



# ESTUDIO BÁSICO PARA LA OBTENCIÓN DE ÁCIDO BÓRICO A PARTIR DE LA ULEXITA Y DIÓXIDO DE CARBONO

*Roberto Parra Zeballos,\* Marcela Ariana Morales Viraca*

Instituto de Investigación en Desarrollo de Procesos Químicos, IIDEPROQ, Carrera de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Mayor de San Andrés, Plaza del Obelisco, La Paz, Bolivia

Keywords: *Ácido bórico, ulexita*

## ABSTRACT

This research is aimed for obtaining boric acid by reaction between ulexite and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), replacing the traditionally used sulfuric acid. The carbon dioxide when dissolved in water produces carbonic acid which reacts with the ulexite affording boric acid. This research was carried out at the laboratory, a way to validate the technical feasibility of the proposed method and to obtain a physicochemical design, equilibrium and reaction data.

\*Corresponding author: [rob\\_parra@hotmail.com](mailto:rob_parra@hotmail.com)

## RESUMEN

En este trabajo de investigación se propone obtener ácido bórico, por reacción entre la ulexita y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), en sustitución del ácido sulfúrico, tradicionalmente empleado. El dióxido de carbono al ser disuelto en agua genera ácido carbónico que reacciona con la ulexita produciendo ácido bórico. Esta investigación se llevó a cabo a nivel laboratorio, a manera de validar la viabilidad técnica del método propuesto y obtener datos de diseño físico-químicos, de equilibrio y de reacción.

## INTRODUCCION

El salar de Uyuni es el mayor desierto de sal continuo del mundo, con una superficie de 12 000 km<sup>2</sup>. Está situado a unos 3 650 msnm en el suroeste de Bolivia, en el departamento de Potosí dentro de la región altiplánica de la Cordillera de los Andes. El salar de Uyuni no sólo se constituye en una de las mayores reservas de litio en el mundo, sino que también cuenta con importantes cantidades de potasio, boro y magnesio, tal es así que en la salmuera se estima una reserva de 7,7 millones de TM de boro, con una concentración media de 466 mg/l [1] [13],

Sin embargo, el boro no solamente se encuentra en la salmuera del salar de Uyuni, sino también en el borde de la costra del salar, como ulexita –borato de sodio y calcio- en forma lenticular horizontal, superpuesta alternativamente a arcillas intermedias, dispuesta en capas de 50 a 300 m de diámetro y de 3 a 100 cm de espesor [10] [11].

Las reservas de boratos ubicadas en Río Grande, Challviri, Capina, Pastos Grandes y Laguani (sud-oeste potosino) que pueden ser explotables en condiciones económicamente favorables ascienden a 16 millones de TM de ulexita [3].

En resumen, de los dos tipos de fuentes de boro encontrados en nuestro país, las mayores cantidades de boro se encuentra en la costra salina del salar de Uyuni (7,7 millones de TM de boro). El boro que contiene la ulexita (2,2 millones de TM de boro) representa sólo el 22,22 % de las reservas encontradas en Bolivia.

Sin embargo, el mineral ulexita tiene una ley en boro de 13,34 % en peso, a diferencia del boro disuelto en la salmuera del Salar de Uyuni de apenas 0,05 %. Entonces, la ulexita por su alto contenido en boro es un mineral cuya explotación, beneficio e industrialización es de primerísima importancia para el país.

Aunque la ulexita ( $\text{Na}_2\text{CaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ) tiene uso aprovechable en estado natural, este presenta inconvenientes debido a las impurezas que tiene, por lo que para poder usarlo en condiciones de mayor calidad es necesario convertirlo en ácido bórico u otro derivado de mayor valor agregado.

El ácido bórico es un compuesto químico que contiene boro, hidrógeno y oxígeno. Es un ácido débil. Existe en forma de cristales incoloros o de polvo blanco y es soluble en agua. Es un producto de boro comercialmente importante empleado frecuentemente como antiséptico, insecticida, producto ignífugo y conservante alimentario. También se emplea en adhesivos, detergentes, en la fabricación de cristal y papel [9].



