución del doblete a medida que aumenta la concentración de Y^{3+} , lo que sugiere una reducción progresiva del grado de distorsión tetragonal. No obstante, el doble pico persiste en todas las composiciones estudiadas, confirmando que la fase tetragonal se conserva dentro del intervalo de dopaje evaluado. Estos resultados son coherentes con lo reportado por Zhi, et al. (Zhi et al., 1999), quienes observaron la estabilidad de la estructura tetragonal para concentraciones de Y^{3+} inferiores a 0.059 en BaTiO_3 . Por tanto, la incorporación de Y^{3+} en bajas concentraciones no induce una transición completa a la fase cúbica, aunque sí reduce la distorsión tetragonal asociada (Pu et al., 2005; Qi et al., 2003; M. J. Wang et al., 2014).

3.3. Análisis de la Evolución Estructural Mediante Refinamiento Rietveld

Para obtener parámetros estructurales más precisos, se realizó un análisis detallado de la evolución estructural mediante el método de refinamiento de Rietveld, a partir de los difractogramas de DRX de las muestras sinterizadas. Este método permitió ajustar el patrón experimental a un modelo cristalográfico teórico (ilustrado en la Figura 4a, 4b y 4c), proporcionando información cuantitativa sobre los parámetros de red (a , b y c), la tetragonalidad (c/a), el tamaño de cristalita y la microdeformación, evaluando así los efectos estructurales inducidos por el dopante Y^{3+} y el procesamiento mecánico.

