

# Efecto sobre la morfología en la adición de iones lantánidos de $\text{Yb}^{3+}$ , $\text{Gd}^{3+}$ y $\text{Sm}^{3+}$ en $\text{Y}_2\text{O}_3$

Naranjo Castañeda Felix Antonio<sup>1</sup>, Palacios Grijalva Laura Nadxieli<sup>1</sup>, Martínez Jiménez Anatolio<sup>2\*</sup>, Chávez Sandoval Blanca Estela<sup>3</sup>, De Ita De la Torre Antonio<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, Departamento de Ciencias Básicas, Av. Instituto Tecnológico, S/n, La Comunidad, Tlalnepantla de Baz, Estado de México, C.P. 54070. México.

<sup>2</sup>Universidad Autónoma Metropolitana, Área Física Atómica Molecular Aplicada, Av. San Pablo No. 180, Azcapotzalco, Ciudad de México, C.P. 02200. México.

<sup>3</sup>Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Ciencias Naturales e Ingeniería, Av. Vasco de Quiroga No. 4871, Santa Fe, Cuajimalpa de Morelos, Ciudad de México, C.P. 05348. México.

<sup>4</sup>Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Materiales, Av. San Pablo No. 180, Azcapotzalco, Ciudad de México, C.P. 02200. México.

\*Autor para correspondencia: amartinez@azc.uam.mx

## Recibido:

15/marzo/2020

## Aceptado:

31/octubre/2020

## Palabras clave:

Lantánidos,  
morfología,  
 $\text{Y}_2\text{O}_3$

## Keywords:

Lanthanides,  
morphology,  
 $\text{Y}_2\text{O}_3$

## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se sintetizaron materiales cerámicos nanoestructurados de  $\text{Y}_2\text{O}_3$  dopados con iones lantánidos (1%) mol de  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Gd}^{3+}$  y  $\text{Sm}^{3+}$  por el método Sol-gel Pechini. El objetivo fue describir el efecto en la adición de iones de tierras raras sobre el dióxido de itria mediante diferentes técnicas de caracterización. En todos los materiales se determinó la fase cristalina cúbica por Difracción de rayos X. Con morfología ovalada en todas las nanopartículas y tamaño promedio de (58, 67, 78 y 81) nm para  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Sm}^{3+}$  y  $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Gd}^{3+}$  respectivamente, determinado por microscopía de fuerza atómica. Finalmente, el efecto de la adición de cada catión dopante puede presentar diferentes intensidades fotoluminiscentes inducidos sobre la matriz de itria monitoreada por microscopía de fluorescencia.

## ABSTRACT

In this research, the  $\text{Y}_2\text{O}_3$  nanostructured ceramic materials doped with lanthanide ions (1%) mol of  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Gd}^{3+}$  and  $\text{Sm}^{3+}$  were synthesized using the Sol-gel Pechini method. The objective was to describe the effect on the addition of rare earth ions in yttrium dioxide by means of different characterization techniques. In all materials, the cubic crystalline phase was determined by X-ray diffraction. With oval morphology in all nanoparticles and average size of (58, 67, 78 and 81) nm for  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Sm}^{3+}$  and  $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Gd}^{3+}$  respectively, determined by atomic force microscopy. Finally, the effect of the inclusion of each doping cation can have different photoluminescent intensities induced in the yttria matrix monitored by fluorescence microscopy.

## Introducción

Los elementos químicos lantánidos de la tabla periódica, también llamados tierras raras, conformados por lantano y 14 elementos: cerio ( $Z=58$ ) al lutecio ( $Z=71$ ). Los metales de esta serie tienen los subniveles  $4f$  parcialmente llenos o con facilidad forman cationes que tienen estos subniveles incompletos. Las propiedades luminiscentes de los lantánidos son conformadas por las líneas de emisión característica. Los iones trivalentes lantánidos ( $\text{Ln}^{3+}$ ) presentan niveles energéticos donde se encuentran los electrones ubicados a las capas más cercanas al núcleo atómico. Estos niveles indican la intensidad relativa respecto a la emisión y estados de transición de los  $\text{Ln}^{3+}$ , en su mayoría tienen débil absorción de la luz, por las transiciones  $f-f$  es decir, solo una cantidad mínima de radiación es absorbida por la excitación directa de los niveles  $4f$  suficiente para producir fotoluminiscencia. El color brillante metálico de los  $\text{Ln}^{3+}$  es característico específicamente en  $\text{Yb}^{3+}$  presenta emisiones en tonos verdes, mientras que  $\text{Gd}^{3+}$  exhibe tonos azules y  $\text{Sm}^{3+}$  presenta emisiones en el rojo-naranja. En la fotoluminiscencia la irradiación sobre  $\text{Ln}^{3+}$  los lleva a un estado excitado, que al regresar al estado fundamental libera su energía a través de la emisión de fotones, o bien a través de vibraciones de la red, el primer mecanismo recibe el nombre de fluorescencia o fosforescencia, mientras que el segundo se le conoce como fónones. Estos iones se usan como aceptores de energía, porque presentan mayor fluorescencia y son utilizados por su mayor tiempo de vida (Miyota, 2014).

