

Capítulo 7 Characterization of vermiculite+BaCl₂ composite for solar refrigeration

Capítulo 7 Caracterización del composite vermiculita+BaCl₂ para refrigeración solar

LARA-LUNA, Rubén Jayim†, MEZA-CRUZ, Onésimo, MARTINEZ-TEJEDA, Francisco Christian y PATIÑO-CARACHURE, Cristóbal*

†Universidad Autónoma del Carmen, Facultad de Ingeniería, Campus III, Avenida Central S/N, Esq. con Fracc. Mundo Maya, C.P. 24115, Ciudad del Carmen, Camp., Mex.

***Universidad Politécnica del Estado de Guerrero, Departamento de Ingeniería en Energía, México.*

ID 1^{er} Autor: *Rubén Jayim, Lara-Luna* / **CVU CONACYT ID:** 930958

ID 1^{er} Coautor: *Onésimo, Meza-Cruz* / **ORC ID:** 0000-0002-0875-6852, **CVU CONACYT ID:** 488085

ID 2^{do} Coautor: *Francisco Christian, Martínez-Tejeda* / **ORC ID:** 0000-0001-6951-5166, **CVU CONACYT ID:** 334729

ID 4^{to} Coautor: *Cristobal, Patiño-Carachure* / **ORC ID:** 0000-0002-1436-1259, **CVU CONACYT ID:** 226327

DOI: 10.35429/H.2021.12.1.69.77

R. Lara, O. Meza, F. Tejeda y C. Patiño

* cpatino@pampano.unacar.mx

S. Figueroa, B. Pérez, J. Flores, L. Santis. (AA. VV.) Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Handbooks-©ECORFAN-México, Campeche, 2021.

Resumen

La refrigeración por energía solar es una alternativa al enfriamiento por compresión. En estos sistemas, se emplean materiales composites capaces de realizar una reacción termoquímica eficiente, por lo cual se implementa el fenómeno de absorción sólido-gas. En este trabajo, fue sintetizado y caracterizado un material composite a base de vermiculita y sal (BaCl_2) con el propósito de cumplir con las características de un composite útil para refrigeración solar. Fueron diseñadas muestras con variación en el porcentaje de sal y vermiculita para utilizar el método de impregnación en seco. Las muestras fueron caracterizadas por difracción de rayos X (DRX), microscopia electrónica de barrido (MEB) y área superficial por BET. Los análisis de MEB y DRX indican una mayor impregnación de sal sobre la superficie de vermiculita para las muestras de mayor porcentaje de solución acuosa. De la técnica de BET se puede deducir que en este composite, se incrementa la capacidad de absorción, porosidad y área superficial. Así, el composite obtenido cumple con la característica más importante de ser implementado en las mediciones de absorción sólido-gas en un reactor que utiliza energía solar térmica.

BaCl₂, Vermiculita, DRX, MEB, BET

Abstract

Solar energy refrigeration is an alternative to compression cooling. In these systems, composite materials capable of carrying out an efficient thermochemical reaction are used, therefore the solid-gas absorption phenomenon is implemented. In this work, a composite material based on vermiculite and salt (BaCl_2) was synthesized and characterized in order to comply with the characteristics of a useful composite for solar cooling. Samples with variation in the percentage of salt and vermiculite were designed to use the dry impregnation method. The samples were characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and surface area by BET. The SEM and XRD analyzes indicate a greater permeation of salt on the vermiculite surface for the samples with a higher percentage of aqueous solution. From the BET technique it can be deduced that in this composite, the absorption capacity, porosity and surface area are increased. Thus, the composite obtained complies with the most important characteristic of being implemented in the solid-gas absorption measurements in a reactor that uses thermal solar energy.