El método tradicional para la obtención del ácido bórico a partir de ulexita es mediante el uso del ácido sulfúrico, según la siguiente reacción:



En nuestro país, el problema de esta metodología es el uso del ácido sulfúrico, que es sustancia controlada según la LEY DEL RÉGIMEN DE LA COCA Y SUSTANCIAS CONTROLADAS [5] ya que este sirve como precursor para la elaboración de cocaína. Esta Ley en su artículo 18° indica:

“La importación, exportación, elaboración y comercialización de sustancias químicas de uso industrial enumeradas en la lista V del anexo de la ley 1008 y las que se agreguen posteriormente, serán autorizadas, fiscalizadas y controladas por los organismos técnicos del Consejo Nacional Contra el uso indebido y tráfico ilícito de drogas”. La adquisición y uso del ácido sulfúrico implica gran cantidad de controles y los trámites correspondientes se tornan perjudiciales para empresas productivas que usan este reactivo, con el supuesto preliminar de funcionarios gubernamentales, de que pueden ser desviados al narcotráfico y quién use este reactivo químico, según la Ley 1008, presumiblemente es culpable de narcotráfico y tiene que demostrar lo contrario. Además, de perjudicar al desarrollo industrial, este hecho ocasiona una distorsión de precios del ácido sulfúrico en nuestro país, elevándolo respecto a los precios internacionales. Por lo mencionado anteriormente, se puede apreciar que el uso industrial de ácido sulfúrico se torna complicado; además, conlleva una serie de controles periódicos para demostrar que no se desvíe este ácido al narcotráfico, lo que provoca que la industria en nuestro país se vea limitada y perjudicada en el uso libre del ácido sulfúrico. De esta manera nace la necesidad de buscar nuevas alternativas tecnológicas para reemplazar el uso del ácido sulfúrico en la fabricación de ácido bórico, en condiciones ventajosas, obteniendo buenos rendimientos.

El dióxido de carbono al ser disuelto en agua genera ácido carbónico que reacciona con la ulexita y se produce ácido bórico [8], de manera paralela se obtiene carbonato de calcio, carbonato de sodio y agua. Las reacciones químicas que se llevan a cabo son las siguientes:



Luego de la reacción química, el ácido bórico se purifica por cristalización, centrifuga, lava y finalmente se seca [9]. La variación de energía libre es el término de mayor importancia termodinámica en una reacción, hasta tal punto que sólo puede ocurrir si dicha variación de energía libre es negativa, es decir, si en las condiciones predominantes los productos de la reacción tienen menor energía libre que los reactivos [4].

$$\Delta G_r^\circ = \sum \Delta G_f^\circ \text{ productos} - \sum \Delta G_f^\circ \text{ reactivos} \quad (4)$$

Aplicada a este caso se tiene:

$$\Delta G_r^\circ = 10(\Delta G_{\text{H}_3\text{BO}_3}^\circ) + 2(\Delta G_{\text{CaCO}_3}^\circ) + (\Delta G_{\text{Na}_2\text{CO}_3}^\circ) + 4(\Delta G_{\text{H}_2\text{O}}^\circ) - 2(\Delta G_{\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}}^\circ) - 3(\Delta G_{\text{H}_2\text{CO}_3}^\circ) \quad (5)$$

Los datos termodinámicos se muestran en la tabla 1 [12]:



Tabla 1.- Propiedades termodinámicas a 298,15 K

COMPUESTO	$\Delta G_r^\circ$ $\left[ \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \right]$
Na Ca B <sub>5</sub> O <sub>9</sub> 8H <sub>2</sub> O	-1318,50
H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-149,00
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	-231,60
CaCO <sub>3</sub>	-269,78
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-250,40
H <sub>2</sub> O	-56,69

Reemplazando en la ecuación (5) se obtiene:

$$\Delta G_r^\circ = -248,72 \text{ [Kcal/mol]} \quad (6)$$

Entonces, a 25 °C se tiene una energía libre negativa y el proceso transcurre de manera espontánea hacia el equilibrio. En esta reacción química, el gas reactivo (CO<sub>2</sub>) se burbujea a través de una solución que contienen partículas de sólido suspendidas, es decir, intervienen 3 fases: líquida, sólida y gaseosa, por lo que es una reacción heterogénea que transcurre según las siguientes etapas [4]:

- Etapas 1: Absorción con reacción química (según ecuación 2) de la fase gaseosa a la fase líquida en la superficie de la burbuja, depende de la concentración del gas, del tamaño de la burbuja (agitación) y de la temperatura.
- Etapas 2: Difusión en la fase líquida desde la superficie de la burbuja hacia el seno del líquido, está influenciada por la temperatura, concentración de H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> en el líquido y agitación.
- Etapas 3: Difusión del seno del líquido hasta la superficie externa de la partícula sólida, la velocidad de transferencia de masa del gas desde el seno de la solución hasta la superficie externa de la partícula sólida está determinada por la temperatura, el área superficial externa de las partículas de ulexita, la concentración másica de la partícula sólida y la concentración del gas en la superficie externa de la partícula.
- Etapas 4: Reacción dentro de la partícula sólida, en esta reacción la fase líquida se puede considerar que la solución de H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> es pura, y se encuentra en exceso, por tanto se puede decir que su concentración se mantiene constante en un tiempo moderado. Pudiendo expresar la ley de velocidad de primer orden con respecto al ácido carbónico. Entonces, la reacción en la partícula depende del tamaño de la ulexita, de la concentración del ácido carbónico y de la temperatura.
- Etapas 5: Difusión interna del reactivo y productos en la partícula sólida, es dependiente de la temperatura, de la concentración de H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> y tamaño de la partícula.

De acuerdo a lo anterior, cada paso puede verse como una resistencia para la velocidad de reacción global. El paso más lento se constituye la etapa de control.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los límites de las variables que se estudiaron en el diseño factorial son los de la Tabla 3. En la tabla 4 se muestra el análisis de varianza (ANOVA) [7], es decir la evaluación estadística del grado de significancia de cada factor y las interrelaciones entre los mismos, con un determinado nivel de confianza, para la concentración final de ácido bórico en la solución.



**Tabla 3.- Límites de variables en la reacción para diseño factorial**

Variable	Unidad	Límite inferior	Punto central	Límite superior
Temperatura (T)	°C	20	40	60
Flujo de CO <sub>2</sub> (F <sub>CO2</sub> )	L/min	0,1	0,8	1,5
Relación sólido-líquido (Ra)	g ulexita/mL agua	0,03	0,09	0,15
Tamaño de grano (Tam)	mm	0,212	0,7	1,180
Agitación (Ag)	Rpm	400	600	800

En la tabla 4 se muestra el análisis de varianza (ANOVA) [7], es decir la evaluación estadística del grado de significancia de cada factor y las interrelaciones entre los mismos, con un determinado nivel de confianza, para la concentración final de ácido bórico en la solución.

**Tabla 4.- Análisis ANOVA para la concentración**

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	8187.94	14	584.85	432.33	< 0.0001	significant
A-temp	1838.91	1	1838.91	1359.33	< 0.0001	
B-F CO2	1524.62	1	1524.62	1127.01	< 0.0001	
C-Ra	2872.82	1	2872.82	2123.61	< 0.0001	
D-Tam	0.20	1	0.20	0.15	0.7058	
E-Agitacion	0.90	1	0.90	0.67	0.4232	
AB	91.60	1	91.60	67.71	< 0.0001	
AC	671.79	1	671.79	496.59	< 0.0001	
AD	4.79	1	4.79	3.54	0.0745	
BC	533.34	1	533.34	394.25	< 0.0001	
BD	0.92	1	0.92	0.68	0.4181	
BE	1.52	1	1.52	1.13	0.3014	
CD	0.24	1	0.24	0.18	0.6793	
CE	3.85	1	3.85	2.85	0.1071	
DE	642.43	1	642.43	0.89	0.3501	
Curvature	1053.28	1	1053.28	778.59	< 0.0001	significant

Los factores más significantes son **relación sólido - líquido, temperatura, flujo de gas carbónico y su interrelación** (F value =0,0001<0,05). El valor de "Curvature F-value" de 778,59 implica que existe una curvatura significativa, por tanto no se sigue un comportamiento lineal.

