

PROPIEDADES ESTRUCTURALES Y ELECTRÓNICAS DEL SUPERCONDUCTOR $[Y_{0.8}Ca_{0.2}](Ba_{0.5}Sr_{0.5})_2Cu_3O_{7.5}$

G. F. Poma M.¹, A. G. Bustamante D.², L. de los Santos V.³, Y. Majima⁴, J. Albino A.⁵
A. M. Osorio A.⁶

RESUMEN

En este trabajo se reporta las propiedades estructurales y electrónicas del compuesto $[Y_{0.8}Ca_{0.2}](Ba_{0.5}Sr_{0.5})_2Cu_3O_{7.5}$ (YCaBaSr) que es superconductor con temperatura crítica $T_C = 80$ K. El compuesto fue preparado mediante el método Sol-Gel. Las propiedades estructurales y electrónicas de este compuesto se estudiaron mediante difracción de rayos X (DRX) y espectroscopia de fotoemisión de rayos X (XPS) respectivamente. Los resultados fueron comparados con los del superconductor tradicional $YBa_2Cu_3O_{7.5}$ (YBCO). Las medidas por XPS se realizaron a temperatura ambiente (en el estado normal) y a 30 K (estado superconductor). En el estado superconductor, los espectros XPS de ambos compuestos muestran corrimiento en el pico O 1s. Mientras que, la posición de los picos principales del Cu 3p no cambian de posición al ser medidos a 30 K y 293 K. Sin embargo, se observa en el espectro la aparición de un nuevo pico que podría originarse a la hibridización entre los estados Cu3d y O2p. Dichas variaciones en los corrimientos pueden estar relacionadas con las diferencias entre las estructuras cristalinas de ambas muestras. Además en este trabajo se adiciona el mapeo de Fourier de la estructura cristalina del YCaBaSr obtenido mediante refinamiento Rietveld de los difractogramas de rayos X.

Palabras clave: Fotoemisión de superconductores, Estructura cristalina de superconductores, YBCO, YCaBaSr, Hibridización.

STRUCTURAL AND ELECTRONIC PROPERTIES OF THE SUPERCONDUCTOR $[Y_{0.8}Ca_{0.2}](Ba_{0.5}Sr_{0.5})_2Cu_3O_{7.5}$

ABSTRACT

In this work we report the structural and electronic properties of the compound $[Y_{0.8}Ca_{0.2}](Ba_{0.5}Sr_{0.5})_2Cu_3O_{7.5}$ (YCaBaSr) which is a superconductor below the critical temperature $T_C = 80$ K. This compound was prepared using the Sol-Gel method. The structural properties were studied by X-ray diffraction and electronic properties were studied by X-ray Photoemission Spectroscopy (XPS). The results were compared with those ones of the traditional superconductor $YBa_2Cu_3O_{7.5}$ (YBCO). The X-ray photoemission spectra were taken at room temperature (normal state) and at 30 K (superconductor state). In the superconductor state, the X-ray photoemission spectra showed a shift in the O 1s. While the position of the Cu3p principal peaks do not change when measuring at 30 K. However, the spectra reveal the appearance of a new peak due to de hybridization of the Cu3d and O2p states. In addition, the Fourier map of the crystal structure of YCaBaSr obtained by Rietveld refinement is provided.

Keywords: Photoemission of superconductors, Crystal structure of superconductors, YBCO, YCaBaSr, Hybridization.