Los fósforos  $\text{Ln}^{3+}$  se comportan como iones fotoactivos y elementos huéspedes, son importantes debido a que favorecen procesos y mecanismos de luminiscencia típicos. Presentan excelentes propiedades de emisión nítida de alta pureza de color, en amplias bandas de emisión que van desde la región del UV al Visible e incluso en el infrarrojo cercano. Sin embargo, su comportamiento es diferente como materiales luminiscentes debido a su débil absorción de luz en las transiciones  $f-f$  por lo que es difícil general emisión eficiente por excitación directa. El dopaje de los  $\text{Ln}^{3+}$  en materiales como óxidos metálicos y oxisales es eficiente para obtener un material luminiscente (Yan, 2011).

Desafortunadamente los  $\text{Ln}^{3+}$  no puede absorber eficientemente la luz de excitación porque un semiconductor solo emite luz característica a una cierta longitud de onda, se requiere de una combinación eficiente para obtener materiales luminiscentes buenos e innovadores y los defectos superficiales y distorsiones de red se forman cuando se realiza el dopaje, lo que genera la existencia de incrustaciones en múltiples sitios del campo cristalino y división de las líneas espectrales de emisión (Bergman y McHale, 2011).

La emisión de luz en la región UV-Visible de los  $\text{Ln}^{3+}$  es realizada mediante la liberación de los electrones de valencia a la banda de conducción (Yan, 2017).

El dióxido de itrio ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) "Itria", es un material cerámico semiconductor de color blanco, de alta transparencia y conductividad térmica, resistente a la corrosión, de gran estabilidad química y térmica, y de baja inestabilidad en el vacío. Por otro lado, su costo es accesible, fácil de fabricar, con potencial en producción en masa, y es versátil en sus propiedades.  $\text{Y}_2\text{O}_3$  se forma a tratamiento térmico elevado, por las técnicas de co-precipitación, pirolisis, gas condensador, hidrotermal, micro-emulsión, precipitación y sol gel (Nunes et al., 2019). Es de alta pureza, de tamaño nanométrico, no produce aglomeración y de estructura definida. Puede presentar tres fases cristalinas como la cúbica, la hexagonal y la monoclinica. Parámetro de red  $a = 10.604 (3) \text{ \AA}$ , simetría  $m-3$ , Grupo espacial  $Ia-3$ , Energía gap 5.5 eV. Los precursores son: cloruro  $\text{Y}(\text{Cl}_3)$ , nitrato  $\text{Y}(\text{NO}_3)_3$  y carbonato  $\text{Y}_2(\text{CO}_3)_2$ . Además, su espectro óptico varía entre 280 a 1100 nm (Hajizadeh-Oghaz et al., 2016). Ópticamente emite a baja radiación en la región UV-IR cercano, de mayor durabilidad, excelente estabilidad fotoquímica y amplio intervalo de banda y su energía de fotones relativamente baja (Wang et al., 2018). El  $\text{Y}_2\text{O}_3$  es considerado como uno de los anfitriones más eficientes para hospedar  $\text{Ln}^{3+}$  ya que exhibe alta estabilidad química y térmica, muy resistente mecánicamente, es de baja energía de fotones ( $600 \text{ cm}^{-1}$ ). Además, es de alta eficiencia luminiscente, de excelente pureza, color y buena transición electrónica (Nunes et al., 2019; Rosell et al., 2017; Verma y Agrawal, 2019).

