

Cinética de la precipitación del hidróxido de magnesio a partir de la salmuera residual de la planta Llipi-Potosí

Precipitation kinetics of magnesium hydroxide from the residual brine of the Llipi-Potosí plant

Nicole Olmos^{1,*}, Edwin Escalera², Eduardo Zambrana³, Felix Ugarte Cejas⁴

*Correo de correspondencia: olmoscamila299@gmail.com

Resumen

La planta de Yacimientos de Litio Boliviano (YLB) produce carbonato de litio y cloruro de potasio, generando un subproducto denominado salmuera residual (SR) caracterizado por estar altamente concentrado en magnesio. Una ruta viable para la recuperación del magnesio en forma de hidróxido de magnesio ($Mg(OH)_2$) es la precipitación en medio básico durante este método es posible controlar la distribución de partícula que requieren las industrias tales como aleaciones metálicas, refractarios, farmacéutica y relleno retardante. En el presente artículo se reportan resultados de la composición química de la SR y del estudio de la cinética de precipitación del $Mg(OH)_2$, el cual permite predecir la influencia de la temperatura sobre las partículas de los precipitados, los mismos que fueron evaluados por microscopía electrónica de barrido (MEB), difracción de rayos X y termogravimetría (TG). La muestra SR contiene 12,2% Mg, 45,3% Cl y 0,4% S. Se utilizó el método de la conductividad eléctrica para determinar la cinética de precipitación a las temperaturas de 288,15 K, 298,15 K, 308,15 K y 318,15 K. Observando precipitados en formas de escamas superpuestas, las mismas que tienden dispersarse a medida que la temperatura aumenta. Se obtuvo la velocidad de nucleación y crecimiento cristalino de $2,545 \times 10^{-3}$ y $6,765 \times 10^{-4}$ (s^{-1}) respectivamente a los 318,15 K con precipitados de menor tamaño y que tienden a estar más uniformes.

Palabras clave: *Hidróxido de magnesio, cinética de precipitación, morfología de cristales, efecto de la temperatura, salmuera residual.*

Abstract

The Bolivian Lithium Deposits plant produces lithium carbonate and potassium chloride, generating a byproduct called residual brine (SR) characterized by being highly concentrated in magnesium. A viable route for the recovery of magnesium in the form of magnesium hydroxide ($Mg(OH)_2$) is the precipitation in a basic medium during this method it is possible to control the particle distribution required by industries such as metal alloys, refractories, pharmaceuticals and retardant filling. In this article, results of the chemical composition of the SR and the study of the precipitation kinetics of $Mg(OH)_2$ are reported, which allows predicting the influence of temperature on the particles of the precipitates, the same ones that were evaluated. by scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction and thermogravimetry (TG). The SR sample contains 12,2% Mg, 45,3% Cl and 0,4% S. The electrical conductivity method was used to determine the precipitation kinetics at the temperatures of 288,15 K, 298,15 K, 308,15 K and 318,15 K. Observing precipitates in the form of flakes superimposed, on them which tend to disperse as the temperature increases. The nucleation and crystalline growth rate of $2,545 \times 10^{-3}$ and $6,765 \times 10^{-4}$ (s^{-1}) respectively was obtained at 318,15 K with smaller precipitates that tend to be more uniform.

Keyword: *Magnesium hydroxide, precipitation kinetics, crystal morphology, temperature effect, residual brine.*

¹Laboratorio de Investigación No metálicos-Nanoestructurados (NM), Departamento de Química, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0004-8862-0112>

²Laboratorio de Investigación No metálicos-Nanoestructurados (NM), Departamento de Química, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0009-2309-3733>

³Departamento de Química y Alimentos, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0000-0003-4221-5539>

⁴Laboratorio de Microscopía, Departamento de Física, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0007-0529-959X>

Recibido: 15 de julio de 2024. Aceptado: 20 de diciembre de 2024

1. Introducción

Las salmueras son formaciones geológicas generadas por evaporación, que se caracterizan por la homogeneidad óptica y una composición rica en sales de halita, silvinita, litio, bischofita, sulfatos y boro, (Romina, et al., 2021). Bolivia cuenta con tres salares conformados por el salar de Coipasa con una extensión aproximada de 2.278 km², salar de pastos grandes con una extensión aproximada de 120 km² y el salar de Uyuni siendo este último el más grande, con una extensión aproximada de 10.000 km² y una altitud media de 3.700 msnm, ubicada en el departamento de Potosí (Andrade, 2007).