Una interacción se da cuando uno de los factores no produce el mismo efecto en la respuesta con niveles diferentes de otro factor. Las interacciones de mayor importancia son temperatura-flujo de gas, temperatura-relación sólido líquido, flujo de gas y relación sólido líquido. A mayor flujo de gas y mayor temperatura se obtienen altas concentracion de ácido bórico, teniendo resultados óptimos a 60 °C y un flujo de CO<sub>2</sub> de 1,5 L/min. Un mismo comportamiento se puede observar en la interacción de relación sólido líquido-temperatura. Mientras que para la interacción tamaño de grano-temperatura se tiene que el tamaño de grano no influye en la reacción puesto que se obtienen resultados parecidos a cualquier tamaño de grano. Normalmente en toda reacción química la velocidad de reacción aumenta con la disminución del tamaño de grano. Esto no se ve en el presente estudio debido a que la ulexita por sus mismas características se disgrega muy fácilmente. De igual manera, se aprecia que la agitación no influye en la reacción. Si bien se trabajo en un amplio rango sobre el flujo de gas carbónico, y a mayor flujo mayor concentracion final, a partir de cierto flujo se forma una determinada cantidad de ácido carbónico necesario para que



la reacción se lleve a cabo, llegándose a saturar la solución con el gas y el resto de gas carbónico alimentado en exceso deja la solución.

Se realiza una evaluación del rendimiento de la reacción química referido a la cantidad de ácido bórico que debería obtenerse por estequiometría teóricamente, y la obtenida realmente en la práctica.

Estudiando la contribución de las variables sobre el rendimiento, se observa el mismo comportamiento que el visto en la concentración. El grado de significancia de las variables están calculadas en la tabla 5.

**Tabla 5.- Análisis ANOVA para el rendimiento**

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value	Prob > F
Model	26647.46	10	2664.75	86.63	< 0.0001	significant
A-temp	4844.97	1	4844.97	157.50	< 0.0001	
B-F CO2	4134.36	1	4134.36	134.40	< 0.0001	
C-Ra	14951.96	1	14951.96	486.06	< 0.0001	
D-Tam	0.11	1	0.11	3.477E-003	0.9535	
E-Agitacion	0.94	1	0.94	0.031	0.8626	
AD	13.82	1	13.82	0.45	0.5091	
BD	29.51	1	29.51	0.96	0.3371	
CD	0.27	1	0.27	8.721E-003	0.9264	
CE	13.04	1	13.04	0.42	0.5211	
DE	2658.48	1	2658.48	8.42	0.0204	
Curvature	477.89	1	477.89	15.54	0.0006	significant

Por tanto los factores más significantes son relación sólido - líquido, temperatura, flujo de gas carbónico.

Si bien para obtener una alta concentración se necesita altos valores de relación sólido líquido, como altos valores de temperatura, no ocurre lo mismo respecto al rendimiento, ya que para este mientras menor sea la cantidad de ulexita alimentada más nos acercamos al comportamiento ideal, la temperatura de igual manera favorece el rendimiento, por tanto para cumplir con los requisitos de una alta concentración se debe trabajar a una temperatura elevada, y una relación sólido—líquido intermedia. Se concluye que las mejores condiciones de trabajo son:

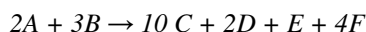
$$T = 75^{\circ}\text{C}, \text{ Flujo } \text{CO}_2 = 0,25\text{L}/\text{min} \text{ y } \text{Ra} = 0,20 \text{ g}/\text{mL}$$

Siendo la agitación y tamaño de grano factores no muy influyentes.

En una reacción heterogénea se deberá de tener en cuenta el transporte de materia entre fases. Se distinguen tres etapas principales: difusión externa, difusión interna y reacción química. La difusión externa es principalmente función de la agitación y la difusión interna es función del diámetro de la partícula. Mediante el estudio del diseño factorial se determino que los factores que no influyen de manera significativa sobre la reacción química son tamaño de partícula y agitación, entonces en la reacción que se estudia no predomina la transferencia de masa sino la reacción química [4]. Al ser la reacción química la etapa que controla el proceso, se establecerá la expresión de velocidad en función de la concentración final de ácido bórico obtenida y de la temperatura a la cual se lleva a cabo la reacción.