BaCl₂, vermiculite, XRD, SEM, BET

7.1 Introducción

La generación de frío conlleva problemáticas de índole ambiental, económico y técnico. Es por ello, que el tema de la generación de frío sigue vigente y por ende se investigan y desarrollan técnicas alternativas a la refrigeración por compresión. Entre estas alternativas, se encuentra la refrigeración por sorción, y a su vez ésta contiene una técnica denominada refrigeración termoquímica o refrigeración por absorción sólido-gas. Esta es una técnica promisoría debido a que su ciclo termodinámico no utiliza energía eléctrica, esto sugiere no utilizar equipos electromecánicos para mover el refrigerante, tales como bombas o compresores. La energía que acciona el ciclo de la refrigeración termoquímica es en forma de calor y ésta puede provenir de alguna fuente de energía renovable. La sorción sólido-gas o termoquímica se caracteriza por la solubilidad que presentan los gases en estructuras sólidas, con la particularidad de generar una reacción química. En este tipo de reacciones químicas, se utilizan con frecuencia sales metálicas, en particular los halogenuros de metales alcalinos y alcalino-térreos, los cuales, en estado anhidro, pueden absorber grandes cantidades de amoníaco u otros refrigerantes (agua, alcoholes, aminas, etc.). Entre las sales que más se han utilizado, en las últimas dos décadas, están: el cloruro de calcio (CaCl_2) (Enibe & Iloeje, 1997), $\text{SrCl}_2\text{-NH}_3$ (Rao et al., 2015), el $\text{BaCl}_2\text{-NH}_3$ (Rivera et al., 2007), pero no son las únicas, Neveu P. y Castaing J. (1993) (Neveu & Castaing, 1993) reportan 36 reacciones sólido-gas, principalmente cloruros que reaccionan con amoníaco. Sin embargo, las sales mencionadas presentan problemáticas después de reaccionar con el amoníaco. La principal problemática de las sales puras es la conductividad térmica, ya que es muy baja con valores entre 0.1 y 0.3 W/mK (R. Wang et al., 2014), por lo cual esto conduce a una baja transferencia de calor. Por otro lado, una vez que la sal ha reaccionado con el amoníaco se presenta la aglomeración, esto disminuye la transferencia de masa al interior de la sal.

Con el objetivo de mejorar las condiciones de transferencia de calor y evitar la aglomeración, se han desarrollado materiales composites, mezclas entre las sales antes mencionadas y sólidos inertes como grafito expandido (Li et al., 2009), vermiculita (Zhong et al., 2007)(Veselovskaya et al., 2010), carbón sibunit y Al_2O_3 (Veselovskaya et al., 2010). Por lo tanto, en esta investigación se presenta las síntesis y caracterización de un composite a base de vermiculita y $BaCl_2$ utilizando la técnica de impregnación en seco, variando las composiciones en % peso. Se analiza y se discute por las técnicas de DRX, MEB y BET.

7.2 Metodología

En esta sección se describe el procedimiento experimental llevado a cabo para la obtención del composite de vermiculita y $BaCl_2$.

7.2.1 Síntesis del composite

Para la síntesis se utilizó la técnica de impregnación en seco, en la cual se utilizaron porcentajes desde 25 al 75 % peso de la vermiculita y la sal ($BaCl_2$). Los porcentajes en peso se muestran en la Tabla 7.1, donde se utilizó 1 g de vermiculita para todas las muestras variando solamente la composición de la sal. Las primeras 2 muestras fueron diluidas en 5 ml de agua destilada y en 15 ml las demás.

Tabla 7.2 Porcentaje de los materiales para la síntesis del composite

Muestra	% peso Verm	% peso Sal	peso sal (g)
1	60	40	0.667
2	40	60	1.5
3	60	40	0.667
4	50	50	1
5	40	60	1.5
6	25	75	3
7	60	40	0.667
8	50	50	1
9	40	60	1.5

Fuente: Elaboración propia

La impregnación consiste en verter lentamente la sal previamente disuelta en agua, la cual se impregna sobre las muestras de vermiculita. Una vez preparadas las muestras se ingresan a un horno de convección y se dejan reposar por 2 horas a 160 °C. Después se retiran del horno y se ingresan a un desecador de vacío para que se enfríen evitando el contacto con el ambiente. Una vez que se obtuvieron las primeras muestras a 5 ml de agua, por lo que se aumentó a 15 ml de agua para el resto de las muestras en las cuales se observó una mayor impregnación. En la figura 1 se puede observar la comparación de la impregnación empleando a) 5 ml y b) 15 ml de salmuera, en esta última se puede apreciar la sal distribuida uniformemente sobre toda la muestra.

Figura 7.1 Impregnación de salmuera diluida en a) 5 ml y b) 15 ml de agua, sobre la vermiculita



Fuente: Elaboración propia

7.2.2 Caracterización

La caracterización química, morfológica y estructural de los composites se llevó a cabo por la técnica de MEB en un equipo JEOL JSM-7600F con microanalizador marca BRUKER modelo XFlash y la DRX en un equipo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE DAVINCI con una radiación de Cu-K α de longitud de onda de $\lambda=1.5406 \text{ \AA}$, con un rango de barrido de $2\theta = 10^\circ - 50^\circ$, con una velocidad de $0.02^\circ/\text{s}$. Para la técnica BET se utilizó un equipo Quantachrome TouchWin versión 1.11, St 1 on NOVA touch 1LX [s/n:17015072001], esta se aplica a los sistemas de absorción y cuantificar el área superficial específica. Además de esta variable también se puede medir la distribución del tamaño de los poros. Esta información es útil en la evaluación del rendimiento del composite y la consistencia de síntesis, también para determinar la velocidad de absorción y de difusión en los poros.