En la actualidad la planta de Yacimiento de Litio Boliviano (YLB) explota sales minerales de Uyuni, produciendo cloruro de potasio y carbonato de litio, utilizando el método de preconcentración fraccionada en piscinas de evaporación, generando una salmuera residual con alto contenido en magnesio (Mohammad, 2019). La recuperación de magnesio de las salmueras ha despertado un creciente interés debido a que las aguas salinas (salmuera) contienen un alto contenido del ion magnesio presente como bischofita (MgCl₂ 6H₂O). El ion magnesio es recuperado en forma de hidróxido de magnesio Mg(OH)₂ (Fontana, et al., 2022) mediante técnicas tales como destilación multiefecto (MED), ósmosis inversa (RO), electrodiálisis (ED), electrodiálisis inversa (EDR), nanofiltración (NF), técnica sol-gel y la precipitación química que es una de la más simples y viable económicamente (Mayor, 2019). El método de precipitación utiliza agentes precipitantes tales como NaOH, Ca(OH)₂ e NH₄OH formando una solución lechosa del Mg(OH)₂, presentando cada uno de estos precipitados alcalinos sus propias ventajas y desafíos. En términos económicos, el uso de Ca(OH)₂ sobresale debido a su costo más bajo en comparación con las demás alternativas. Sin embargo, es importante señalar que la solubilidad en agua del Ca(OH)₂ es de solo 1,73 g/L a 25°C lo que limita su uso como agente precipitante y por tanto disminuye la eficiencia en la extracción de Mg(OH)₂. Sin embargo, el NaOH tiene una alta solubilidad en agua (1000 g/L a 25°C), esto permite el uso más eficiente en la producción de Mg(OH)₂ de alta pureza por precipitación. Muy escasamente se utiliza el NH₄OH debido a que se necesita más control en la operación de precipitación por los aspectos de salud y seguridad. Por lo que se deben considerar estas diferencias al momento de seleccionar el agente precipitante con base alcalina más adecuada (Chu, et al., 2023). El magnesio tiene diferentes aplicaciones tales como las industrias, entre los que podemos mencionar a la industria automotriz que utiliza aleaciones de aluminio-magnesio, industrias farmacéuticas, refractarios, industria química y otros (Jakić, et al., 2020).

Investigaciones previas han abordado diferentes aspectos de la cinética de precipitación para comprender la formación del Mg(OH)₂ con NaOH como agente precipitante. Qihua Yuan (2015) y Lijuan Lu (2018) estudiaron la cinética de precipitación con sales sintéticas de MgCl₂ 6H₂O y Mg(NO₃)₂ analizando la influencia de la temperatura en la velocidad de formación de los precipitados y el tiempo de inducción utilizando el método de la conductividad eléctrica determinando la tasa de nucleación y la tasa de crecimiento cristalino concluyendo que la temperatura afecta significativamente la distribución de los precipitados. Turek y Gnot estudiaron los tiempos de sedimentación en la formación del Mg(OH)₂ concluyendo que en un tiempo de formación de 0-24 h, el volumen de sedimento disminuye de 31 a 10,8% y la tasa de filtración aumenta de 0,14 a 8,7 kg/m²h, (Gnot, 1995). Alamdari (2008) realizó un estudio específico de la cinética de precipitación basado en un modelo matemático de balance de población utilizando agua de mar residual compuesta de MgCl₂ con una concentración de magnesio del 3%, concentrándose en el crecimiento de partículas a través de la adición gradual del agente precipitante NaOH en la solución de MgCl₂, obteniendo una liberación lenta de la sobresaturación e induciendo al aumento del tamaño de partículas de Mg(OH)₂.

En el presente trabajo de investigación se estudió la cinética de la precipitación para analizar la influencia de la temperatura en la formación del $Mg(OH)_2$, promoviendo el aumento del tamaño de los precipitados a través de la adición por goteo de NaOH. Comprendiendo el crecimiento de los cristales y los mecanismos involucrados en la precipitación, tales como la sobresaturación relativa, tiempo de inducción, constante de la tasa de nucleación y la constante de la tasa de crecimiento cristalino, utilizando el método de conductividad eléctrica.

2. Métodos

Caracterización química de la salmuera residual de Uyuni

La caracterización de la salmuera residual (SR) proveniente de Uyuni de la planta de Llipi-Potosí, se realizó por microscopía electrónica de barrido (MEB) y técnicas analíticas para conocer los iones presentes en la muestra. El análisis MEB se realizó en una muestra de salmuera seca obtenida a $70^{\circ}C$, en cambio, la muestra de salmuera utilizada para el análisis por técnicas analíticas fue en una muestra de salmuera previamente tratada con HNO_3 (digestión ácida a $70^{\circ}C$).

Precipitación

El hidróxido de magnesio se obtuvo a partir de la salmuera residual (SR) proveniente de Uyuni, utilizando el método de conductividad eléctrica que fue desarrollado por Qihua Yuan el 2015, filtrando 100 mL de muestra (SR) y preparando 250 mL de solución de NaOH a 0,2 M. La mezcla se realizó por goteo del NaOH desde una bureta a una velocidad constante de 4,2 mL/min durante 60 min manteniendo constante la velocidad de agitación a 350 rpm (ver Figura 1). Durante este tiempo se midió la conductividad ($\mu S\text{cm}^{-1}$), el pH y se tomaron alícuotas de 1 mL de la solución madre, estas mediciones fueron realizadas a intervalos de 10 min, realizando 4 series de experimentos a diferentes temperaturas (288,15 K; 298,15 K; 308,15 K y 328,15 K). La solución se deja en reposo por 24 h y posteriormente el precipitado se separa por filtración.