Se pueden dopar fácilmente con iones  $\text{Ln}^{3+}$  ya que son los huéspedes en la matriz hospedante de  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (Yadav y Rai 2019). Muestran gran interés en fenómenos ópticos como la transferencia de energía y emisión de energía fonónica (Yadav y Rai 2019).

Las posibles aplicaciones en dispositivos de iluminación, visualización, estado sólido y óptica. Por ejemplo, en la elaboración de sensores de temperatura, ventanas IR, tubos luminiscentes para lámparas fluorescentes y de carga de alta intensidad (Hajizadeh-Oghaz et al., 2016). En la fabricación de pantallas catodoluminiscentes, catálisis, fotocatalisis y luminóforos (Fukushima et al., 2016). También en la biofotónica, bioimagen, proteínas fluorescentes, nanodiamantes, puntos cuánticos y laser de conversión ascendente, proyección de TV y materiales nanoestructurados con morfología definida en la biotecnología (Leng et al., 2018). Recientemente los semiconductores de Itria son utilizados en la electrónica, metalurgia, medicina e ingeniería. Pueden mejorar propiedades eléctricas, magnéticas y catalíticas (Wu et al., 2018).

En general,  $Y_2O_3$  es un excelente material de fotoluminiscencia, ya que al doparse con  $Ln^{3+}$  los electrones pueden transitar fácilmente de carga en su interior sus espectros de emisión se concentran principalmente en la región infrarrojo donde pueden captar fácilmente la luz blanca (Zhou et al., 2019). El objetivo de este trabajo de investigación describe el efecto en la adición de iones de tierras raras sobre la Itría mediante diferentes técnicas de caracterización.

## Metodología

### Reactivos químicos

Cloruro de itrio hexahidratado ( $YCl_3 \cdot 6H_2O$ ), Etilenglicol EG ( $C_2H_6O_2$ ), cloruro hexahidratado de iterbio III ( $YbCl_3 \cdot 6H_2O$ ), nitrato hexahidratado de gadolinio III ( $Gd(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ ) y nitrato hexahidratado de samario III ( $Sm(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ ), adquiridos por Sigma Aldrich y Ácido cítrico monohidratado ( $C_6H_8O_7 \cdot H_2O$ ) por J.T. Baker. Todos con alto grado de pureza.

### Síntesis Sol gel

Inicialmente, se prepararon los cálculos y el pesaje de las cantidades de los reactivos. Óxidos metálicos a 1% mol de  $Y_2O_3$  puro y  $Y_2O_3:Ln^{3+}$  dopado ( $Ln^{3+} = Yb^{3+}, Gd^{3+}$  y  $Sm^{3+}$ ) cada uno fueron sintetizados por Sol gel Pechini. En un reactor vidrio se depositaron por etapas los reactivos químicos con agitación magnética a temperatura ambiente, durante el tiempo de preparación del sol formando una solución con base de  $YCl_3$ ,  $C_6H_8O_7 \cdot H_2O$  cítrico y Sal lantánido e iniciando la hidrólisis con agua destilada. El uso de  $C_2H_6O_2$  ajusta el pH de la solución. Posteriormente, se aplicó tratamiento térmico (100, 200 y 300°C) durante dos h en las etapas secado-gelificación, listas para triturar y calcinar a 1000°C durante dos h a una velocidad de calentamiento de 5°C/min hasta obtener 2.5 g de cada material.

### Caracterización

La caracterización de los materiales nanoestructurados obtenidos en polvo se realizó a ciertas condiciones de operación:

**Difracción de Rayos X (DRX)** en un difractómetro SIEMENS D-500,  $CuK\alpha$  ( $\lambda = 1.54060 \text{ \AA}$ ) a 30 Kv y 20 mA. Rango de barrido de 10-80° (2 $\theta$ ), tamaño de paso de 0.02s y a una velocidad aproximada de 3-5°/min.