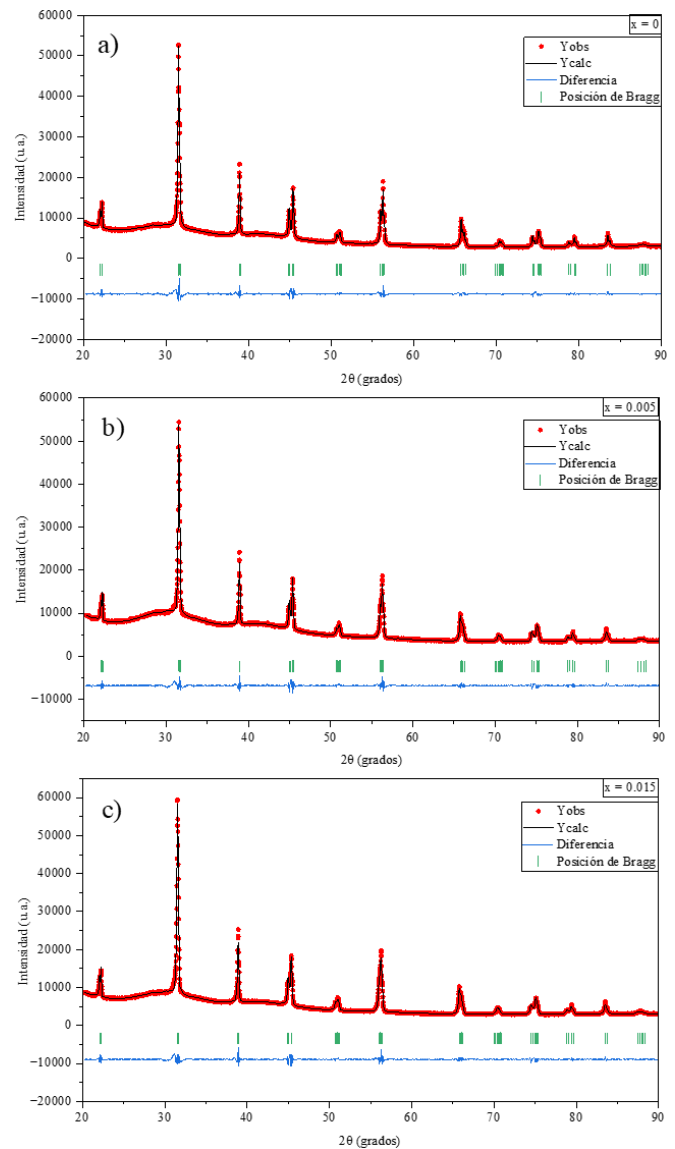


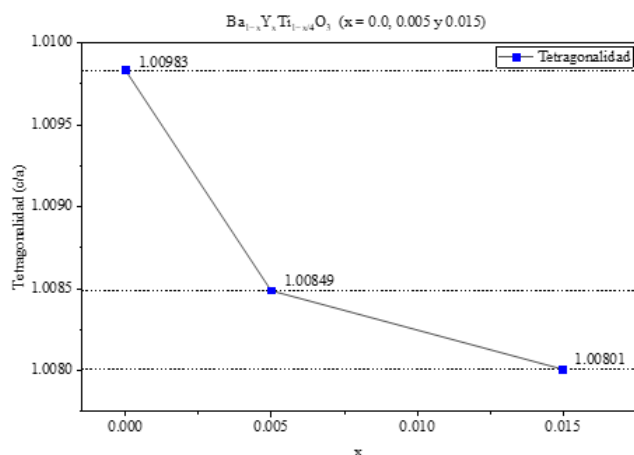
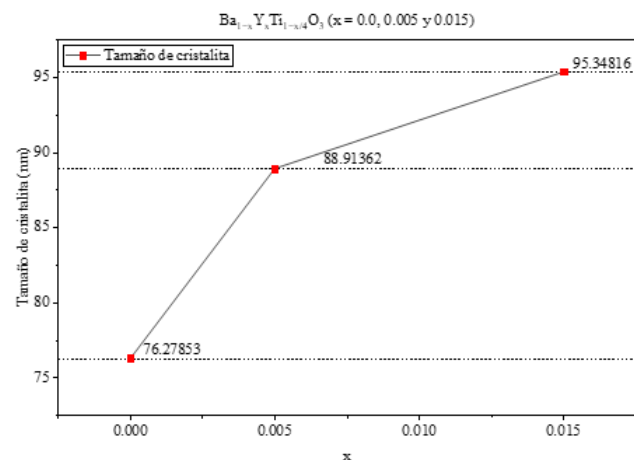
Figura 4: Patrones de refinamiento Rietveld a partir de los difractogramas de DRX de las muestras sinterizadas $\text{Ba}_{1-x}\text{Y}_x\text{Ti}_{1-x/4}\text{O}_3$, a) $x = 0.0$, b) $x = 0.005$ y c) $x = 0.015$.

La Tabla 1 resume los parámetros estructurales obtenidos del refinamiento Rietveld realizado a partir de los patrones de difracción de los polvos sinterizados de las soluciones sólidas tipo $\text{Ba}_{1-x}\text{Y}_x\text{Ti}_{1-x/4}\text{O}_3$ con $x = 0, 0.005$ y 0.015 . El análisis confirma una estructura cristalina tetragonal en todas las muestras, aunque con ligeras variaciones en la distorsión. El efecto del dopaje es evidente: a medida que x aumenta de 0.0 a 0.015, el parámetro a se incrementa (de 3.99406 a 3.99681 Å), mientras que el parámetro c disminuye ligeramente (de 4.03334 a 4.02881 Å). Esta evolución provoca una reducción gradual en la tetragonalidad (c/a), que pasa de 1.00983 a 1.00801 para la composición con mayor concentración de Y^{3+} , de la misma manera se observa un ligero aumento en el volumen de la celda, confirmando lo obtenido en los patrones de DRX.

Tabla 1: Parámetros estructurales obtenidos del refinamiento Rietveld de los sinterizados tipo $\text{Ba}_{1-x}\text{Y}_x\text{Ti}_{1-x/4}\text{O}_3$ ($x = 0, 0.005$ y 0.015).

Composición	Estructura Cristalina	$a = b$ (Å)	c (Å)	Volumen de celda unitaria (Å ³)	Tetragonalidad c/a	Densidad teórica (g/cm ³)	Tamaño de Cristalita (nm)
$x = 0.0$	Tetragonal	3.99406	4.03334	64.3419	1.00983	6.301	76.28
$x = 0.005$	Tetragonal	3.99574	4.02965	64.3471	1.00849	6.350	88.91
$x = 0.015$	Tetragonal	3.99681	4.02881	64.3582	1.00801	6.341	95.35

La Figura 5 muestra la variación de la relación c/a en función del contenido de dopante, mientras que la Figura 6 ilustra el comportamiento del tamaño de cristalita. Se observa una tendencia general de disminución de la tetragonalidad conforme aumenta la cantidad de itrio, lo que sugiere una distorsión estructural progresiva hacia una estructura pseudo-cúbica. Además, se aprecia una clara interrelación entre la distorsión estructural (c/a) y el tamaño de cristalita: la reducción de la tetragonalidad se acompaña de un incremento del tamaño de cristalita, pasando de 76.28 nm (muestra sin dopar) a 95.35 nm para $x = 0.015$. Este comportamiento indica que la incorporación de Y^{3+} no solo reduce la distorsión de la celda unitaria, sino que también favorece el crecimiento de los dominios cristalinos.

