

Tratamiento del lactosuero residual a través de un proceso electrolítico aplicando arreglos ortogonales para su reutilización en la agroindustria

MATEO, Nicolás*†, PURROY, Rubén, CRUZ, Lidilia y BAUTISTA, Horacio.

Recibido Octubre 21, 2016; Aceptado Noviembre 15, 2016

Resumen

La generación de lactosuero en la agroindustria quesera es el principal residuo que actualmente no se le da tratamiento ni aprovechamiento alguno en México, convirtiéndolo en un contaminante del suelo y principalmente del agua, por la gran cantidad de Demanda Química de Oxígeno y Demanda Bioquímica de Oxígeno requerida para degradar la materia orgánica. La investigación aborda esta problemática para dar una alternativa a las agroindustrias de procesamiento de leche, para tratar el lactosuero con métodos electroquímicos, en este caso mediante electrólisis, y la posterior reutilización del agua en algunos procesos de lavado. El estudio se desarrolló en Tempoal, Veracruz, México, un municipio que se destaca por tener como principal actividad económica la producción de quesos y por consiguiente altos volúmenes de este residuo que puede aprovecharse industrialmente. Se realizó un experimento empleando Arreglos Ortogonales de Taguchi para determinar variables significativas en la obtención de Hidrógeno (H) y oxígeno (O) en la electrólisis, se realizaron 8 tratamientos con dos réplicas, se probó el voltaje, tipo de material, tiempo y tamaño del electrodo a dos niveles cada uno. El resultado mostró que usando aluminio como electrodos en cátodo y ánodo se genera mayor cantidad de H y O en el proceso electrolítico.

Lactosuero, Electrólisis, Arreglos Ortogonales, Tratamiento residual, Diseño Robusto

Abstract

The generation of whey in the cheese agro-industries is the main waste that currently not given treatment or use in Mexico, turning it in a contaminant of soil and water mainly, by the large amount of chemical oxygen demand and biochemical oxygen demand required to degrade organic matter. The research addresses this issue to provide an alternative to milk processing agro-industries, to treat whey with electrochemical methods, in this case by electrolysis and subsequent reuse of water in some washing processes. The study was conducted in Tempoal, Veracruz, México, a municipality that stands out for having as main economic activity cheese production and consequently high volumes of this waste that can be exploited industrially. It was performed an Taguchi's Orthogonal Arrays to determine significant variables in obtaining hydrogen (H) and oxygen (O) in electrolysis, 8 treatments with two replicates were performed, voltage, type of material, size and time tested experiment was performed electrode at two levels each. The result showed that using aluminum as cathode and anode electrodes more H and O is generated in the electrolytic process.

Cheese Whey, Electrolysis, Orthogonal Arrays, Residual treatment, Robust Design

Citación: MATEO, Nicolás, PURROY, Rubén, CRUZ, Lidilia y BAUTISTA, Horacio. Tratamiento del lactosuero residual a través de un proceso electrolítico aplicando arreglos ortogonales para su reutilización en la agroindustria. Revista de Sistemas Experimentales. 2016, 3-9: 1-7

* Correspondencia al Autor (Correo electrónico: paco_matthew@hotmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer Autor.

Introducción

Investigaciones han demostrado que el lactosuero, residuo generado en las queserías, conocidas como agroindustrias, es un vertido contaminante por la alta carga orgánica de Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). Callejas, Prieto, Reyes, Marmolejo y Méndez (2012) tras caracterizar un lactosuero encontraron que éste puede presentar una $DQO > 100\ 000\ \text{mg}\ \text{O}_2/\text{L}$; en cambio, Valencia y Ramírez (2009) reportan que la DQO del residuo se encuentra entre 30 000 a 50 000 mg/L. Otros autores reportan valores de DBO de 40 000- 60 000 (Ben Hassan y Ghaly, 1994) y DQO de 50 000- 80 000 mg/L (Fournier, Schwitzguébel y Péringer, 1993)

Por tal motivo, esta investigación es importante por la búsqueda y aportación que se hace en el tratamiento del lactosuero para mitigar los efectos ambientales; este trabajo es el reporte de la primera fase de la investigación, pues solo mide la cantidad de hidrógeno y oxígeno que se puede obtener de un lactosuero tras la producción de queso de aro en el municipio de Tempoal, Veracruz, México. Se aplicó la electrólisis; un método electroquímico, usando dos tipos de material para los electrodos (Al y Cu), a diferentes tamaños, tiempos de reacción y voltajes, a fin de hacer una selección del electrodo para posteriormente diseñar y construir un reactor de tratamiento de residuo. Considerando que tecnologías de tratamiento físico-químico o biológico existentes tienen alto costo, se busca el diseño y construcción de una tecnología económica que se adapte a las necesidades de las micro y pequeñas agroindustrias del municipio en estudio, esto permitirá dar un valor agregado respecto a las tecnologías actuales.