7.3 Resultados y discusión

Mediciones del área superficial específica de la sal BaCl₂ y el composite Vermiculita (60%) + BaCl₂(40%), utilizando la técnica BET son presentados en la Tabla 7.2. Donde es posible observar el área superficial específica, el volumen y el radio de poro que estos materiales poseen. Pocos trabajos han reportado estas características importantes para la aplicación de composites en esta área, y para tomar una referencia, se presenta la medición del área superficial de la fase vermiculita natural de un trabajo previo, en el primer renglón de la tabla. Se puede notar que esta medición se encuentra aproximadamente alrededor del promedio estadístico del anterior trabajo (Rafael Diaz, n.d.).

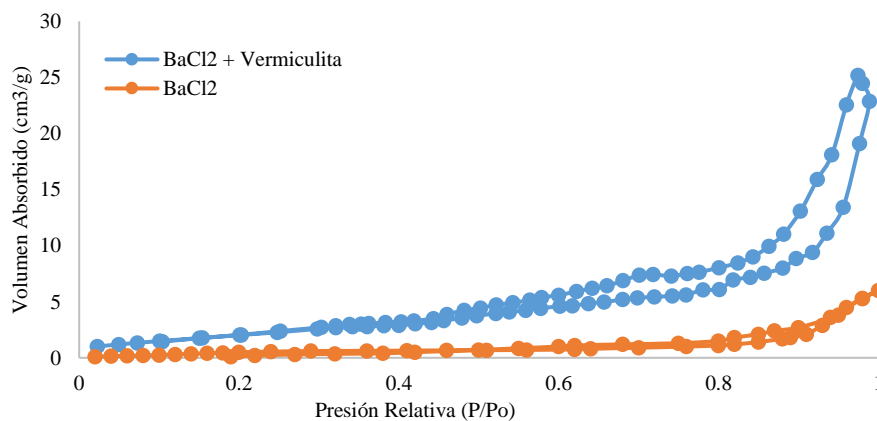
Tabla 7.2 Área superficial específica por BET

Material	Área superficial específica (m ² /g)	Volumen de poro total (cm ³ /g)	Radio de poro promedio de desorción
Vermiculita (Shinzato et al., 1999)	13.7	-	-
BaCl ₂	22.18	0.05286	1.897
Vermiculita+BaCl ₂	12.4975	0.04099	1.8114

Fuente: Elaboración propia

En el Gráfico 7.1 se muestran las curvas isotermas de absorción por el método BET, donde la relación entre la presión y el volumen absorbido de gas por un sólido, a temperatura constante, proporciona la capacidad de absorción. La prueba se le realizó a la sal pura BaCl₂ y al composite propuesto (muestra 1), dando como capacidad de absorción (curva abajo) logrando llegar a un valor máximo aproximado de $6 \text{ cm}^3/\text{g}$ y $25 \text{ cm}^3/\text{g}$ respectivamente. Con estos valores se puede apreciar que al agregar vermiculita a la sal pura se puede incrementar la cantidad de fluido que se puede absorber por cada gramo de composite. El objetivo principal de agregar una matriz porosa a una sal inorgánica es el de evitar que la sal, después de varios ciclos de refrigeración, se conglomeren y reduzca su eficiencia de absorción, otro objetivo sería el de mejorar su conductividad térmica y al mejorar sus propiedades de absorción, como en este caso, se obtendría un mejor resultado, esta última variable proporcionaría un incremento en el volumen de refrigerante que el composite es capaz de absorber/desorber dentro del sistema y de esta forma mejorar el rendimiento del ciclo.

Gráfico 7.1 Isotermas obtenidas a través de BET, a) BaCl₂ (L. Wang et al., 2009), b) Composite