El precipitado obtenido fue lavado con agua destilada para eliminar las impurezas, luego fue secado en una estufa a $110^{\circ}C$ por un tiempo de 3 h. Las concentraciones de los iones de Mg y OH se determinaron por análisis químico de volumetría de EDTA y ácido-base respectivamente utilizando las alícuotas obtenidas.

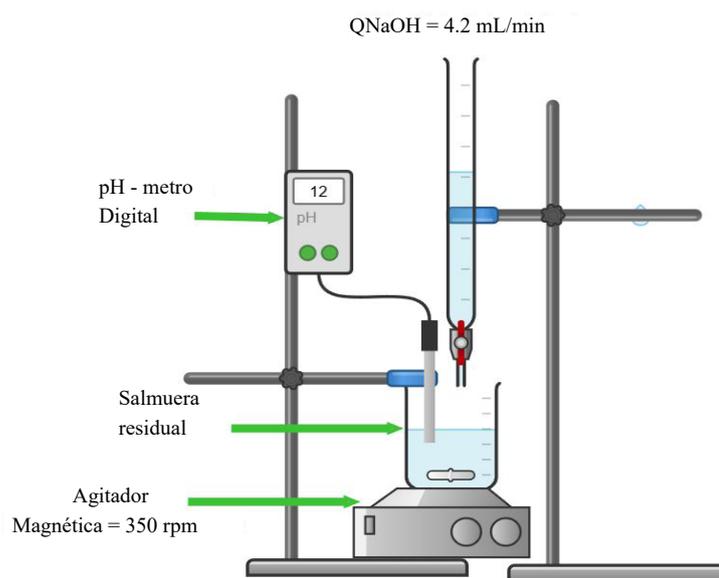


Figura 1. Esquema de la precipitación del $Mg(OH)_2$.

Caracterización del precipitado obtenido

La caracterización del precipitado obtenido seco se realizó por microscopía electrónica de barrido (MEB), difracción de rayos X (DRX) y termogravimetría (TG). Para observar la morfología en el MEB se utilizó 10 mg aproximadamente de muestra seca variando la configuración de la tensión de aceleración según la magnificación en un rango de 5 μm a 10 μm . Posteriormente se utilizó entre 10 a 20 mg de muestra seca para el análisis TG la misma que fue calentada desde la temperatura ambiente de 20°C a 650°C, con una velocidad de calentamiento 10°C/min. El análisis DRX se realizó utilizando una cantidad aproximada de 100 mg de muestra seca, con una configuración de una radiación de $\text{CuK}\alpha$ 1,5418 Å, operado a un voltaje de 40 kV y corriente de 35 mA, los difractogramas de las muestras fueron obtenidos en el rango de 2θ entre 5° y 50°, con un paso de 0,02°.

3. Resultados y discusión

Caracterización morfológica y química de la salmuera residual de Uyuni

Se realizó el análisis morfológico y elemental de la muestra de salmuera residual por microscopía electrónica de barrido, técnicas volumétricas, gravimetría y fotometría de llama para la identificación de los iones presentes. En la figura 2 se observa la morfología típica del MgCl_2 , identificándose la formación superficial de estructuras cristalinas en forma hexagonal con una magnificación de 10 μm .

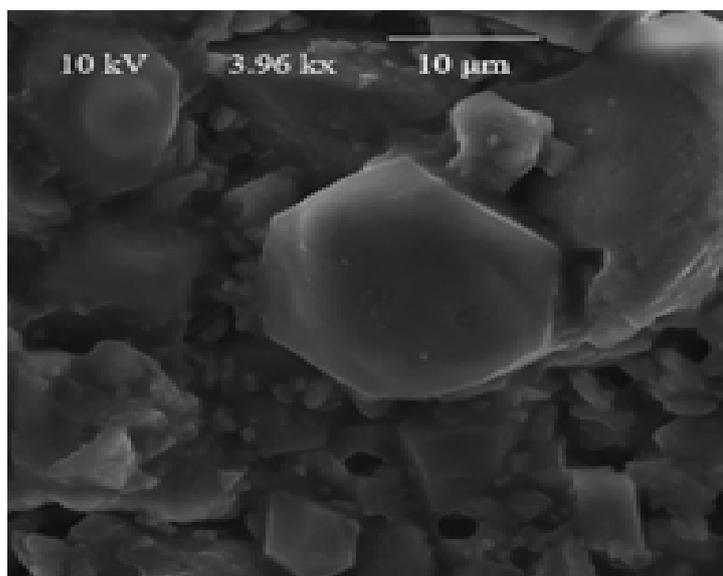


Figura 2. Micrografía de la salmuera residual de Uyuni.

La tabla 1, muestra la composición química de la salmuera residual de Uyuni expresada en porcentaje en peso. Los resultados fueron obtenidos por técnicas de volumetría de EDTA para los iones de magnesio y calcio, método de Mohr para el ion cloro, método gravimétrico para el sulfato y fotometría de llama para los iones sodio, litio y potasio.