- 1 gfp2208@gmail.com; Laboratorio de Cerámicos y Nanomateriales, Facultad de Ciencias Físicas, UNMSM.
- 2 angelbd1@gmail.com; Laboratorio de Cerámicos y Nanomateriales, Facultad de Ciencias Físicas, UNMSM.
- 3 luis_d_v@hotmail.com; Cavendish Laboratory, Department of Physics, University of Cambridge, J.J Thomson Av., Cambridge CB3 0HE, United Kingdom.
- 4 majima@mssl.titech.ac.jp; Materials and Structures Laboratory, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama 226-8503, Japan.
- 5 albino@df.ufpe.br; Laboratório de Supercondutividade e Materiais Avançados, Departamento de Física Universidade Federal de Pernambuco 50670-901, Recife PE, Brasil.
- 6 aosorioana@yahoo.com; Facultad de Química e Ingeniería Química, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, no existe una teoría que pueda explicar el origen de las propiedades superconductoras y el comportamiento en general de los superconductores cupratos de alta temperatura crítica. Por lo que generalmente se estudia todas las propiedades de estos materiales a fin de encontrar alguna dependencia entre las propiedades físico químicas con las variaciones que se les practican^[1-3]. En el presente trabajo nos dedicamos al estudio de las propiedades estructurales y electrónicas del superconductor $[Y_{0.8}Ca_{0.2}](Ba_{0.5}Sr_{0.5})_2Cu_3O_{7.5}$ (YCaBaSr, $T_c \approx 80$ K) y se compara con aquellas del $YBa_2Cu_3O_{7.5}$ (YBCO), el cual es uno de los superconductores más estudiados ($T_c \approx 92$ K)^[2-4]. Además es muy conocido que el contenido de átomos de oxígeno en el YBCO afecta drásticamente a sus propiedades físico químicas, por lo que este compuesto es muy útil para el estudio y comparación con la estructura cristalina y electrónica de nuestro compuesto, tal como se reporta en el presente trabajo.

La propiedad de superconductividad del YBCO y en general de todos los superconductores cupratos depende fuertemente de la presencia de los planos CuO_2 en su celda unitaria^[1] por los que es importante recordar algunas características de estos planos. Los planos CuO_2 , también llamados bloques activos o planos superconductores, se encuentran entre los bloques de reservorios de carga. Los niveles de energía formados por la interacción entre los átomos Cu y el O en dichos planos se encuentra representado en la figura 1. La hibridación ocurre entre los estados $Cu3d$ y $O2p$ y en la cual los cuatro orbitales de menor energía xy , yz , xz y $3-r$, se encuentran llenos, mientras que el orbital de mayor energía, $d_{x^2-y^2}$, está semilleno. Como resultado, el nivel de mayor energía tendrá tanto carácter Cu 3 como O^[5, 6].

El estudio experimental de las propiedades electrónicas de los superconductores se realiza por lo general mediante espectroscopia de fotoemisión de rayos X (XPS), debido a que al usarse esta técnica no destruimos los

enlaces interatómicos en la capa analizada (20 – 30 Å)^[7]

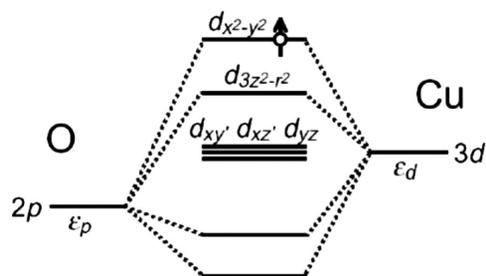


Figura N.º 1 Hibridación entre los estados $Cu3d$ y $O2p$ en el plano CuO_2

En este trabajo se estudia las propiedades estructurales y electrónicas del YCaBaSr mediante Difracción de rayos X (DRX) y Fotoemisión de Rayos X (XPS) respectivamente. También se adiciona el mapeo de Fourier (obtenido del refinamiento Rietveld) los cuales serán comparados con aquellos del YBCO.

II. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se prepararon dos muestras superconductoras, YBCO y YCaBaSr, mediante el método Sol-Gel. Inicialmente, para el caso de la preparación del YCaBaSr, se mezcló estequiométricamente acetatos de ytrio, calcio, bario, estroncio y cobre en una solución alcohólica de ácido oxálico $HCOO-COOH$. Mediante la reacción de metátesis entre la solución de acetatos y ácido oxálico en agitación magnética se logra la formación de los oxalatos de Y, Ca, Ba, Sr y Cu, y su precipitación para obtener los precursores. Seguidamente, se realizó el calcinado y sinterizado de la muestra precursora, a 860 y 880 °C respectivamente, en un horno tubular LENTON LTF & PTF modelo 16/610 en flujo de oxígeno^[8].