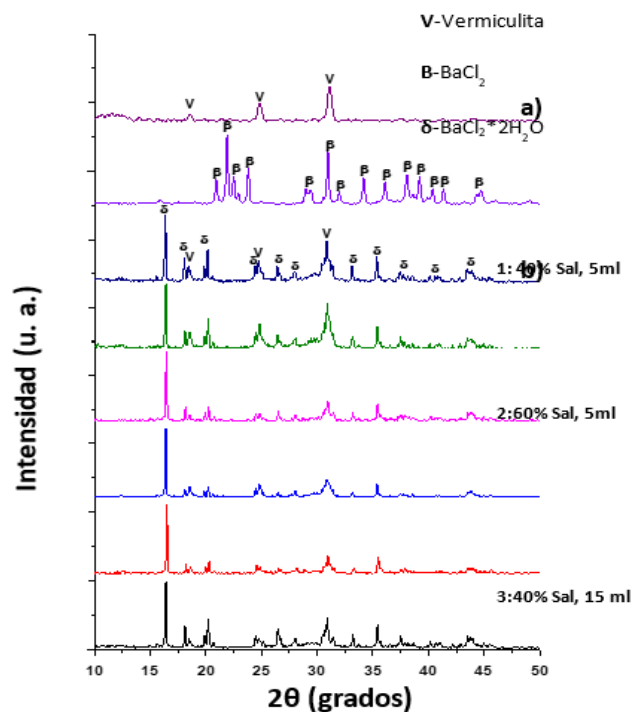


Fuente: Elaboración propia

El Gráfico 7.3 muestra los patrones de DRX de las diferentes muestras sometidas al método de impregnación. Los patrones a) y b) corresponden a las muestras de partida, de las cuales se pueden apreciar los picos característicos de las fases V-vermiculita y sal de β -BaCl₂. De acuerdo con la indexación con la base de datos AMCS (American Mineralogist Crystal Structure Database) la fase cristalográfica de la vermiculita corresponde a una estructura cristalina monoclinica con grupo espacial C1c1(9), con parámetros de red $a=5.33$, $b=9.18$ y $c=28.9$ Å, $\beta=97^\circ$, con formula de $Mg_{1.338}Fe_{0.24}Al_{0.721}Si_{1.36}O_9H_{1.75}$, estos valores son obtenidos de la tarjeta PDF 100-0061. De la misma manera fue identificada la fase BaCl₂ con una estructura ortorrómbica, Pbnm (62), $a=9.415$, $b=7.878$ y $c=4.731$ Å. Con respecto a lo obtenido en las muestras de partida se obtuvieron resultados semejantes a los obtenidos por otros autores (Gordeeva et al., 2013) (Grekova et al., 2014).

Los difractogramas 1 y 2 corresponden a las muestras impregnadas con una concentración de 40 y 60 % de salmuera diluida en 5 ml de agua destilada. En estos perfiles se puede apreciar la presencia de las fases δ -BaCl₂*2H₂O (hidrato de cloruro de bario, estructura monoclinica) y vermiculita. De estos resultados se deduce que la fase BaCl₂ fue di-hidratada durante el manejo de la caracterización, dado que el BaCl₂ es una sustancia higroscópica y reacciona espontáneamente con la humedad del medio ambiente. Por otro lado, comparando en función del porcentaje de sal (40 y 60 %) en el sistema, se puede apreciar que ambos perfiles se mantienen ligeramente iguales, por lo cual se sugiere que la concentración de sal diluida en 5 ml sobre la vermiculita no presenta cambios significativos sobre este proceso de impregnación. De esto, se puede interpretar que la fase vermiculita tiene una presencia significativa, de esta forma se puede asumir que el composite ha tenido una baja impregnación. Para las muestras cuya impregnación se utilizó una variación de concentración del orden de 40, 50, 60 y 75 % de sal diluida en 15 ml de agua destilada, se presentan en los difractogramas 3, 4, 5 y 6 respectivamente. En estos difractogramas debido a la disminución de la intensidad de los picos (ángulos $2\theta \approx 25^\circ$ y 31°) de la fase vermiculita se puede observar que la fase BaCl₂*2H₂O aparece en mayor proporción y conforme incrementa el porcentaje de sal, así mismo, se observa la disminución sistemática de la fase vermiculita, por lo tanto, la impregnación para estas condiciones depende directamente del incremento de la concentración de sal sobre la vermiculita. También, es importante mencionar que experimentalmente, con una salmuera, las partículas de BaCl₂ fueron vertidas sobre la vermiculita, por lo que la sal se encuentra dispersa sobre toda la superficie de la vermiculita encapsulando las partículas cerámicas, promoviendo así, la síntesis de un composite con mayor impregnación de sal. Conforme se agrega mayor relación de sal, mayor es el espesor o recubrimiento de sal sobre las partículas de vermiculita, esto se comprueba con la desaparición de los picos de la vermiculita (observado esto en mayor proporción en el patrón 5), es decir ese espesor no permite el paso de los DRX que le permita difractar a la fase vermiculita.