La hipótesis central del estudio se plantea: el Al usado como electrodo en un proceso electrolítico para obtener hidrógeno y oxígeno para tratar el lactosuero es más efectivo que el electrodo de Cu.

Estudios para mitigar este problema se enfocan al desarrollo de tratamientos con tecnologías y métodos físicos, químicos y biológicos.

Métodos de tratamiento y tecnologías

Callejas, *et al.* (2012) emplearon un proceso de electrocoagulación con electrodos Al y Ru_2O_3 para la remoción de la carga orgánica, logrando remover el 84%. Parra (2010) usó tratamiento anaerobio mediante un sistema de dos etapas, la primera con biofiltro anaerobio y la segunda con un reactor UASB (Up Flow Anaerobic Sludge Blanket) probando el sistema con tres cargas de DQO (5 200, 7 800 y 10 500 mg DQO/L-día) eliminando un 57% la DQO. Sánchez, Gil, Gil, Giraldo, Millán y Villada (2009), proponen una tecnología efectiva empleando Microorganismos Eficientes tipo lactobacillus que logran disminuir la DQO hasta un 98%, evitando riesgo ambiental.

Melchioris *et al.* (2016) trataron el agua residual de la industria lechera para estudiar la eficiencia de la electrofoculación y la recuperación de sólidos del lactosuero donde se usó un aparato electroquímico con dos electrodos de aluminio o hierro, encontrando que la DQO y turbidez disminuyen entre $97.0 \pm 0.02\%$ y $99.6 \pm 3.00 \times 10^{-4}\%$ final cuando se emplean electrodos de aluminio.

Bezerra *et al.* (2009) estudiaron los efectos del tiempo de alimentación, carga orgánica y cargas de choque en circulación anaerobia en tratamiento de lactosuero por un AnSBBR (Anaerobic Sequencing Batch Biofilm Reactor) cuyo resultado fue que a mayor tasa de carga orgánica de DQO pero con menor tiempo de alimentación aumenta la eficiencia de eliminación de materia orgánica en el reactor.

Los mismos autores analizaron después la variable “suplementación de alcalinidad” usando el mismo reactor, determinando que la eficiencia de éste no se ve afectado por la aplicación de cargas de choque, y la alcalinidad se puede reducir en un 50%.

Prazeres *et al.*, (2016) proponen el tratamiento de aguas residuales de alta resistencia de diferentes sueros de queso, que busca mitigar el CO₂ en la atmósfera así como la producción de biofertilizantes, usando coagulación-floculación FeCl₃, precipitación con NaOH y precipitación Ca(OH)₂ logrando una reducción del 90% de la DQO.

El uso de técnicas de ósmosis inversa de baja presión y la electrodiálisis fue usado por Zmievskii *et al.* (2014) para tratar el agua residual después del procesamiento del lactosuero.

Metodología

Factores de control y ruido en la electrólisis

Para la electrólisis, se usó el lactosuero como la solución electrolítica, al que previamente se le hizo una caracterización para conocer el Potencial de hidrógeno (pH) y la salinidad como factores de ruido, las muestras estudiadas arrojaron que el pH mas bajo fue de 4.0 y el mas alto de 5.14, estos quedaron definidos como los niveles bajo (1) y alto (2); mientras que la salinidad tuvo un nivel (1) de 3.90 y un nivel (2) de 5.30. Los factores de control (Arreglo Interno) así como de ruido (Arreglo Externo) con sus respectivos niveles 1 y 2 se muestran en la tabla 1.

Factores de control	Nivel		Factores de ruido	Nivel	
	1	2		1	2
A: Voltaje (V)	6	12	K: pH	4.0	5.14
B: Tiempo (min)	15	30	L: Salinidad	3.90	5.30
C: Tamaño del electrodo (cm)	10	15			
D: Tipo de Material	Al	Cu			

Tabla 1 Factores de control y ruido definidas en el experimento.

Las variables de respuesta fueron:

Y_H: Volumen de hidrógeno (H) obtenido.

Y_O: Volumen de oxígeno (O) obtenido. Ambas variables fueron tomadas simultáneamente en la reacción, puesto que en un electrodo se obtiene

H y en otro O. la figura 1 presenta el experimento.