Entonces, trabajando en las condiciones óptimas de reacción se realiza el estudio cinético mediante una variación de temperatura (ver tabla 6).

Se observa claramente que la reacción acelera a medida que la temperatura incrementa. El equivalente a la reacción en estudio es:



Si la velocidad de reacción, la expresamos en función del ácido bórico (c) se tiene:

$$r_c = \frac{dC_c}{dt} = k \cdot C_A^2 \quad (7)$$



**Tabla 6.- Variación de la concentración de ácido bórico a diferentes temperaturas (mol/L)**

TIEMPO	Temperatura			
	30 °C	45 °C	60 °C	75 °C
0	0	0	0	0
30	0,216	0,513	0,561	0,577
60	0,332	0,641	0,839	0,903
90	0,420	0,728	0,957	0,990
120	0,524	0,757	1,022	1,054
150	0,553	0,787	1,070	1,078
180	0,565	0,816	1,087	1,113

La anterior expresión no se encuentra en función del ácido carbónico ya que como este es el reactivo en exceso, su concentración se mantiene constante o con una variación mínima a lo largo del tiempo.

Usando la expresión de Arrhenius para la constante cinética, expresando la concentración de A en función de C, logaritimizando y linealizando la ley de la velocidad [4]:

$$\ln\left(\frac{dC_c}{dt}\right) = \ln K_c - \frac{E_a}{R \cdot T} + \alpha \ln\left(C_{A_0} - \frac{1}{10} \cdot C_c\right) \quad (8)$$

Para resolver la anterior ecuación se emplea el método diferencial aplicando el método de los mínimos cuadrados. La expresión final viene dada por:

$$\frac{dC_c}{dt} = 2.052 \cdot 10^7 \cdot e^{\left(\frac{-4034.95}{T}\right)} \cdot \left(0.26 - \frac{1}{10} \cdot C_c\right)^{0.2} \quad (9)$$

Donde, T está en grados Kelvin [K], y C<sub>c</sub> en [gH<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>/L].

La energía de activación resulta: E<sub>a</sub>=33.72 KJ/mol. Como la energía de activación es elevada se confirma la sensibilidad de la reacción en estudio con la temperatura. Se tiene un factor de correlación de R<sup>2</sup>=0.9509.

Una vez concluida la reacción química, se procede a filtrar la solución y se tiene por un lado el mineral desgastado y por otro la solución rica. Para el estudio de la cristalización, se realizó una simulación con el software Phreeqc-2, este es un programa que se basa en la química del equilibrio de las soluciones acuosas. Se evalúa la formación de diferentes sales según los iones presentes en la solución a lo largo de diferentes porcentajes de evaporación. Según la simulación, para un porcentaje de evaporación del 60% se tiene aproximadamente un 80% de recuperación del ácido bórico disuelto en la solución, además si se continua la evaporación la cantidad de cloruro de sodio también asciende de manera paralela, por tanto no es conveniente proceder a una evaporación mayor, es de esta manera que las pruebas experimentales se las llevaron a cabo hasta una evaporación del 60%.

El pH de la solución rica se encuentra entre 6.5 a 7, para la cristalización se debe trabajar con un pH de aproximadamente 3. Por cada 1,000 ml de solución rica se requiere aproximadamente 10 ml de ácido sulfúrico al 98.5 % en peso. Llegando a ahorrar en un 80% la cantidad de ácido empleada por el método tradicional. Después de acidificadas las muestras, se evaporó, para lo cual se prepararon cinco muestras cada una con 1,000 gramos de solución rica, estas se llevaron a un baño maría a 60 °C, fue así que las soluciones fueron evaporadas a 20, 30, 40, 50 y 60% respectivamente.