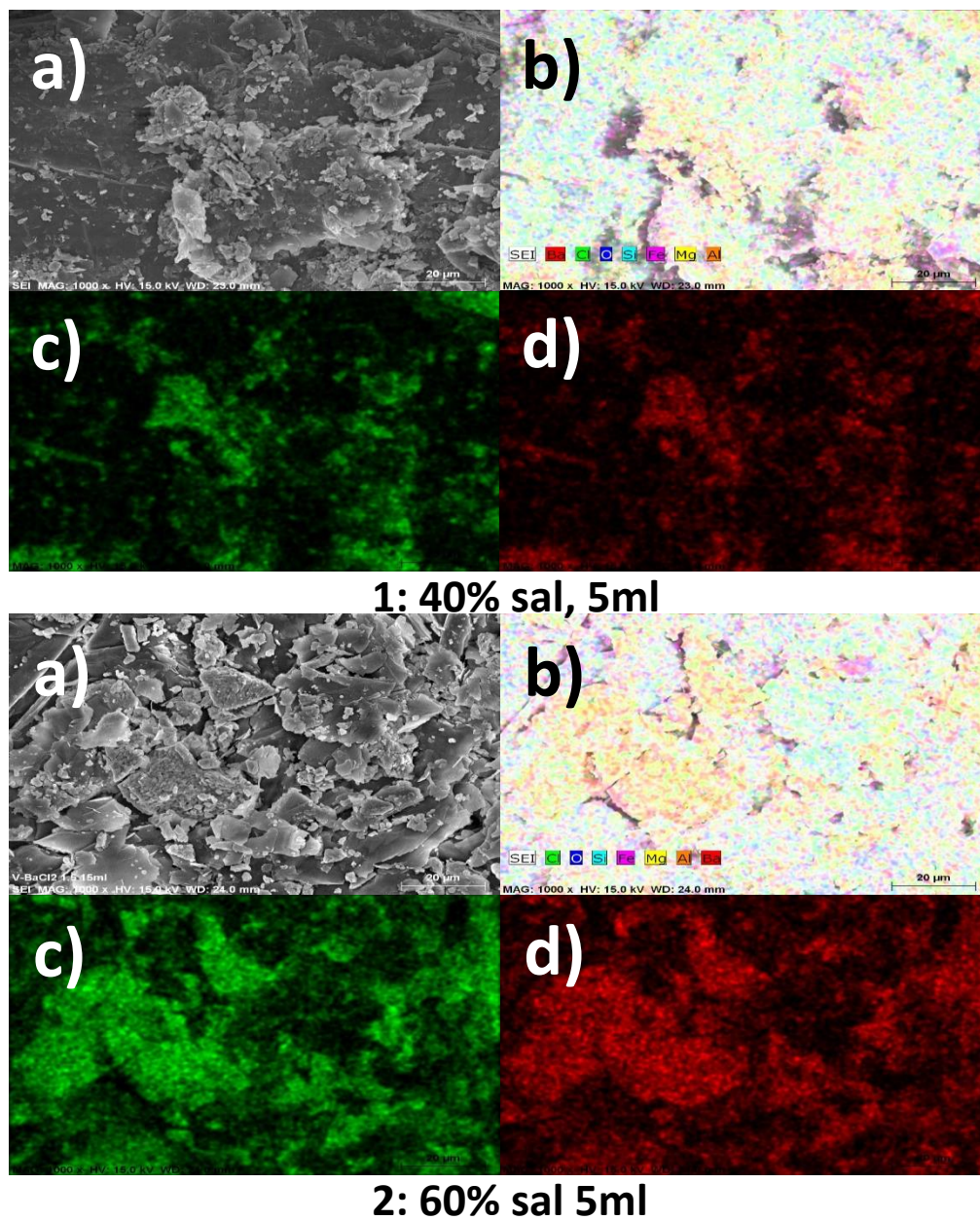
Gráfico 7.2 Patrones de DRX correspondientes de partida, a) vermiculita, b) BaCl₂ y las muestras impregnadas del 1 al 6+



Fuente: Elaboración propia

Para observar de manera directa la morfología, textura y composición química de la superficie de la vermiculita recubierta de sal, se llevó a cabo la microscopía electrónica de barrido (MEB). En la Figura 7.3 se muestran las micrografías obtenidas de las muestras 1 y 2 (impregnadas con 5 ml de agua), acorde a la nomenclatura de las tablas de experimentación. Se puede observar en la figura 4-1 y micrografía a) obtenida por electrones secundarios, donde se puede apreciar que la superficie posee un cúmulo de partículas irregulares y distribuidas en ciertas regiones de la imagen. Así, para determinar las composiciones de estas partículas se aplica la técnica de mapeo químico, que permite realizar un análisis químico bidimensional sobre la superficie expuesta. En la micrografía b) se aprecian los diferentes componentes químicos tal como Ba, Cl, O, Si, Fe, Mg y Al. A partir de estos resultados se procede a exponer los componentes principales de la sal, que corresponden al Cl y Ba, los cuales únicamente se muestran en las micrografías c) color rojo y d) color verde respectivamente. En estas micrografías se observa directamente la distribución de Ba y Cl en la misma región, deduciéndose así que la fase de sal $BaCl_2$ se encuentra ahí. Así, comparándose estas micrografías con respecto a la muestra 2 (figura 4-2), por ejemplo, en la micrografía a) se manifiesta una distribución de partículas distribuidas homogéneamente recubriendo la mayor parte de la superficie. De la misma manera comparando en b), c) y d) se aprecia una mayor distribución de la fase $BaCl_2$ sobre la superficie de la vermiculita, esto puede explicarse debido al incremento en porcentaje (60%) de la concentración de sal en el sistema.