**Figura 5:** Relación de tetragonalidad (c/a) de sinterizados tipo $\text{Ba}_{1-x}\text{Y}_x\text{Ti}_{1-x/4}\text{O}_3$ ($x = 0, 0.005$ y 0.015).**Figura 6:** Tamaño de cristalita de sinterizados tipo $\text{Ba}_{1-x}\text{Y}_x\text{Ti}_{1-x/4}\text{O}_3$ ($x = 0, 0.005$ y 0.015).

Estos resultados coinciden con observaciones previas en sistemas BaTiO_3 dopados con itrio. Tihtih et al. (Tihtih et al.,

2023) reportaron incrementos en los parámetros de red a y c con el aumento del contenido de Y^{3+} , atribuidos al mayor radio iónico del catión. De manera similar, Alshoaibi et al. (Alshoaibi et al., 2020) demostraron mediante cálculos de primeros principios que el Y^{3+} puede ocupar tanto el sitio Ba como el Ti, lo que provoca una expansión de la red cristalina y modifica la distorsión tetragonal. Por otra parte, Islam et al. (Islam et al., 2022) observaron que la tetragonalidad disminuye conforme crece la concentración de Y^{3+} , mientras el tamaño cristalino aumenta, resultados coherentes con los obtenidos en el presente estudio. Finalmente, Reda et al. (Reda et al., 2022) reportaron un comportamiento análogo en materiales dopados con Zr^{4+} , donde el dopaje promueve una expansión de la celda unitaria y una mejora en la estabilidad de la fase tetragonal.

4. Conclusiones

El análisis por DRX constató la formación de una fase perovskita pura con simetría tetragonal en todo el rango de dopaje estudiado. Para lograr esta fase, se emplearon diferentes temperaturas de sinterización (1200 °C para $x = 0.0$ y 1100 °C para las muestras dopadas). Previamente, el análisis de las mezclas físicas validó la ausencia de reacciones químicas prematuras durante la molienda. La adición de Y^{3+} provocó un desplazamiento sistemático de los picos de DRX hacia ángulos 2θ menores, indicando una expansión de la red cristalina y confirmando la sustitución efectiva del ion Ti^{4+} (radio iónico 0.68 Å) por Y^{3+} (radio iónico 0.90 Å) en el sitio B de la estructura perovskita. El refinamiento estructural mediante el método de Rietveld permitió cuantificar los efectos del dopaje, mostrando una reducción progresiva de la tetragonalidad (c/a) de 1.00983 a 1.00801 con el aumento de la concentración de Y^{3+} , acompañada de un incremento en el tamaño de cristalita, de 76.28 nm en la muestra sin dopar a 95.35 nm para $x = 0.015$. Estos resultados demuestran que la incorporación de Y^{3+} en bajas concentraciones favorece la estabilidad de la fase tetragonal y promueve el crecimiento cristalino. La ligera disminución en la distorsión estructural (c/a) sugiere una red más homogénea, lo que puede contribuir a mejorar la polarización espontánea, efectos estructurales que se espera influyan directamente en la optimización de las propiedades ferroeléctricas y dieléctricas del BaTiO_3 .

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Consejo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Hidalgo (CITNOVA) por el apoyo financiero y a la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas del Instituto Politécnico Nacional (ESIQIE-IPN) y a AACTyM-UAEH por el apoyo técnico.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