Tabla 1

Composición química de la salmuera residual de Uyuni expresados en porcentajes (%p/ 'lp)

Elemento	Porcentaje en peso (%p/p)
Magnesio	12,2
Cloruro	45,3
Sulfatos	0,4
Sodio	0,7
Potasio	0,6
Litio	0,04
Calcio	0,09

Según los resultados de la tabla 1, se encuentra la presencia de bischofita en la salmuera residual de Uyuni en forma de $MgCl_2$, con impurezas de sulfatos, potasio, litio y calcio en concentraciones bajas que se eliminan a través de lavados con agua destilada en el proceso de filtración del $Mg(OH)_2$ (Qiuhua Yuan, 2015).

Valores de sobresaturación y tiempos de inducción

En la tabla 2 se muestran las condiciones experimentales y resultados de los valores de sobresaturación y tiempos de inducción determinados a diferentes temperaturas.

La sobresaturación relativa (S) se calculó utilizando la ecuación 1.

$$S = \frac{[Mg^{2+}] [OH^-]^2 - Kps}{Kps} \quad (1)$$

Donde, Kps es el producto de solubilidad del $Mg(OH)_2$ en función de la temperatura, concentración del magnesio $[Mg^{2+}]$ y Concentración del hidroxilo $[OH^-]$. Se observa que la S disminuye con el aumento del tiempo durante la precipitación del $Mg(OH)_2$, debido a que la concentración del ion magnesio disminuye en la solución y aumenta la concentración de ion hidroxilo. Así mismo, la S es menor a una temperatura de 318,15 K y aumenta a una temperatura de 288,15 K.

Los resultados del tiempo de inducción (t_{ind}), (ver tabla 2) fueron calculados utilizando la ecuación 2.

$$\ln t_{ind} = \frac{\beta \gamma_s^3 V_m^2 N_A f(\theta)}{(RT)^3} \left(\frac{1}{\ln S} \right)^2 + \ln A \quad (2)$$

Donde, β es la constante geométrica de los cristales ($16\pi/3$), γ_s es la energía de superficie de nucleación, V_m es el volumen del cristal, N_A constante del número de Avogadro, $f(\theta)$ orden de la nucleación homogénea, R la constante de los gases (8,314 J/mol K), T es la temperatura de la solución, S la sobresaturación relativa y A es una constante bajo condiciones típicas. En el cálculo del tiempo de inducción, se utilizaron los valores de la conductividad y de la sobresaturación relativa, obtenidos experimentalmente a las diferentes temperaturas. Los demás valores requeridos para la evaluación del tiempo de inducción según la ecuación 2 se obtuvieron de la literatura (Yuan, 2015).

Tabla 2

Condiciones experimentales, valores de sobresaturación relativa y tiempos de inducción

Serie	Temperatura (K)	Kps	Mg ²⁺ /10 ² (mol/L)	OH ⁻ /10 ² (mol/L)	S	T _{ind} (1/s)
A1			7,84097	0,0002511	5935,0	758
A2			5,84229	0,0039	7940,0	512
A3	288,15	6,53 x 10 ⁻¹³	3,84361	0,015	5082,1	217
A4			2,30615	1,00	814,0	156
A5			1,99456	1,60	621,2	76
A6			1,69117	3,09	418,0	59
B1			6,76473	0,00036	2607,0	618
B2			5,38107	0,063	1175,7	302
B3	298,15	5,61 x 10 ⁻¹²	2,45990	0,50	1365,8	264
B4			1,96790	1,00	1278,3	136
B5			1,78341	1,55	733,6	56
B6			1,47595	3,80	343,3	28
C1			6,1878	0,000038	2607,0	257
C2			5,01209	0,063	2046,5	170
C3	308,15	8,48 x 10 ⁻¹¹	2,15242	0,050	948,3	61
C4			1,75268	1,02	797,5	46
C5			1,59893	1,56	772,6	24
C6			1,38370	3,90	343,3	18
D1			5,99605	0,00039	1000,2	159
D2			4,98132	0,063	957,2	103
D3	318,15	3,33 x 10 ⁻¹¹	2,15242	0,07	376,0	75
D4			1,62966	3,90	265,2	38
D5			1,53742	5,00	170,5	22
D6			1,35293	5,00	137,4	10

La figura 3, muestra los variabilidad de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) durante el proceso de la formación del $\text{Mg}(\text{OH})_2$ en función del tiempo de precipitación en minutos a las 4 temperaturas estudiadas.