Los difractogramas de rayos X (DRX) fueron tomados con un equipo Rigaku HGZ de configuración compacta en geometría Bragg-Brentano. Se utilizó las radiaciones $Cu-K_{\alpha 1}$ y $Cu-K_{\alpha 2}$ con longitudes de onda de 1,5405 Å y 1,5443 Å, respectivamente, con

una relación de intensidades igual a 0,50; los datos se tomaron con un paso de 0,04°.

El refinamiento Rietveld de los DRX se realizó con la ayuda del software FullProf v. 2012. Mientras que el mapeo de Fourier se obtuvo con la herramienta GFourier del mismo programa. El background fue refinado mediante un polinomio de grado cinco. Primero se refinaron los parámetros matemáticos posteriormente se realizó lo propio con los parámetros físicos.

Los espectros XPS fueron tomados en el ramal SUPERESCA del Sincrotrón Elettra de Trieste - Italia [9]. Se aplicaron diferentes energías hasta 650 eV, las medidas se tomaron a 30 K y a temperatura ambiente (RT) en una atmosfera de ultra-alto vacío (2×10^{-9} mbar).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura N.º 2 muestra los patrones de difracción de rayos X del YBCO y del YCaBaSr. El difractograma del YBCO se identificó haciendo uso del programa Crystallographica Search-Match y se encontró coincidencia con la tabla del PDF 84-1758. Observamos que existe una buena cristalinidad y que ambas estructuras son similares.

Sin embargo existen pequeñas variaciones, en algunos picos de los difractogramas, esto se debe a los dopajes realizados al YBCO (Ca en el sitio del Y y Sr en el sitio del Ba) que afectan en los valores de los parámetros de red. Por ejemplo al inspeccionar los picos alrededor de 47° y 59°, se pueden observar dos picos en cada posición para el caso del YBCO, pero en el YCaBaSr se observa solo un pico en cada posición, el cual es el patrón característico del YBCO-tetragonal, lo que nos da un indicio del tipo de cambio, en su estructura cristalina, que sufrió nuestra muestra y que comprobaremos con el refinamiento Rietveld.

La figura N.º 3 muestra la celda unitaria del YCaBaSr utilizada como patrón de refina-

miento Rietveld y modelada mediante la herramienta FPStudio del software FullProf. Se observa que la estructura cristalina es muy similar a la del YBCO, lo cual concuerda con la información obtenida de los difractogramas de rayos X. En la figura, se puede notar que los átomos de Y y Ca están confinados por los planos CuO_2 en una celda reducida debido a su pequeño radio iónico, pero que debido a la presencia del Ca, la separación de los planos superconductores es mayor con respecto al caso de la celda del YBCO, esto es, el radio iónico del Ca (0.99 Å) es mayor al del Y (0.93 Å). Por otro lado, ocurre todo lo contrario para el caso de la inclusión de átomos Sr cuyo radio iónico (1.13 Å), es menor que el del Bario (1.35 Å). En este caso el tamaño de la perovskita conteniendo a estos átomos disminuye. Estos factores son los principales responsables del cambio de los valores de los parámetros de red, la distancia O(4) – CuO_2 e incluso del grupo espacial de la estructura cristalina de nuestro compuesto. Siendo el grupo espacial del YBCO Pmmm (estructura ortorrómbica) y el posible grupo espacial de nuestro compuesto P4/mmm (estructura tetragonal)

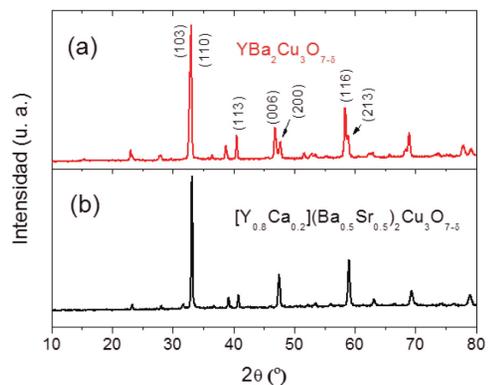


Figura N.º 2. Difractogramas de rayos X del: (a) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.5}$, (b) $[\text{Y}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}](\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5})_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.5}$.