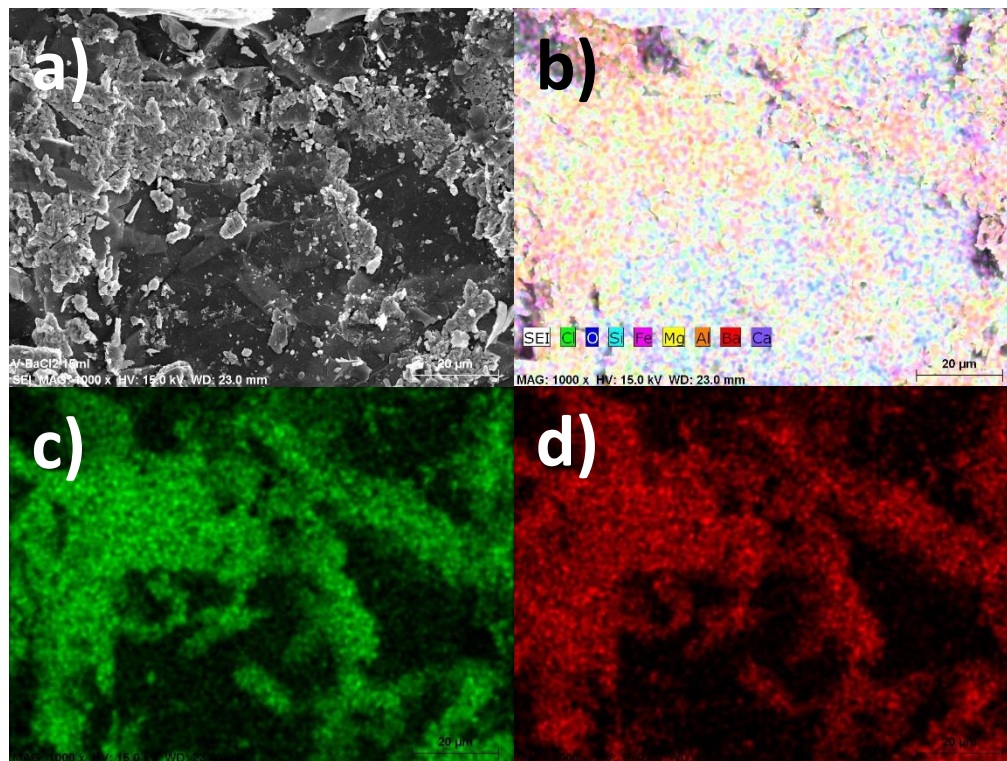
Figura 7.3 Micrografías en modo mapeo químico por MEB, muestras impregnadas de porcentajes 40 y 60 % de sal diluidas en 5 ml de agua