Para una evaporación del 60% se tiene un porcentaje de recuperación próximo al 86%, siendo esta cantidad de cristales de ácido bórico recuperada próxima a la predicha por el programa, por tanto validamos los resultados hallados en la simulación. De igual manera, la cantidad de cloruros es alrededor del 0.2% por tanto se lleva a cabo un lavado de los cristales, para llegar a la cantidad de cloruros permitidos para el ácido bórico comercial.

La calidad del ácido bórico obtenido cumple con las características del producto comercial, el producto obtenido tiene una pureza en peso del 99.75 % en ácido bórico; en carbonatos 0.02 %; potasio 0.013 %; cloruro de sodio

0.08% y no existen trazas de litio en los cristales, por tanto se obtiene un producto que cumple con los estándares de calidad, tomando en cuenta que el ácido bórico industrial tiene una pureza mínima del 99.5 % en ácido bórico.

## EXPERIMENTAL

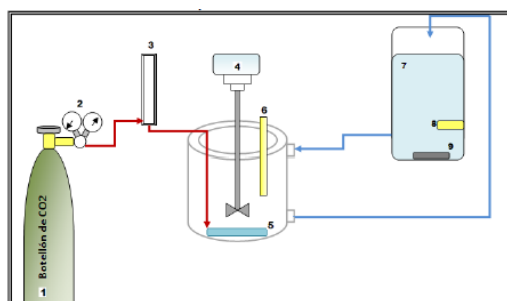
Para este trabajo de investigación se usó ulexita proveniente de las borateras de Río Grande, cuyo análisis [2] se muestra en la siguiente tabla 7.

Tabla 7.- Composición de ulexita

ESPECIE	% PESO
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36,76
CO <sub>3</sub> =	11,18
Cl-	6,18
SO <sub>4</sub> =	1,1
Ca <sub>2</sub> +	7,88
Mg <sub>2</sub> +	0,95
K+	0,34
Li+	0,03
Na+	7,44
H <sub>2</sub> O	15,5

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al análisis teórico del proceso, se estudió la importancia de las siguientes variables que influyen en la reacción: **agitación, temperatura, relación sólido-líquido, tamaño de grano y flujo de gas carbónico; el tiempo de reacción** no se estudia ya que las pruebas se llevaron a cabo hasta llegar a un estado estacionario. El programa Design Expert 7.0 sirvió para el diseño de las pruebas experimentales, realizando el estudio de las cinco variables por medio de un diseño factorial con cuatro puntos centrales y dos réplicas, esto para conocer la importancia de los factores y su interacción, los puntos centrales permiten evaluar si existe dependencia lineal de las variables de estudio con la respuesta. Se tienen dos respuestas: concentración final de ácido bórico y el rendimiento de la reacción. Analizada la influencia, y con las mejores condiciones se determina el modelo cinético de la reacción, identificando la etapa de control. Para el estudio de la reacción química se ha utilizado un reactor de laboratorio, construido en acero inoxidable, con una capacidad total de cinco litros, posee una chaqueta calefactora [6]. Por la chaqueta se alimenta agua a temperatura mayor a la de trabajo en las diferentes pruebas, el agua proviene de un tanque externo que posee un termostato que permite controlar la temperatura, entonces la chaqueta trabaja alimentada con agua caliente de una pequeña bomba peristáltica, ver. Figura 1. En la tapa se tienen las diferentes entradas para el termómetro, toma de muestra y conducto del gas carbónico. Para la agitación se trabajó con un motor con su respectivo controlador de velocidad, el agitador empleado es de turbina con cuatro aspas con una inclinación de 45 °C. Se mide la temperatura de la reacción mediante un termómetro de mercurio. Como difusor de gas se emplea un difusor de acuario, conectado a un tubo de acero inoxidable, el mismo va directo a un caudalímetro, y este se conecta al botellón de gas carbónico. El esquema del equipo utilizado es el siguiente:



1.Botellón de gas carbónico, 2.Regulador de presión, 3.Caudalímetro, 4.Sistema de agitación, 5.Difusor gaseoso, 6.Termómetro de mercurio, 7.Tanque de agua para la chaqueta, 8.Termostato y sensor de temperatura, 9. Resistencia eléctrica; gas carbónico: → ; agua: →



Después de la reacción se tiene una mezcla de mineral gastado suspendido en una solución que contiene todos los productos de la reacción. Se caracterizaron los iones presentes en dicha solución de donde se cristalizó por evaporación el ácido bórico y finalmente se secaron los cristales.