A continuación se estudiará si los cambios estructurales originados por las inclusiones del Ca y Sr afectan en las propiedades electrónicas de la estructura. Es decir, se analiza las propiedades electrónicas del $[\text{Y}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}](\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5})_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.5}$. Los análisis mediante XPS se realizaron a RT (estado normal) y a 30 K (estado superconductor).

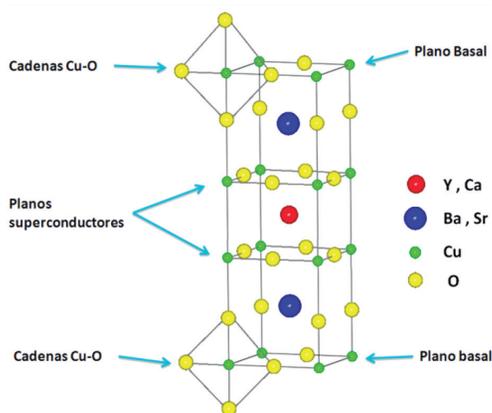


Figura N.º 3. Estructura cristalina del $[Y_{0.8}Ca_{0.2}](Ba_{0.5}Sr_{0.5})_2Cu_3O_{7.5}$ utilizada en el refinamiento Rietveld de los DRX y modelada por la herramienta FPStudio, del programa FullProf.

Como se explicó en la sección anterior los planos superconductores (CuO_2) contienen átomos O y Cu, por lo que se prestó principal interés a los picos O1s y Cu3p, y a la banda de valencia. Los espectros se calibraron usando como referencia el pico C1s, el cual estuvo presente en todos los espectros analizados. Notar que las intensidades de todos los espectros XPS presentados en este trabajo están normalizadas.

En la figura N.º 4 se observan los espectros XPS del pico O1s de ambas muestras tanto a temperatura ambiente (estado normal) como a 30 K (estado superconductor). El pico principal se ubica alrededor de 531 eV. Sin embargo, existe un corrimiento de 2.5 eV en los espectros a 30 K, esto se debe a la transición de fase que sufren las muestras, esto es, pasan del estado normal (paramagnético y semiconductor) al estado superconductor (diamagnético) [1, 10]. También se observa un pequeño pico (pico secundario) entre 535 - 535.5 eV en los espectros a RT y que después del cambio de fase notamos que su intensidad a crecido y que se mantienen en la misma posición para ambos casos.

Para el caso de YBCO a RT la relación de intensidades entre el pico principal y el pico secundario es 16:1 mientras que a 30 K la relación pasa a ser 2:1; por otro lado, para el caso de nuestro compuesto la relación de in-

tensidades en el estado normal es 8:1 y en el estado superconductor es 8:5. Cabe resaltar que este pico no aparece en el espectro del $YBa_2Cu_3O_6$ [5], que como sabemos es la fase aislante del YBCO, por lo que su presencia en los espectros de nuestro compuesto, similar al del YBCO, confirma la transición superconductor en el YCaBaSr.