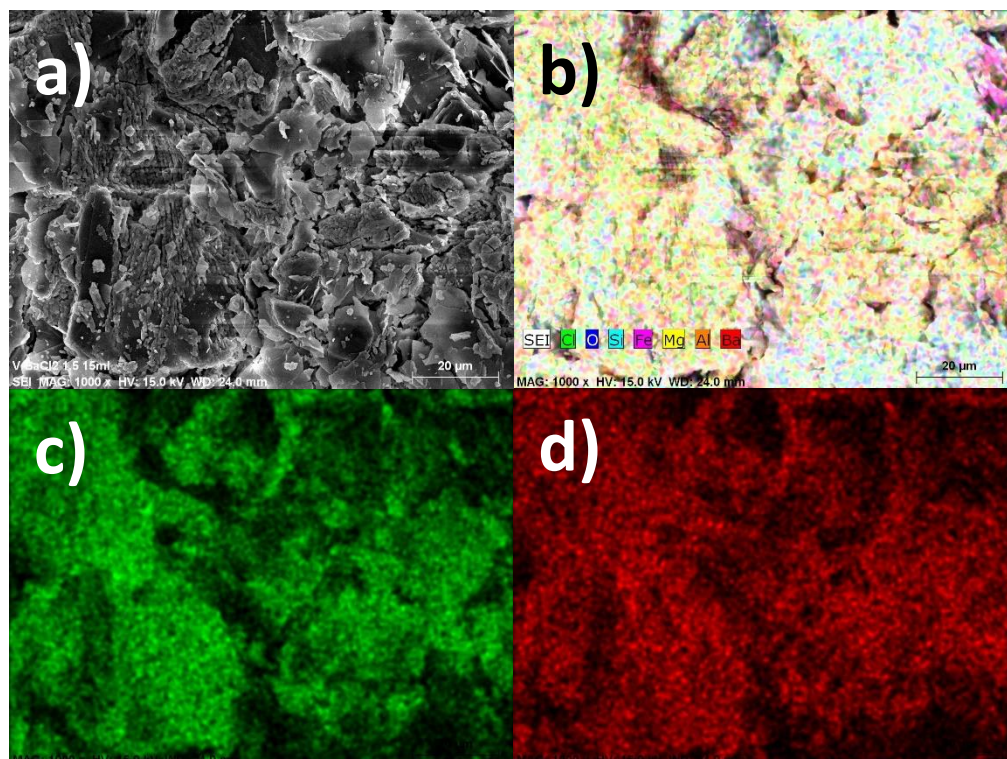
Fuente: Elaboración propia

Comparando estos resultados con las micrografías mostradas en la figura 7.4 que corresponden a las muestras de una mayor disolución (15 ml de agua) se puede observar cualitativamente como en la muestra 3 y 5 se aprecia una impregnación superficial más efectiva, es decir, un mayor porcentaje de sal sobre la superficie de la vermiculita.

Figura 7.4 Micrografías en modo mapeo químico por MEB, muestras impregnadas de porcentajes 40 y 60 % de sal diluidas en 15 ml de agua



3: 40% sal, 15 ml



5: 60% sal, 15 ml

Fuente: Elaboración propia

Se determinó el valor semi-cuantitativo de la sal impregnada, para esto se utilizó los resultados estadísticos de varios análisis químicos realizados en diferentes regiones de las muestras presentadas en la tabla 7.3. El valor de la última fila de la tabla 3 representa el porcentaje real de impregnación respecto al total de sal utilizada. Por ejemplo, para la muestra 1 sólo el 44% del total de sal utilizada se quedó impregnada en el composite, es decir que menos del 50% de la sal que se empleó para la síntesis fue aprovechada. Se puede observar como la muestra 1 y 2 son las que menor % de impregnación presentan, se debe recordar que estos dos composites son los que se sintetizaron con 5 ml de agua, mientras que el resto se sintetizaron con 15 ml de agua, uno de ellos alcanzando el 93% de impregnación.

Tabla 7.3 Resultados porcentuales de los elementos presentes en los composites

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Vermiculita (%)	60	40	60	50	40
BaCl ₂ (%)	40	60	40	50	60
Elemento	norm wt. %				
Oxígeno	64.1014117	54.7716427	51.0394067	44.7090928	38.6400877
Magnesio	5.05545726	3.28774911	3.45716858	1.46318545	1.84476552
Silicio	6.94779337	4.47151127	4.46070285	2.94910894	2.23980832
Cloro	4.54439842	11.096951	11.3107123	13.7185486	16.357423
Calcio		0.88502167			
Hierro	4.40613541	3.93554202	3.93962623	3.96975366	2.81917469
Bario	13.2885572	20.7225368	24.5625523	32.7937604	37.670534
Aluminio	1.65624664	0.82904547	1.22983099	0.39655019	0.42820689
Suma	100	100	100	100	100
BaCl ₂	17.8329556	31.8194878	35.8732647	46.512309	54.0279569
% Impregnación	44.582389	53.0324797	89.6831618	93.024618	90.0465948

Fuente: Elaboración propia

7.4 Conclusiones

La implementación de composites a los sistemas de refrigeración resultaría en una práctica viable ya que la combinación de una matriz porosa con una sal inorgánica presenta mejoras como en la porosidad, permeabilidad y conductividad térmica. Con los resultados del BET se obtuvo que la capacidad de absorción del BaCl₂ se mejoró poco más de 4 veces al combinarlo con una matriz porosa, en este caso la vermiculita.

Un punto importante durante la síntesis de los composites es asegurar que la mayor cantidad de sal utilizada se impregne en la matriz, de esta forma se pueden obtener mejores composites y mejorar la metodología de síntesis. En este trabajo se pudo observar que la cantidad de agua con la que se mezcla la sal para preparar la salmuera es importante debido a que con menor volumen se obtuvo menor impregnación que al utilizar un mayor volumen de agua.

En el DRX se observa que el composite completamente molido muestra la presencia de ambos compuestos (vermiculita y BaCl₂) es decir, cuanto más fino se presente el composite, la sal que esta sobre las partículas de vermiculita se estaría desprendiendo.