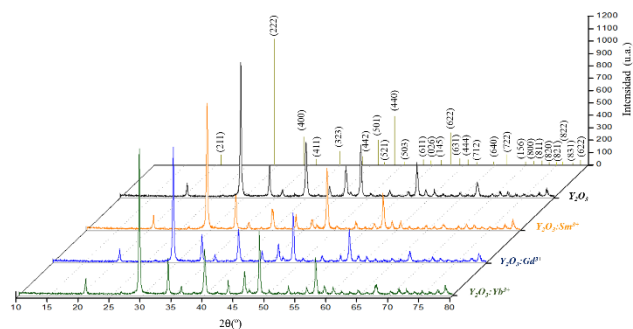
**Microscopia de Fuerza Atómica (AFM)** utilizando una sonda de barrido *Digital Instrument* de Bruker en modo *Tappin* a 5V. Con una punta de silicio con radio nominal menor a 10 nm.

**Espectroscopia de fluorescencia** utilizando un Fluorímetro Varian Cary Eclipse con un detector PMT a 766 V, a  $\lambda_{exc} = 320 \text{ nm}$ , slit de 2.5 y un rango 400-660 nm.

## Resultados y discusión

### Difracción de Rayos-X

Los patrones de difracción correspondientes a los polvos preparados (Figura 1)  $Y_2O_3$  puro exhiben en 2 $\theta$ : 20.73°, 29.37°, 33.97°, 36.13°, 39.91°, 43.65°, 46.35°, 48.73°, 50.31°, 53.45°, 56.37°, 57.79°, 59.23°, 60.57°, 62.01°, 63.37°, 64.89°, 66.05°, 67.59°, 69.91°, 71.15°, 72.49°, 73.73°, 75.01°, 76.21°, 77.51° y 78.71°; intensidades de difracción en: 115, 1090, 262, 61, 447, 90, 254, 421, 36, 59, 47, 287, 66, 69, 33, 23, 42, 28, 128, 30, 51, 48, 36, 30, 27, 43 y 77; e indexados en: (2 1 1), (2 2 2), (4 0 0), (4 1 1), (3 2 3), (4 4 2), (5 0 1), (5 2 1), (4 4 0), (5 0 3), (6 1 1), (0 2 6), (1 4 5), (6 2 2), (6 3 1), (4 4 4), (7 1 2), (6 4 0), (7 2 2), (1 5 6), (8 0 0), (8 1 1), (8 2 0), (8 2 1), (8 2 2), (8 3 1) y (6 6 2) planos respectivamente, confirmados por la carta de difracción (ICDD: 083-0927) corresponden a la fase cristalina cúbica. En cuanto a los difractogramas de los iones dopantes de  $Y_2O_3:Ln^{3+}$  mostraron mucha relación con el material nanoestructurado de  $Y_2O_3$  puro.



**Figura 1.** Patrones de difracción de rayos X de  $Y_2O_3$  puro y dopado con  $Ln^{3+}$

La adición de los iones dopantes de  $Ln^{3+}$  demuestra que la síntesis proporciona una forma ideal de controlar la estructura y estabilidad del material nanoestructurado. Con base a las condiciones experimentales, el 1% mol es la concentración óptima que existe y evita la formación de los óxidos de tierras raras en la superficie del semiconductor (Hajizadeh-Oghaz et al., 2016).

$Y_2O_3$  se mantuvo en diferentes intensidades cristalográficas, la variación fue significativa de las morfologías de la fase cristalina cúbica y la interacción entre la matriz de Itría con los iones dopantes  $Ln^{3+}$ . Sin embargo, las intensidades de difracción confirman la formación del enlace Ln-Y-O monofásico  $Y_2O_3$ . Es decir, Yb-Y-O, Gd-Y-O y Sm-Y-O en diferente material. Los iones de  $Yb^{3+}$  pueden entrar y sustituir  $Y^{3+}$  en la red de  $Y_2O_3$  ya que el radio iónico de  $Yb^{3+}$  es menor (0.858 Å) respecto a  $Y^{3+}$  (0.930 Å). Pero no sucede, para el radio iónico de  $Sm^{3+}$  y  $Gd^{3+}$  (0.964, 0.938) Å respectivamente (Hajizadeh-Oghaz et al., 2016).

A partir de la fase cubica, se determinó  $a = 10.605 \text{ \AA}$ ,  $\rho = 5.028 \text{ g/cm}^3$ , grupo espacial  $Ia-3(206)$ ,  $Z = 16$  y en la tabla 1 muestra las distancias interplanares ( $d$ ), intensidades y planos  $hkl$ .