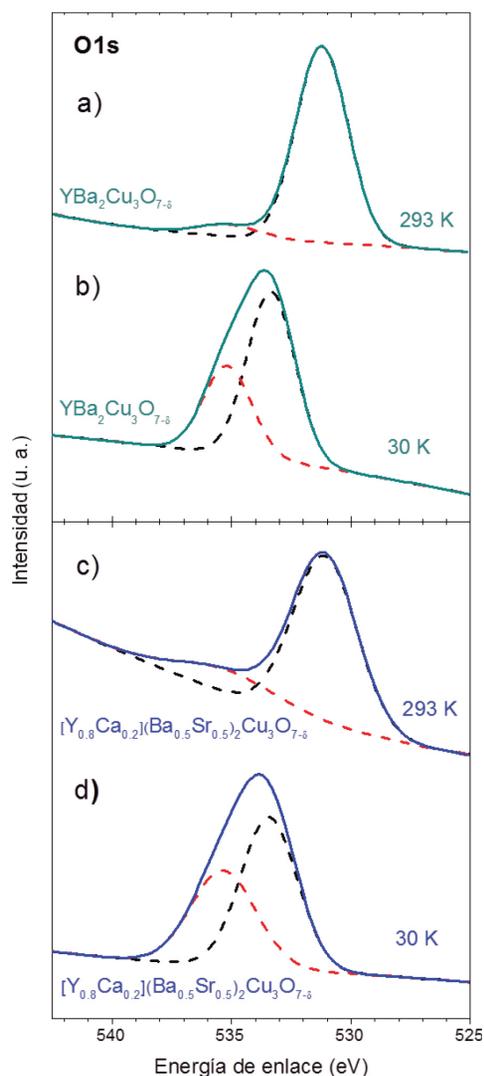


Figura N.º 4. Espectros XPS del pico O 1s del $YBa_2Cu_3O_{7.5}$, a) a RT (estado normal), b) a 30 K (estado superconductor), y del $[Y_{0.8}Ca_{0.2}](Ba_{0.5}Sr_{0.5})_2Cu_3O_{7.5}$, c) a temperatura ambiente y d) a 30 K

Comparando la relación de intensidades del YBCO y del YCaBaSr la participación del pico secundario es menor en el YBCO, lo cual insinúa un carácter metálico menor al del YCaBaSr. Sin embargo, en el estado

superconductor ocurre todo lo contrario, la participación del pico secundario es mayor en el YBCO por lo que la hibridización de los estados $Cu3d-O2p$ es mayor en éste que en nuestro compuesto. Esta variación de las intensidades, al estar asociada a la hibridización de los estados $p-d$, confirma el cambio de fase.

En la figura 5 se presentan los espectros del pico $Cu3p$ del YBCO e YCaBaSr tanto a temperatura ambiente como a 30 K. En estos espectros no se observan corrimientos de los picos principales, pero las formas de los espectros varían notablemente. En los espectros a RT se pueden observar a simple vista dos picos ubicados en 79 y 77 eV pertenecientes al $Cu(+3)$ y $Cu(+2)$ respectivamente. Sin embargo, existe un pico en 74 eV opacado por los dos anteriores que pertenece al $Cu(+1)$ el cual aparece con mayor intensidad en los espectros a 30 K, la relación de intensidades a RT de los picos $Cu(+1)$, $Cu(+2)$ y $Cu(+3)$ es 3:9:6 y a 30 K es 7:9:5, esto nos indica que al estar el $Cu(+1)$ relacionado con la hibridización de los estados $Cu3d$ y $O2p$, este ha tomado mayor preponderancia y por ende participa en el cambio de fase del estado normal al estado superconductor siendo esta es la razón por la cual no es detectado en los espectros a RT.

A pesar de esto, se obtuvo de la literatura que los átomos $Cu(+2)$ son los que participan de mayor manera en este tipo de enlaces [2] pero en nuestro análisis se observa que la intensidad del $Cu(+2)$ no varía con el cambio de temperatura, por lo que la formación del enlace $Cu-O$ se debe completamente a los átomos $Cu(+1)$.

Para el caso de nuestro compuesto ocurre algo similar, pero las relaciones de intensidades varían levemente respecto a las del caso anterior. La relación de intensidades de $Cu(+1)$, $Cu(+2)$ y $Cu(+3)$ del YCaBaSr en el estado normal es 5:11:8 y en el estado superconductor pasa a ser 9:11:7, se puede apreciar que la variación de la intensidad del pico correspondiente al $Cu(+1)$ en el cambio

de fase es menor para el caso de nuestro compuesto que para el YBCO, similar a lo que paso en los espectros de $O1s$, por lo que la hibridización de los estados $Cu3d$ y $O2p$ es menor para nuestro compuesto.