5. Referencias

- Alshoaibi, A., Kanoun, M. B., Ul Haq, B., Alfaify, S., & Goumri-Said, S. (2020). Insights into the Impact of Yttrium Doping at the Ba and Ti Sites of BaTiO₃ on the Electronic Structures and Optical Properties: A First-Principles Study. *ACS Omega*, 5(25), 15502–15509. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01638>
- Berbenni, V., Marini, A., & Bruni, G. (2001). Effect of mechanical milling on solid state formation of BaTiO₃ from BaCO₃–TiO₂ (rutile) mixtures. *Thermochimica Acta*, 374(2), 151–158. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(01\)00505-6](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(01)00505-6)
- Bhalla, A. S., Guo, R., & Roy, R. (2000). The perovskite structure—a review of its role in ceramic science and technology. *Materials Research Innovations*, 4(1), 3–26. <https://doi.org/10.1007/s100190000062>
- Carter, C. B., & Norton, M. G. (2013). *Ceramic Materials*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3523-5>
- Gomez-Yañez, C., Benitez, C., & Balmori-Ramirez, H. (2000). Mechanical activation of the synthesis reaction of BaTiO₃ from a mixture of BaCO₃ and TiO₂ powders. *Ceramics International*, 26(3), 271–277. [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(99\)00053-X](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(99)00053-X)
- Haertling, G. H. (1999). Ferroelectric Ceramics: History and Technology. *Journal of the American Ceramic Society*, 82(4), 797–818. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1999.tb01840.x>
- Hayashi, H., & Ebina, T. (2018). Effect of hydrothermal temperature on the tetragonality of BaTiO₃ nanoparticles and in-situ Raman spectroscopy under tetragonal-cubic transformation. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 126(3), 214–220. <https://doi.org/10.2109/jcersj2.17125>
- Islam, S., Khatun, N., Habib, M. S., Uddin Farhad, S. F., Tanvir, N. I., Ali Shaikh, M. A., Tabassum, S., Islam, D., Hossain, M. S., & Siddika, A. (2022). Effects of yttrium doping on structural, electrical and optical properties of barium titanate ceramics. *Heliyon*, 8(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10529>
- Kim, S. W., Choi, H. I., Lee, M. H., Park, J. S., Kim, D. J., Do, D., Kim, M. H., Song, T. K., & Kim, W. J. (2013). Electrical properties and phase of BaTiO₃–SrTiO₃ solid solution. *Ceramics International*, 39(SUPPL.1). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.10.119>
- Kudłacik-Kramarczyk, S., Drabczyk, A., Głab, M., Dulian, P., Bogucki, R., Miernik, K., Sobczak-Kupiec, A., & Tyliczszak, B. (2020). Mechanochemical synthesis of BaTiO₃ powders and evaluation of their acrylic dispersions. *Materials*, 13(15). <https://doi.org/10.3390/MA13153275>
- Li, Z. C., Zhang, H., Zou, X., & Bergman, B. (2005). Synthesis of Sm-doped BaTiO₃ ceramics and characterization of a secondary phase. *Materials Science and Engineering: B*, 116(1), 34–39. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2004.09.017>
- Pu, Y., Chen, W., Chen, S., & Langhammer, H. T. (2005). Microstructure and dielectric properties of dysprosium-doped barium titanate ceramics. *Cerâmica*, 51(319), 214–218. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132005000300007>
- Qi, J., Li, L., Wang, Y., Fan, Y., & Gui, Z. (2003). Yttrium doping behavior in BaTiO₃ ceramics at different sintered temperature. *Materials Chemistry and Physics*, 82(2), 423–427. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(03\)00264-5](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(03)00264-5)
- Reda, M., El-Dek, S. I., & Arman, M. M. (2022). Improvement of ferroelectric properties via Zr doping in barium titanate nanoparticles. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(21), 16753–16776. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-08541-x>
- Tihtih, M., Ibrahim, J. E. F. M., Basyooni, M. A., En-nadir, R., Belaid, W., Hussainova, I., & Kocserha, I. (2023). Development of Yttrium-Doped BaTiO₃ for Next-Generation Multilayer Ceramic Capacitors. *ACS Omega*, 8(9), 8448–8460. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07497>
- Trumić, M., Magdalinović, N., & Trumić, G. (2007). THE MODEL FOR Optimal Charge in the Ball Mill. In *Journal of Mining and Metallurgy* (Vol. 43). <https://doi.org/10.5277/ppmp120201>
- Wang, M. J., Yang, H., Zhang, Q. L., Lin, Z. S., Zhang, Z. S., Yu, D., & Hu, L. (2014). Microstructure and dielectric properties of BaTiO₃ ceramic doped with yttrium, magnesium, gallium and silicon for AC capacitor application. *Materials Research Bulletin*, 60, 485–491. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2014.09.023>
- Wang, T., Pang, X., Liu, B., Liu, J., Shen, J., & Zhong, C. (2023). A Facile and Eco-Friendly Hydrothermal Synthesis of High Tetragonal Barium Titanate with Uniform and Controllable Particle Size. *Materials*, 16(11). <https://doi.org/10.3390/ma16114191>
- Zhang, D., Zhou, D., Jiang, S., Wang, X., & Gong, S. (2004). Effects of porosity on the electrical characteristics of current-limiting BaTiO₃-based positive-temperature-coefficient (PTC) ceramic thermistors coated with electrodeless nickel-phosphorous electrode. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 112(1), 94–100. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2003.09.039>
- Zhi, J., Chen, A., Zhi, Y., Vilarinho, P. M., & Baptista, J. L. (1999). Incorporation of Yttrium in Barium Titanate Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 82(5), 1345–1348. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1999.tb01921.x>