Tabla 1. Datos cristalográficos fase cúbica.

d [Å]	Intensidad	hkl	d [Å]	Intensidad	hkl
4.3287	115	211	1.6045	68	622
3.7496	1090	222	1.5692	33	631
2.6514	262	400	1.3304	23	444
2.4998	61	411	1.3101	42	712
2.2611	447	323	1.2372	28	640
2.1649	90	442	1.2208	128	722
2.0875	254	501	1.1899	30	156
1.9432	421	521	1.1899	51	800
1.8815	36	440	1.1753	48	811
1.8255	59	503	1.1219	36	820
1.5692	47	611	1.0978	30	821
1.7265	287	026	1.0863	27	822
1.6423	66	145	1.0751	43	831
Continua...			1.0241	77	662

### Microscopía de Fuerza Atómica

Por imágenes AFM bajo el procedimiento del programa computacional *Nanoscope v5.33r*. Bajo un análisis de sección (Figura 2) se obtuvieron los valores reportados son producto de un promedio a partir de 10 mediciones de diámetro de grano aplicado a cada material.

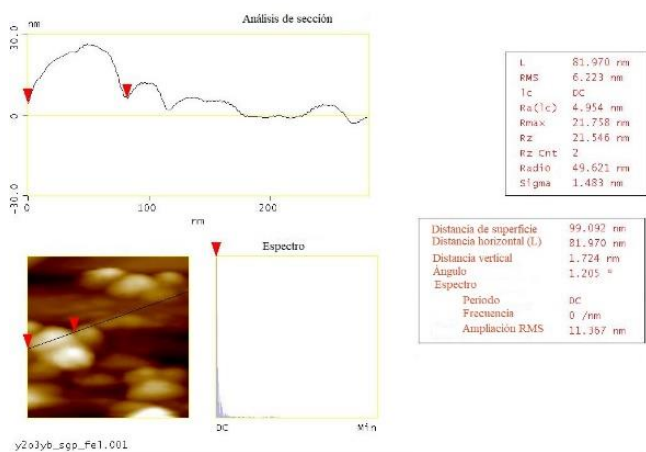


Figura 2. Análisis de sección representativo determinó el tamaño de grano de cada material nanoestructurado.

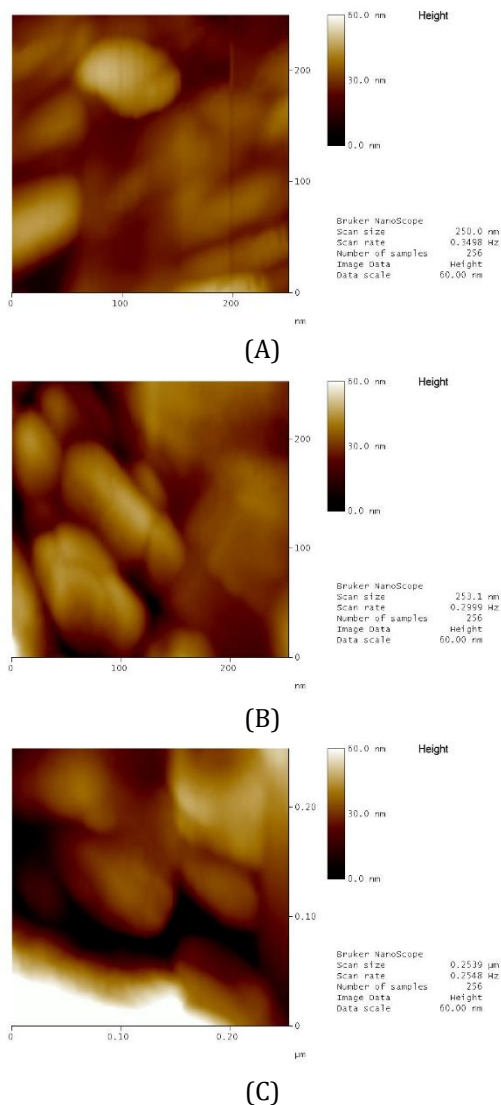
Se determinó el tamaño promedio de grano y confirmados por la ecuación de Scherrer y se muestra el valor (FWHM) es el ancho completo a la mitad máxima del pico de difracción, índice (2 2 2) para  $Y_2O_3$  (tabla 2).