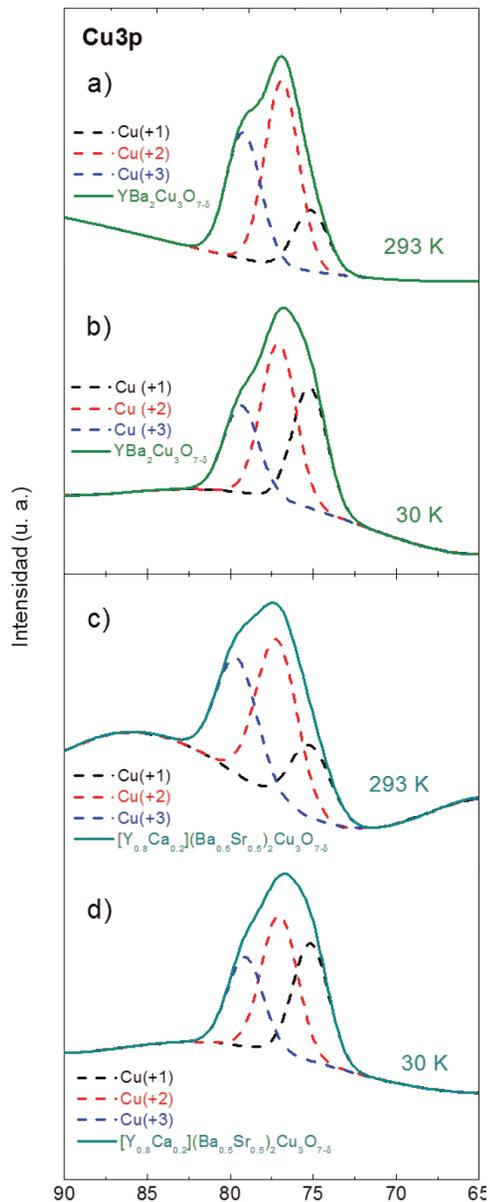


Figura N.º 5. Espectros XPS del pico $Cu 3p$ del $YBa_2Cu_3O_{7.5}$, a) a RT (estado normal), b) a 30 K (estado superconductor), y del $[Y_{0.8}Ca_{0.2}](Ba_{0.5}Sr_{0.5})_2Cu_3O_{7.5}$, c) a temperatura ambiente y d) a 30 K

En el caso de la banda de valencia (VB), cuyos espectros se muestran en la figura 6, las graficas fueron sobrepuestas para notar

de mejor forma las diferencias que existen entre ellas. Analizando los espectros a RT, se puede observar que el espectro del YCaBaSr corta por encima el nivel de Fermi respecto al espectro del YBCO, esto indica, que en el estado normal, el YCaBaSr tiene mayor carácter metálico que el YBCO [14], lo cual concuerda con los dopajes que se le han realizado al YBCO para obtener nuestro YCaBaSr. Esto es, reemplazando el ion Y^{+3} por el ion Ca^{+2} aumenta ligeramente su carga total, mientras que sustituyendo el ion Ba^{+2} por el ion Sr^{+2} esta no varió [15]. Ahora, para el caso de los espectros a 30 K, notamos que hubo corrimientos de la parte más intensa de los espectros, estos fueron de 1.6 y 2.6 eV para el YBCO y el YCaBaSr respectivamente, que a RT se encontraban en 5 eV para el YBCO y en 6 eV para nuestro compuesto cuando se realiza el cambio temperatura.

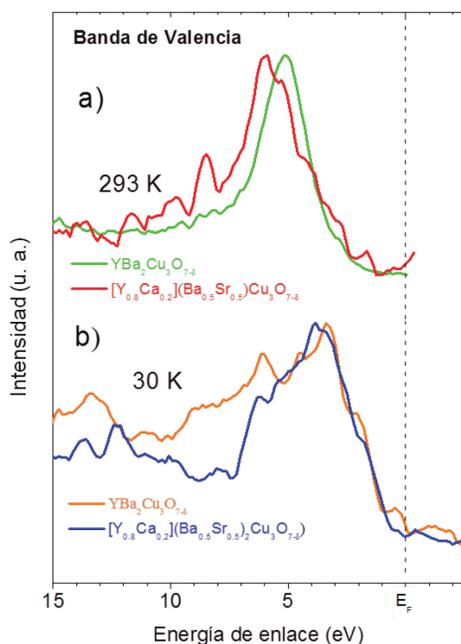


Figura N.º 6. Espectros XPS de la banda de valencia del $YBa_2Cu_3O_{7.6}$ a) y $[Y_{0.8}Ca_{0.2}](Ba_{0.5}Sr_{0.5})Cu_3O_{7.6}$, a) a temperatura ambiente y c) a 30