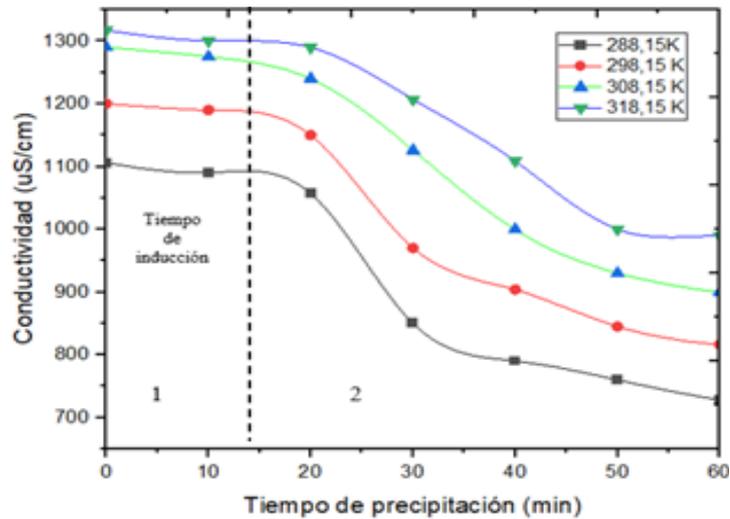


Figura 3. Variación de la conductividad eléctrica con respecto al tiempo de precipitación a diferentes temperaturas.

En la figura 3 se observa la variación de la conductividad que está en función del tiempo de precipitación y la temperatura, con el aumento de temperatura incrementa la conductividad eléctrica por la interacción de los iones. Durante los primeros minutos se presenta una mayor conductividad la que es considerada como la etapa de la nucleación (etapa 1) y con el aumento del tiempo de precipitación la conductividad disminuye por la formación de los cristales de $\text{Mg}(\text{OH})_2$, esto es denominado la etapa de crecimiento cristalino (etapa 2).

Tasa de nucleación y tasa de crecimiento cristalino

Se calculó la tasa de nucleación (K_1) y la tasa de crecimiento cristalino (K_2) utilizando la concentración del magnesio de la tabla 2 en función del tiempo, relacionando estos datos con la ecuación (3) y (6).

$$J = A \exp \left[-\frac{\beta \gamma_s^3 V_m^2 N_A f(\theta)}{(RT)^3 (\ln S)^2} \right] \quad (3)$$

Dónde: A es la constante típica de las condiciones, β es la geometría constante ($16\pi/3$), V_m volumen molar ($V_m = 24,7 \text{ cm}^3/\text{mol}$) del $\text{Mg}(\text{OH})_2$, N_A es el número de Avogadro, $f(\theta)$ es el coeficiente de la reacción uno, R constante de los gases, T la temperatura de la solución y S la sobresaturación relativa.

La ecuación 4 muestra la relación la concentración del magnesio con respecto al tiempo. Tomando el valor de primer orden para el exponente y para el valor específico de A usamos la condición inicial $C(t_0)=C_0$.

$$\frac{dm}{dt} = k_o A (C - C_0)^i \quad (4)$$

Para la ecuación integrada se toma el limite inicial de la concentración, indicada en la ecuación 5:

$$C=C_0 e^{-kt} \quad (5)$$

Que en forma logarítmica es:

$$\ln C = \ln C_0 - kt \quad (6)$$

La figura 4, muestra el comportamiento de la primera etapa de precipitación, donde se determina K_1 a través de la pendiente linealizada de la ecuación (6), donde a los 288,15 K la nucleación se observó en la etapa inicial de 0 a 13 min, a 298,15 K ocurrió de 0 hasta los 10 min, a 308,15 K de 0 hasta los 7 min y por último a 318,15 K la nucleación se produjo de 0 a los 5 min.

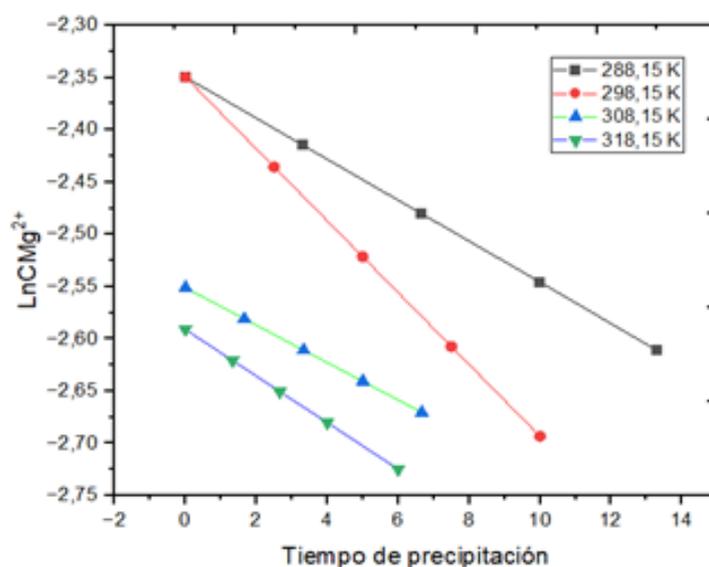


Figura 4. Ajuste lineal de la tasa de nucleación a distintas temperaturas del $\ln CMg^{2+}$ vs. el tiempo de precipitación en min.

La tabla 3, detalla los resultados de la tasa de nucleación y el coeficiente de correlación para las 4 series a diferentes temperaturas.