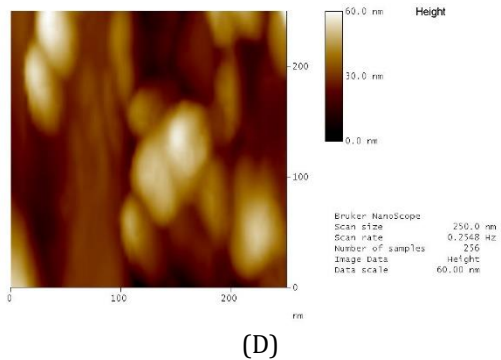
Tabla 2. Tamaño promedio de grano de  $Y_2O_3$  dopados con  $Ln^{3+}$

	AFM (nm)	Scherrer (nm)	FWHM (°)
$Y_2O_3$	59	57	0.2381
$Y_2O_3:Yb^{3+}$	67	68	0.2226
$Y_2O_3:Gd^{3+}$	81	56	0.2668
$Y_2O_3:Sm^{3+}$	78	55	0.2666

El valor FWHM es distinguido por la ampliación instrumental, la tensión del cristal y los defectos. El valor de  $k$  de la ecuación de Scherrer es una constante igual a 0.89 ajustado a los difractogramas de los materiales. (Mazierski et al., 2018).

Las imágenes en segunda dimensión incisos (A-D) ver figura 3,



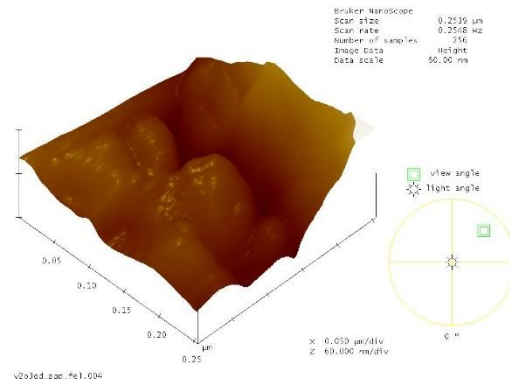


(D)

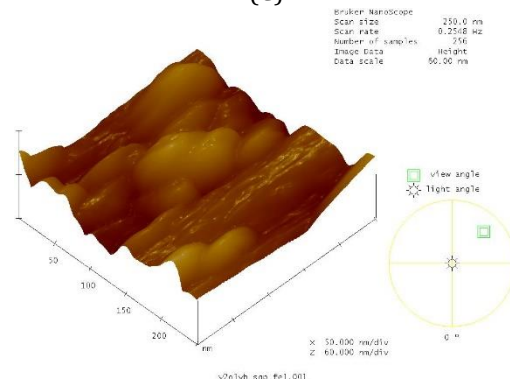
**Figura 3.** Imágenes 2D de los materiales: A)  $Y_2O_3$  puro y dopados: (B)  $Y_2O_3:Yb^{3+}$ . (C)  $Y_2O_3:Gd^{3+}$  y (D)  $Y_2O_3:Sm^{3+}$ .

Se capturaron en un área superficial de  $(0.25 \times 0.25) \mu m^2$  a escala vertical de 60 nm. Se presenta la morfología de las nanopartículas de Itría (A)  $Y_2O_3$  puro y dopados: (B)  $Y_2O_3:Yb^{3+}$ . (C)  $Y_2O_3:Gd^{3+}$  y (D)  $Y_2O_3:Sm^{3+}$ . Se observa incremento al taño de grano y una geometría ovalada con diferente distribución y aglomeración en todas las imágenes.

En la figura 4 se observa la topografía en imágenes en tercera dimensión en la superficie de los materiales nanoestructurados de A)  $Y_2O_3$  puro y dopado con tierras raras: (B)  $Y_2O_3:Yb^{3+}$ . (C)  $Y_2O_3:Gd^{3+}$  y (D)  $Y_2O_3:Sm^{3+}$ . La cual fue posible apreciar de forma evidente su aglomeración con diámetros de grano entre 50-80 nm



(C)



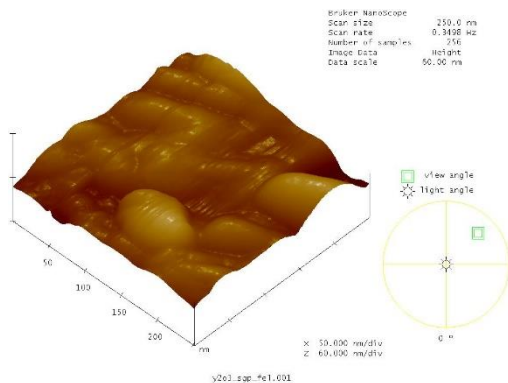
(D)

**Figura 4.** Imágenes 3D de los materiales: A)  $Y_2O_3$  puro y dopados: (B)  $Y_2O_3:Yb^{3+}$ . (C)  $Y_2O_3:Gd^{3+}$  y (D)  $Y_2O_3:Sm^{3+}$ .