Esto es debido a la hibridización de los estados $Cu3d$ y $O2p$ que nuevamente confirman el cambio de fase al estado superconductor [2]. Además se puede observar que cuando los espectros a 30 K cortan el nivel de Fermi, se han invertido los roles, ahora el que cruza

por encima del otro es el YBCO, por lo que la densidad de estados de nuestro compuesto es menor que la del YBCO en el estado superconductor. Notar que la T_c del YCaBaSr es menor en aproximadamente 10 K que la del YBCO, por lo que este efecto podría estar relacionado de alguna forma con la variación de la temperatura crítica. Además, esto concuerda con lo visto en los espectros $O1s$ y $Cu3p$ a 30 K los cuales mostraban menor participación en la transición de fase, esto es menor hibridización de los estados $Cu3d$ y $O2p$ en el YCaBaSr que en el YBCO.

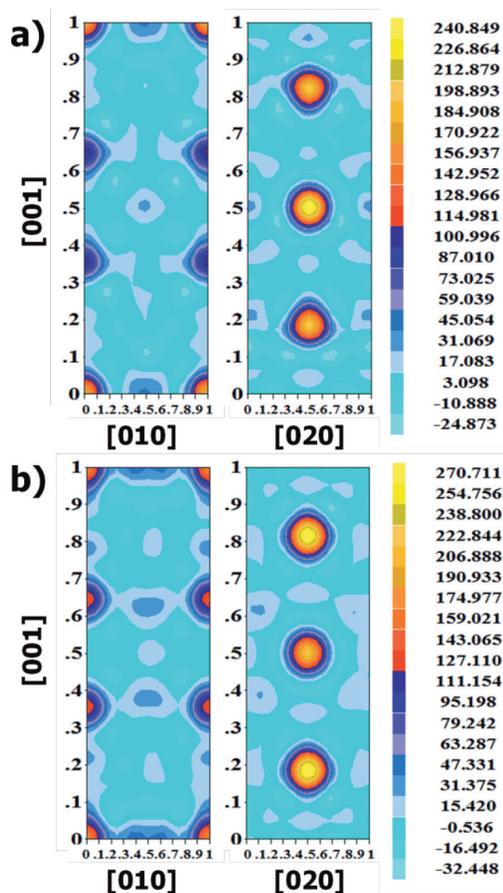


Figura N.º 7. Mapeo de Fourier obtenido mediante refinamiento Rietveld a) YBCO y b) YCaBaSr; en la parte derecha se encuentran las leyendas con las intensidades de densidad electrónica de los contornos.

En la figura N.º 7 se observa el diagrama de densidad electrónica obtenida del refinamiento Rietveld. En ambos diagramas se observa que en las posiciones de $[Y,Ca]$ y

[Ba,Sr] existe mayor densidad electrónica. Sin embargo si observamos las leyendas de las intensidades (parte derecha de la figura N.º 7) podemos ver que el YCaBaSr tiene mayor densidad electrónica en dichas posiciones, lo cual concuerda con los dopajes que se hicieron a nuestro compuesto y esto coincide con los resultados obtenidos del espectro XPS de la banda de valencia; por otro lado, se nota claramente que la densidad electrónica en la posición del Y es mayor que en la posición del Ba para el caso del YBCO y que ocurre todo lo contrario en el caso de nuestro compuesto. Además, la falta de contornos alrededor de estas posiciones indica que estos átomos están casi completamente ionizados [7], donde la carga total en la posición del [Y,Ca] es +2.8 y en la posición del [Ba,Sr] continúa siendo +2. También se observa que las cadenas Cu-O tienen mayor densidad de carga que los planos superconductores, lo que nos corrobora el comportamiento de reservorio de carga que se le otorga a las cadenas Cu-O.