Tabla 3

Resultados de la tasa de nucleación de orden 1 a distintas temperaturas

	288,15 K	298,15 K	308,15 K	318,15 K
Pendiente	1,7294	2,0761	2,551	2,5911
R²	0,9778	1	1	0,9759
K₁/10⁻³ (s⁻¹)	0,507	1,552	2,172	2,545

Según los resultados de la tabla 3 se interpreta que a una temperatura de 288,15 K la tasa de nucleación es baja indicando que hay una disminución de la probabilidad de colisiones efectivas y un aumento en el tamaño de los cristales de $Mg(OH)_2$. Por otro lado, con el aumento de la temperaturas hasta los 318,15 K, las moléculas tienen mayor frecuencia de colisiones aumentando la formación de núcleos en la precipitación generando que la tasa de nucleación sea más rápida y los precipitados sean de menor tamaño.

La figura 5, muestra el comportamiento durante la segunda fase del proceso de precipitación, a través de la linealización de la ecuación (6) se calculó K_2 por medio de la pendiente. Donde, a los 288,15 K la cristalización ocurre desde los 11 a los 51 min, a 298,15 K de los 9 hasta los 45 min, a 308,15 K de 8 hasta los 41 min y por último a 318,15 K la nucleación se produjo de 6 a los 33 min. En dicha figura, se observa la variación de la concentración del Mg^{2+} en la solución representada a escala logarítmica ($LnCMg^{2+}$) con respecto al tiempo de precipitación (min).

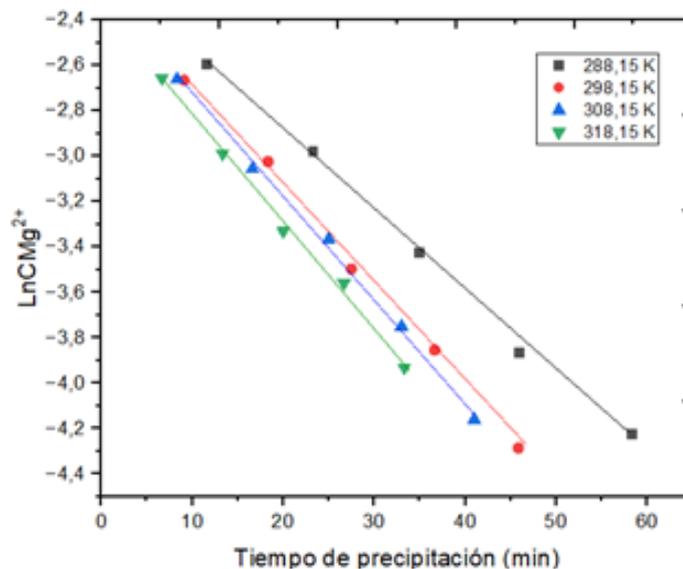


Figura 5. Ajuste lineal de la tasa de crecimiento cristalino a distintas temperaturas de la variación de la concentración del $LnCMg^{2+}$ vs. el tiempo de precipitación.

La tabla 4, muestra los resultados de la velocidad de formación de los núcleos cristalinos en la precipitación donde a temperaturas de 288,15 K se tiene un mayor tiempo de formación de cristales por unidad de segundo y a los 318,15 K la formación de los núcleos cristalinos se forma más rápido por la interacción de las moléculas en la solución, lo que nos permite predecir que a temperaturas elevadas se puede obtener una distribución de precipitados más uniforme y de menor tamaño.

Tabla 4

Resultados de la tasa de crecimiento cristalino de orden 1 a distintas temperaturas

	288,15 K	298,15 K	308,15 K	318,15 K
Pendiente	2,2261	2,3318	2,3467	2,3478
R²	0,9759	0,9169	0,9771	0,9958
$K_2/10^{-4}$ (s⁻¹)	0,945	3,602	6,754	6,765

Caracterización del precipitado $Mg(OH)_2$ por microscopía electrónica de barrido

En la figura 6, se muestran las micrografías MEB de los precipitados obtenidos a las 4 temperaturas estudiadas.