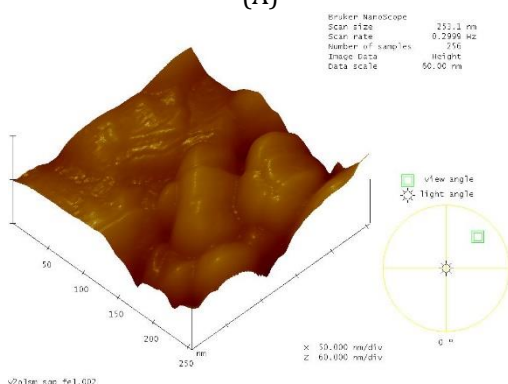
El material sin dopar mejor distribución de la superficie en relación con los granos, la topografía, la cual fue posible apreciar que el dopaje  $Y_2O_3:Gd^{3+}$ , presenta un tamaño de grano mayor. Los materiales  $Y_2O_3:Yb^{3+}$  y  $Y_2O_3:Sm^{3+}$ , muestran distribución de tamaño de grano diferente con diámetros entre 30-70 nm. En general el tamaño parece estar cambiando por la acción del radio iónico  $Ln^{3+}$  en las matrices anfitrionas (Naranjo et al., 2020).

### Fotoluminiscencia

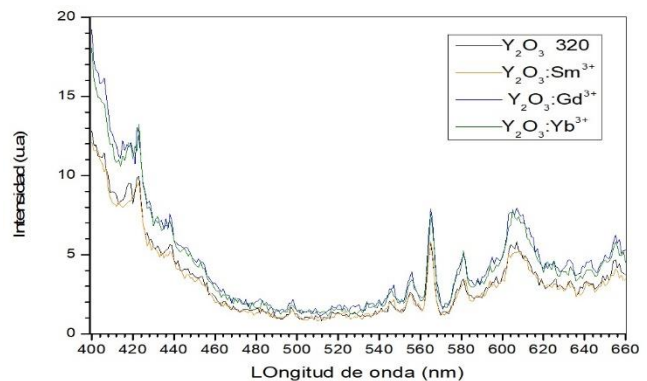
La figura 5 muestra el espectro de fluorescencia.



(A)



(B)



**Figura 5.** Espectro de fluorescencia de  $Y_2O_3$  y dopado con  $Ln^{3+}$

Se identifican intensidades del espectro en diferentes longitudes de onda, las más representativas son 423, 438, 565, 581, 605 y 655 nm. Pero se detalla dos espectros con transiciones energéticas muy similares entre sí. Tal es el caso de  $Y_2O_3:Gd^{3+}$  y  $Y_2O_3:Yb^{3+}$  con intensidades un poco más elevadas respecto a  $Y_2O_3$  y  $Y_2O_3:Sm^{3+}$ , comparado con los resultados de Wang et al. (2018). Ya que presentan similares intensidades de emisión, pero a  $\lambda_{ex} = 980$  nm aplicado a la región de luz infrarrojo.

## Conclusiones

Se sintetizaron nanopartículas de  $Y_2O_3$  puro y dopado  $Y_2O_3:Ln^{3+}$  ( $Ln^{3+} = Sm^{3+}, Gd^{3+}$  e  $Yb^{3+}$ ) por el método Sol gel Pechini. Las propiedades químicas en la superficie de materiales nanoestructurados pueden determinar las propiedades ópticas y electrónicas. Por lo tanto, los detalles de preparación, manejo y obtención de las muestras pueden tener importantes efectos en el en la morfología y emisión. Por DRX se determinó la fase cúbica de  $Y_2O_3$  y la variación con  $Ln^{3+}$ , fue ligeramente significativo en su formación. Los resultados AFM muestran la distribución de las partículas, morfología y tamaño diferente de los materiales sintetizados.