## CONCLUSIONES

-Las variables importantes dentro de la reacción química son: temperatura, relación sólido líquido y flujo de gas carbónico.

-Al establecer la expresión cinética de la reacción química, no influye de manera significativa ni el tamaño de grano ni la agitación, por lo tanto, el mecanismo predominante es la reacción química y no así la difusión, hecho que se confirma por la fuerte dependencia de la reacción con la temperatura.

-Para poder cristalizar el ácido bórico se debe realizar una acidificación de la solución mediante ácido sulfúrico para poder llegar a un pH de 3, obteniéndose un ahorro del 80 % de este ácido respecto al proceso tradicional.

-El ácido bórico obtenido tiene una pureza del 99.75%, por tanto se obtiene un producto que cumple con los estándares de calidad del ácido bórico grado industrial que es del 99.5 %.

-El proceso propuesto es una real alternativa tecnológica para reemplazar el uso del ácido sulfúrico en la fabricación de ácido bórico en condiciones ventajosas, obteniendo buenos rendimientos y un producto de buena calidad.

-Los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación podrían utilizarse para una futura proyección de una planta piloto.

-Si bien se llevó a cabo un estudio sobre la viabilidad técnica para producir ácido bórico a partir de gas carbónico y ulexita, se sugiere llevar a cabo un análisis de la factibilidad económica de la producción comercial de este ácido.

## REFERENCIAS

1. BALLIVIAN, O., F. RISACHER. Los salares del altiplano boliviano: métodos de estudio y estimación económica. Orston-Paris. 1981.
2. AMERICAN Society for Testing and Materials. ASTM D3082 - 09: Standard Test Method for Boron in Water: EEUU: ASTM, 1999
3. FLORES A. Eliana Thelma, Reactivación económica del departamento de Potosí en base al aprovechamiento de los recursos evaporíticos del salar de Uyuni. Proyecto de grado Economía. La Paz, Bolivia: Universidad Mayor de San Andrés, 2008.
4. FOGLER Scott H. Elementos de ingeniería de las reacciones químicas, 3ª edición México: Prentice Hall, 2001.
5. Ley 1008 "LEY DEL RÉGIMEN DE LA COCA Y SUSTANCIAS CONTROLADAS", La Paz, Bolivia, 19 de julio 1988.
6. McCABE L. Warren, SMITH C. Julian, HARRIOTT Peter. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química, 4ª edición Madrid: Mc Graw Hill, 1998.
7. MONTGOMERY C. Douglas. Diseño y análisis de experimentos, 2ª edición México D.F.: Limusa Wiley, 2002.
8. MORALES Graciela, CAPRETTO María, MERCADO Lorgio y QUIROGA Oscar. Disolución de boratos en agua con dióxido de carbono disuelto. Salta-Argentina: Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ingeniería. Instituto de Investigaciones para la Industria Química, 2002.
9. OTHMER, Kirk. Enciclopedia de tecnología química, 1ª edición México: Limusa, 1998.
10. PARRA, Roberto. El Boro. Una nueva alternativa de explotación en Bolivia. CEPROMIN. 1994.
11. PEDRAZA Velarde, Eddy Gabriel, QUIROZ Altamirano, Reynaldo. Inventario de depósitos de boratos del altiplano de Bolivia. La Paz, Bolivia: Ministerio de Minería, 2005.
12. PERRY, Robert H.; GREEN, Don W.; MALONEY, James O. Manual del Ingeniero Químico, tomo II, 6ª edición México D.F.: Mc Graw Hill, 1976.
13. Salar de Uyuni [en línea]. Bolivia. COMIBOL Gerencia Nacional de Recursos Evaporíticos, 2008 Disponible en: <http://www.evaporiticobolivia.org/index.php?Modulo=Temas&Opcion=SalarUyuni>.