IV. CONCLUSIONES

La incorporación de los átomos de Ca en la posición del Y y de los átomos de Sr en la posición de Ba ocasionaron que la estructura cristalina del YCaBaSr pase de ser ortorrómbica (estructura cristalina del YBCO) a ser tetragonal. Con respecto a la estructura electrónica, pudimos observar que en los espectros del O, los corrimientos de los picos 1s a 30 K respecto a los espectros a RT confirmaron la transición de fase al estado superconductor. Se encontró en los superconductores analizados que los átomos de Cu se encuentra en tres estados: Cu(+1), Cu(+2) y Cu(+3), de los cuales el que más interviene en la transición de fase es el Cu(+1), participando así en la formación de los enlaces Cu-O. Sin embargo, el Cu(+1) participa de menor manera en la formación de los Cu-O en nuestro compuesto que en el YBCO. Además, en los espectros analizados del Cu y el O pudimos comprobar que la hibridización de los estados $Cu3d$ y $O2p$ está completamente

ligada con la superconductividad para los dos compuestos estudiados, esto se debe al crecimiento en la intensidad de los picos $Cu3p$ correspondiente al átomo Cu(+1) y por el otro lado al crecimiento del pico $O1s$ correspondiente al intervalo de 535 – 535.5 eV. También se encontró que nuestro superconductor tiene mayor carácter metálico que el YBCO en el estado normal, esto se debió en mayor parte al dopaje hecho de Ca^{+2} en la posición del Y^{+3} que al dopaje hecho de Sr^{+2} en la posición del Ba^{+2} , esto se pudo comprobar con el mapeo de Fourier el cual mostró que las densidades de carga habían aumentado en las posiciones donde se realizaron los dopajes, mostrando también que estos átomos están casi completamente ionizados. Por último, del espectro de la banda de valencia se pudo corroborar la hibridización de los estados $Cu3d$ y $O2p$ y que esta es menor en nuestro compuesto.

V. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado en parte por el Consejo Superior de Investigaciones (CSI) del Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (Proyecto CON-CON 121301041). El trabajo en Cambridge ha sido financiado por el Engineering and Physical Science Research Council (EPSRC). El trabajo en Japón ha sido financiado por la Sociedad Japonesa para la Promoción de la Ciencia (JSPS No. P12030). El trabajo en Brasil ha sido financiado por la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), el Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) y la Fundação de Amparo à Ciência e tecnologia do estado de Pernambuco (FACEPE) (APQ-0589-1.05/08). Además, nuestro agradecimiento al Dr. Silvano Lizzit del ramal SUPERESCA del Sincrotrón Elettra de Trieste, Italia, por su ayuda en las medidas mediante XPS.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] David W. Lynch and Clifford G. Olson. Photoemission Studies of

- High-Temperature Superconductors (Cambridge University Press, Cambridge, U.K.) 1991.
- [2] Saxena A. K. High-Temperature Superconductors, Ed. Springer 2009.
- [3] Plakida N. High-Temperature Cuprate Superconductors, Ed. Springer. 2010.
- [4] Sheahen T. Introduction to High-Temperature Superconductivity. Selected Topics, Ed. Kluwer. 1994
- [5] I.N. Shabanova, O.V. Popova, V.I. Kormilets, N.N. Nebogatikov, V.I. Kukuev. Journal of Electron Spectroscopy, 1998, 88-91. 485-488
- [6] Shabanova I.N., Kurganskii S.I., Kukuev V.I., Popova O.V., Nebogatikov N.M., Korrailets V.I. Journal of Electron Spectroscopy, 1995, 76. 715-718
- [7] C.D. Wagner: Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy, Ed. G.E. Muilenberg (Perkin-Elmer, Physical Electronic Division, Eden Prairie, 1979. MN.
- [8] J. C. Gonzales, Ana M. Osorio, A. Bustamante D., M. Bejar R. Rev. Soc. Quím. Perú 77, 2011 (2)
- [9] www.elettra.trieste.it/elettra-beamlines/superesca.html
- [10] L. de los Santos Valladares, A. Bustamante Dominguez, J. Llandro, S. Suzuki, T. Mitrelias, R. Bellido Q., Crispin H. W. and Y. Majima. J. App. Phys. 2010, 49
- [11] R. P. Vasquez, B. D. Hunt, M. C. Foote and L. J. Bajuk, J. Vac. Sci. Technol. A 1992, 10 (4)
- [12] Y. Tokura, J. B. Torrance, T. C. Huang, and A. I. Nazzal. Phys. Rev. B38 1988.