## Agradecimientos

A CONACYT, por beta otorgada 706588 a FANC en el programa de maestría de Ciencias de la Ingeniería.

A Liz Georgina Flores Díaz (caracterización DRX).

## Referencias

Bergman L., McHale J.L. (2011). Luminescent Semiconductor Materials. Photoluminescence and Carrier Transport in Nanocrystalline. CRC Press, 13(13), 365-385.

Fukushima S., Furukawa T., Niioka H., Ichimiya M., Sannomiya T., Miyake J., Hashimoto M. (2016). Synthesis of  $Y_2O_3$  nanophosphors by homogeneous precipitation method using excessive urea for cathodoluminescence and upconversion luminescence bioimaging. *Optical Materials Express*, 6(3), 831, 1-13.

Hajizadeh-Oghaz M., Razavi R.S., Barekat M., Naderi M., Malekzadeh S., Rezazadeh M. (2016). Synthesis and characterization of  $Y_2O_3$  nanoparticles by sol-gel process for transparent ceramics applications. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 78(3), 682-691.

ICDD-PDF (2019). International Centre for Diffraction Data-Powder Diffraction File, 12 Campus Blvd, Newtown Square, PA 19073, USA.

Leng J., Tang J., Xie W., Li J., Chen L. (2018). Impact of pH and urea content on size and luminescence of

upconverting  $Y_2O_3:Yb, Er$  nanophosphors. *Materials Research Bulletin*, 100, 171-177.

Mazierski P., Mikołajczyk A., Bajorowicz B., Malankowska A., Zaleska-Medynska A., Nadolna J. (2018). The role of lanthanides in  $TiO_2$ -based photocatalysis: A review. *Applied Catalysis B: Environmental*, 233, 301-317.

Miyata K. (2014). Highly Luminescent Lanthanide Complexes with Specific Coordination Structures- Springer Japan, 1-10.

Naranjo C.F.A., Palacios, G.LN., Martínez J.A. (2020). Estudio comparativo de la degradación de azul de metileno con Titania e Itría dopadas con tierras raras, *Tesis de maestría*, Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, México. 1- 99

Nunes D., Pimentel A., Matias M., Freire T., Araújo A., Silva F., Martins R. (2019). Tailoring Upconversion and Morphology of Yb/Eu Doped  $Y_2O_3$  Nanostructures by Acid Composition Mediation. *Nanomaterials*, 9(2), 234,1-17.

Rosell N.V.B., Chen, Y.T., Chang, K.S. (2017). Defective  $Y_2O_3-x$ -driven anomalous photocatalytic enhancement using  $Y_2O_3-x-TiO_2-x$  nanorod composite composition spreads. *Journal of the American Ceramic Society*, 100(12), 5548-5560.

Verma T., Agrawal S. (2019). Luminescent properties of Dy, Sm activated yttrium oxide phosphor. *Optik*, 178, 1111-1119.

Wang N., He J., Ye K., Song X., Li T. (2018). Sol-gel synthesis and enhanced 1.54  $\mu m$  emission in  $Y_2O_3:Yb^{3+}, Er^{3+}$  nanophosphors co-doped with  $Ce^{3+}$  ions. *Infrared Physics & Technology*, 93, 77-80.

Wu X., Si Y., Yu J., Ding B. (2018). Titania-based electrospun nanofibrous materials: a new model for organic pollutants degradation. *MRS Communications*, 1-17.

Yan B. (2017). Rare Earth, Rare Earth Luminescence, Luminescent Rare Earth Compounds, and Photofunctional Rare Earth Hybrid Materials. Springer Series in Materials Science, 3-21.

Yadav R.S., Rai S.B. (2019). Effect of annealing and excitation wavelength on the downconversion photoluminescence of  $Sm^{3+}$  doped  $Y_2O_3$  nano-crystalline phosphor. *Optics & Laser Technology*, 111, 169-175.

Zhou J., Yang Y., Wang L., Zhang X., Wang L. (2019). A green  $Y_2O_3:Eu^{3+}$  phosphor influenced by laser irradiation, incendiary agents, and annealing temperatures. *Optics & Laser Technology*, 113, 204-210.