De los resultados de DRX y MEB se puede deducir que cuando se incrementa la concentración de BaCl₂ diluida en 15 ml de agua, se incrementa la impregnación. Se debe señalar que la vermiculita, como todo material, posee un límite de impregnación, ese valor dependerá y se podrá conocer a partir del área de superficie.

Estos resultados también sugieren que al disminuir la cantidad de agua a diluir con la concentración de BaCl₂ la salmuera tiende a aglomerarse, motivo por el cual no es posible su dispersión homogénea sobre la superficie de la vermiculita.

Tanto de forma cualitativa con el DRX y el MEB como de forma cuantitativa con el MEB se comprobó que las muestras sintetizadas con más cantidad de agua presentan un mayor porcentaje de impregnación de sal sobre la superficie de la vermiculita estos andan en un rango del 63 al 90%.

7.5 Agradecimientos

R.J. Lara-Luna agradece a CONACyT por el financiamiento otorgado (Número de apoyo: 719530) para realizar sus estudios de posgrado. Asimismo, al Dr. Jose Enrique Flores Chan y el M.C. Ivan Eleazar Castro Cisneros por el apoyo técnico en las pruebas de BET y MEB.

7.6 Referencias

- Enibe, S. O., & Iloeje, O. C. (1997). Transient analysis and performance prediction of a solid absorption solar refrigerator. *Solar Energy*, *61*(1), 43–59. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(96\)00155-7](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(96)00155-7)
- Gordeeva, L., Grekova, A., Krieger, T., & Aristov, Y. (2013). Composites “binary salts in porous matrix” for adsorption heat transformation. *Applied Thermal Engineering*, *50*(2), 1633–1638. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.07.040>
- Grekova, A. D., Veselovskaya, J. V., Tokarev, M. M., Krieger, T. A., Shmakov, A. N., & Gordeeva, L. G. (2014). Ammonia sorption on the composites “(BaCl₂+BaBr₂) inside vermiculite pores.” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *448*(1), 169–174. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.02.025>
- Li, T. X., Wang, R. Z., Kiplagat, J. K., & Wang, L. W. (2009). Performance study of a consolidated manganese chloride-expanded graphite compound for sorption deep-freezing processes. *Applied Energy*, *86*(7–8), 1201–1209. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.06.004>
- Neveu, P., & Castaing, J. (1993). Solid-gas chemical heat pumps: Field of application and performance of the internal heat of reaction recovery process. *Heat Recovery Systems and CHP*, *13*(3), 233–251. [https://doi.org/10.1016/0890-4332\(93\)90014-M](https://doi.org/10.1016/0890-4332(93)90014-M)
- Rafael Diaz. (n.d.). *Ficha Técnica del BaCl₂*. Cloruro de Bario (BaCl₂): Fórmula, Propiedades, Usos y Riesgos. <https://www.lifeder.com/cloruro-de-bario/>
- Rao, K. N. M., Gopal, R. M., & Bhattacharyya, S. (2015). Analysis of a SrCl₂-NH₃ solid sorption refrigeration system. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, *10*(4), 365–373. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt046>
- Rivera, C., Pilatowsky, I., Méndez, E., & Rivera, W. (2007). Experimental study of a thermo-chemical refrigerator using the barium chloride-ammonia reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, *32*(15 SPEC. ISS.), 3154–3158. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.01.023>
- Shinzato, M. C., Hypolito, R., & Valarelli, J. V. (1999). Utilização de Vermiculita na Retenção de Íons Metálicos. *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, *71*(3), 398–407.
- Veselovskaya, J. V., Tokarev, M. M., & Aristov, Y. I. (2010). Novel ammonia sorbents “porous matrix modified by active salt” for adsorptive heat transformation. 1. Barium chloride in various matrices. *Applied Thermal Engineering*, *30*(6–7), 584–589. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.11.001>
- Wang, L., Chen, L., Wang, H. L., & Liao, D. L. (2009). The adsorption refrigeration characteristics of alkaline-earth metal chlorides and its composite adsorbents. *Renewable Energy*, *34*(4), 1016–1023. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.08.003>
- Wang, R., Wang, L., & Wu, J. (2014). Adsorption Refrigeration Technology: Theory and Application. In *Adsorption Refrigeration Technology: Theory and Application*. <https://doi.org/10.1002/9781118197448>
- Zhong, Y., Critoph, R. E., Thorpe, R. N., Tamainot-Telto, Z., & Aristov, Y. I. (2007). Isothermal sorption characteristics of the BaCl₂-NH₃ pair in a vermiculite host matrix. *Applied Thermal Engineering*, *27*(14–15), 2455–2462. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.02.011>