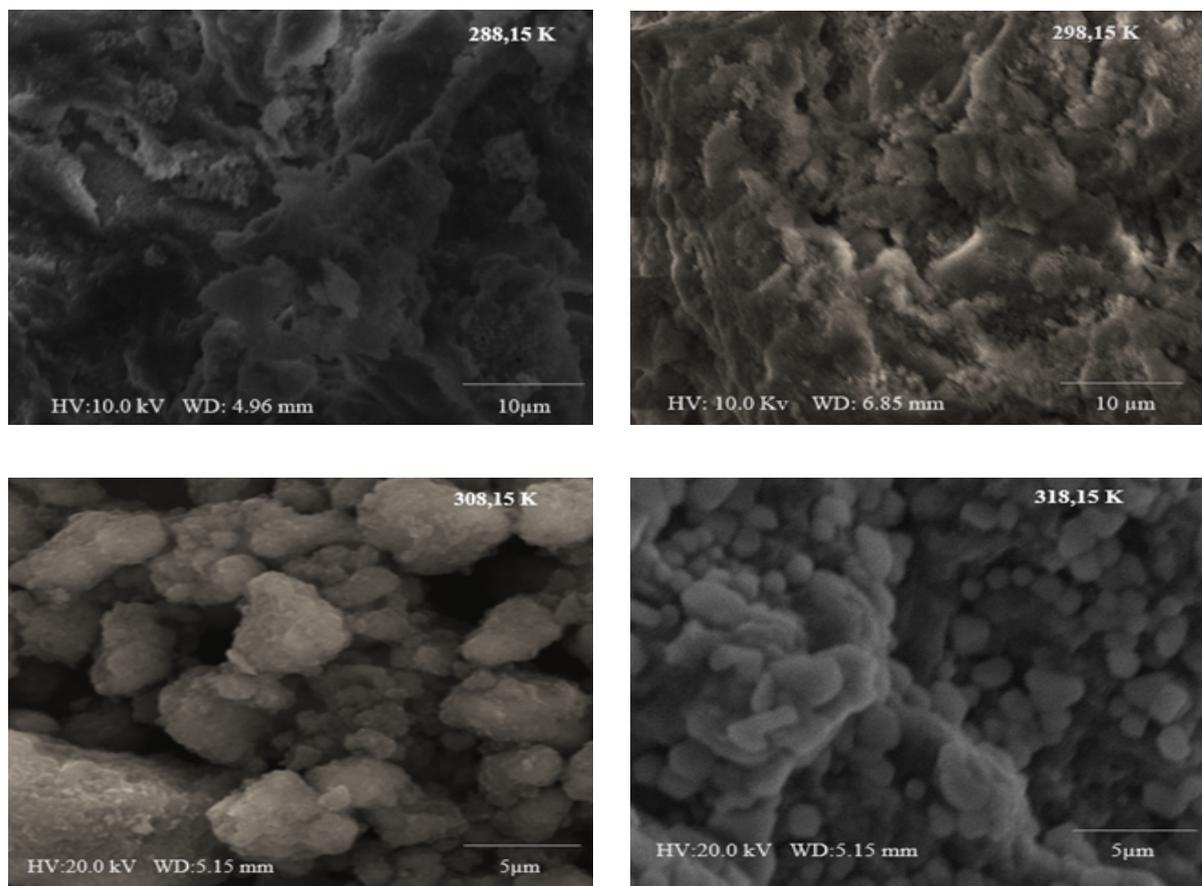


Figura 6. Micrografías del precipitado de $Mg(OH)_2$ a diferentes temperaturas.

Las micrografías del precipitado de $Mg(OH)_2$ a las temperaturas de 288,15 K y 298,15 K revelan partículas con una morfología escamosa y una disposición en la que se superponen unas sobre otras, formando estructuras apiladas de mayor tamaño. En cambio, a los 308,15 K se observa una morfología de partículas escamosas que se empiezan a dispersar con una distribución discreta y a los 318,15 K se observa la morfología del precipitado dispersos que son de menor tamaño de partículas y se encuentran de manera individual.

Caracterización por difracción de rayos X de los precipitados

Los difractogramas obtenidos por el análisis de difracción de rayos X de los precipitados a las temperaturas estudiadas se observan en la figura 7. Las intensidades de los picos y sus correspondientes ángulos de posición 2θ coinciden con la estructura hexagonal del $Mg(OH)_2$, lo cual fue corroborado por estudios reportados en la literatura (Chen, et Al., 2015).

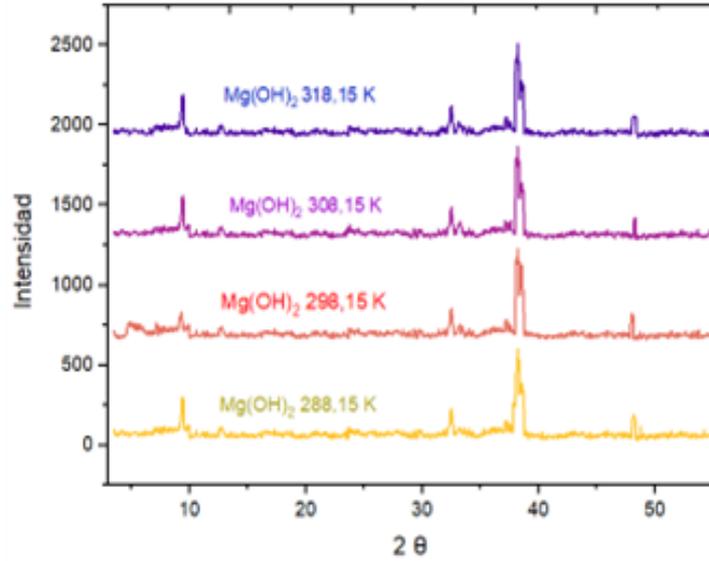


Figura 7. Espectro de difracción de rayos X de las muestras correspondiente a temperaturas de precipitación de 288,15 K, 298,15 K, 308,15 K y 328,15 K.

Caracterización por termogravimetría TG del precipitado a los 308,15 K

En la figura 8, se observa el termograma (TG) del precipitado Mg(OH)₂ obtenido a 308,15 K. El análisis fue realizado desde temperatura ambiente hasta los 650°C en atmosfera oxidante. Se observa una pérdida de peso del 23,5% desde 320°C a 420°C que corresponde a la pérdida del hidroxilo del Mg(OH)₂ convirtiéndose en MgO como producto de la descomposición. Esta descomposición del Mg(OH)₂ está dentro del rango de temperatura reportado en la literatura (Yang, 2017).

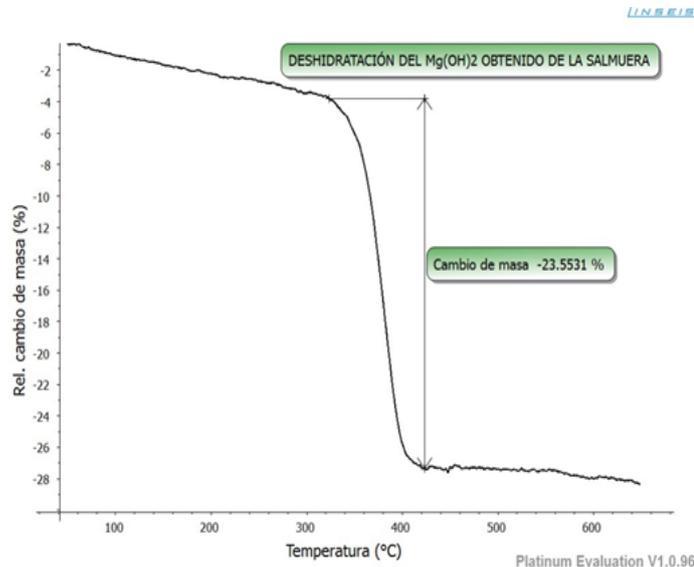


Figura 8. Termograma TG del precipitado de Mg(OH)₂, obtenido a 308,15 K.

4. Conclusiones

El estudio demostró que la salmuera residual de la planta de YLB contiene un 12,2% de magnesio y un 45,3% de cloruros como principales elementos, cuya composición corresponde estequiométricamente a $MgCl_2$. La misma que se utilizó para el estudio de la cinética de precipitación del hidróxido de magnesio, prediciendo la influencia de la temperatura de precipitación, determinando las constantes de K_1 y K_2 . A los 288,15 K se obtuvo un K_1 de $5,073 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ y K_2 de $9,45 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, indicando una formación lenta de núcleos cristalinos debido a la baja interacción de moléculas de magnesio e hidróxido. A los 318,15 K la constante K_1 fue de $2,545 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ y el K_2 de $6,765 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, concluyendo que con el aumento de la temperatura los núcleos cristalinos tienden a dispersarse obteniéndose un tamaño de partícula uniforme.

Agradecimientos

Agradecemos al Laboratorio de No Metálicos con financiamiento de la cooperación sueca ASDI UMSS, por permitimos realizar el presente trabajo de investigación y al laboratorio de Microscopia del Departamento de Física por la colaboración con el uso del Microscopio Electronico de Barrido.

5. Referencias bibliográficas

- A.F. Mohammad, M. E.-N.-M. (2019). Optimization of magnesium recovery from reject brine for reuse in desalination post-treatment. *ELSEVIER*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100810>
- Danilo Fontana, Federica Forte, Massimiliana Pietrantonio, Stefano Pucciarmati y Caterina Marcoldi. (2022). Magnesium recovery from seawater desalination brines: a technical review. *SPRINGER LINK*. doi:<https://doi.org/10.1007/s10668-022-02663-2>
- Gnot, M. T. (1995). Precipitation of Magnesium Hydroxide from Brine. *Institute og Inorganic Chemistry and Thecnology*, 244-250. doi:<https://doi.org/1.1021/ie00040a025>
- Jelena Jakić, Miće Jakić, Miroslav Labor. (2020). Thermokinetic study of magnesium hydroxide obtained from seawater. *researchgate*, 2099-2110.10. doi:<https://doi.org/1007/s10973-020-10256-2>
- Lijuan Lu, Quanxian Hua, Jianwei Tang, Yong Liu, Li Liu, and Boaming Wang. (2018). Reactive Crystallization Kinetics of Magnesium Hydroxide. *Crystallization Kinetics*, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.06.048>
- Mayor, B. (2019). Growth patterns in mature desalination technologies and analogies with the. *ELSEVIER*, 75-84. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.01.029>
- Qihua Yuan, Zhengwu Lu, Peixin Zhang, Xiongbiao Luo, Xiangzhong Ren, Teresa D. Golden. (2015). Study of the synthesis and crystallization kinetics of magnesium hydroxide. *ELSEVIER*, 734-742. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.06.048>
- Romina Lucrecia Lopez ´ Steinmetz, S. S. (2021). Brine grades in Andean salars: When basin size matters A review of the Lithium Triangle. *ELSEVIER*, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103615>
- S.H. Chu, E.H. Yang y C. Unluer. (2023). Chemical synthesis of magnesium oxide (MgO) from brine towards minimal energy consumption. *ScienDirect*. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116594>
- Wei Yang, Z. Z. (2017). Characterizations of the thermal decomposition of nano-magnesium hydroxide by positron annihilation lifetime spectroscopy. *Sciencedirect*, 206-212. doi:<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.059>