Figura 1 electrólisis con lactosuero

Arreglos ortogonales

Se usaron los Arreglos Ortogonales (AO) de Taguchi en el Diseño Robusto (DR); se definieron cuatro variables de control a dos niveles usando un AO L₈; para los factores de ruido se eligió un AO L₄. La gráfica lineal elegida para el L₈ fue (gráfico 1):

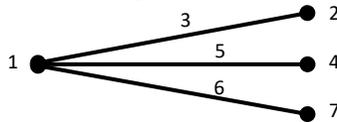


Gráfico 1 Gráfica lineal para el arreglo L₈.

El DR con el arreglo externo e interno para Y_H se presenta en la tabla 2, resultando 32 corridas o pruebas.

		Arreglo Externo (L ₄)													
		Factores de ruido		3	1	2	2	1							
		1	2	L	1	2	1	2			\bar{X}	σ	S/R		
		1	2	K	1	1	2	2							
		Factores controlables													
		1	2	3	4	5	6	7							
		A	B	C	D										
Arreglo Interno (L ₈)	1	1	1	1	1	1	1	1	18	18	17.8	18.1	17.98	0.13	25.09
	1	1	1	2	2	2	2	2	7.2	7.2	7.24	7.11	7.19	0.05	17.13
	1	2	2	1	1	2	2	2	13.68	14.4	14.09	14.10	14.07	0.30	22.96
	1	2	2	2	2	1	1	1	20.88	21.6	21.31	21.37	21.29	0.30	26.56
	2	1	2	1	2	1	2	2	14.4	14.76	14.75	14.54	14.61	0.17	23.29
	2	1	2	2	1	2	1	2	15.12	14.4	14.85	14.59	14.74	0.31	23.37
	2	2	1	1	2	2	1	1	32.4	36	33.47	32.95	33.71	1.59	30.53
	2	2	1	2	1	1	2	2	9	10.08	9.10	9.66	9.46	0.51	19.49

Tabla 2 Diseño con arreglos interno y externo para el estudio de H obtenido.

De acuerdo con Taguchi (1984), en un AO L₈ se deben elegir las columnas 1, 2, 4 y 7 para asignar a los factores de control (En este caso los factores A, B, C y D), y las columnas 1 y 2 del AO L₄ (factores K y L). En la tabla 2 y 3 se señalan con recuadros grises.

		Arreglo Externo (L ₄)													
		Factores de ruido		3	1	2	2	1							
		1	2	L	1	2	1	2			\bar{X}	σ	S/R		
		1	2	K	1	1	2	2							
		Factores controlables													
		1	2	3	4	5	6	7							
		A	B	C	D										
Arreglo Interno (L ₈)	1	1	1	1	1	1	1	1	2.52	3.6	2.60	2.65	2.84	0.51	8.82
	1	1	1	2	2	2	2	2	0.72	1.08	0.73	1.03	0.89	0.19	-1.47
	1	2	2	1	1	2	2	2	3.6	3.6	3.42	3.71	3.53	0.12	11.07
	1	2	2	2	2	1	1	1	9.72	10.8	9.72	9.94	10.05	0.51	20.01
	2	1	2	1	2	1	2	2	1.08	1.08	9.97	9.88	5.50	5.11	3.63
	2	1	2	2	1	2	1	2	2.16	0.72	1.04	1.20	1.28	0.62	0.27
	2	2	1	1	2	2	1	1	7.2	7.2	7.14	6.90	7.11	0.14	17.03
	2	2	1	2	1	1	2	2	2.52	2.88	2.78	2.72	2.73	0.15	8.68

Tabla 3 Diseño con arreglos interno y externo para el estudio de O obtenido.

Razón señal/ ruido

El cálculo de la Razón Señal/Ruido (S/R) es un estadístico de desempeño que se calcula en cada combinación de los factores controlables (Gutiérrez y de la Vara, 2012). El tipo de característica de calidad de interés es: mayor es mejor, es decir, entre mayor cantidad de H y O se obtenga en el menor tiempo de reacción de la electrólisis, es mejor; está dada por la ecuación 1:

$$-10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right] \tag{1}$$

Resultados

Efectos significativos en la obtención de H

Se hizo un análisis regular, para encontrar factores que afectan a la media del proceso experimental, teniendo en cuenta que el interés se centra en el estudio de los 4 efectos individuales (A, B, C y D) en sus dos niveles, el cálculo del Análisis de Varianza (anova) en relación a la media indica que el factor significativo es D con valor F de 11.32, que es mayor a F_{Tablas} al 95% de confianza y un grado de libertad: F_{0.05,1,3}= 10.13 (tabla 4)

Factores	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F
A	1	17.99	17.99	0.91
B	1	72.05	72.05	3.63
C	1	95.79	95.79	4.83
D	1	224.53	224.53	11.32
Error Residual	3	59.50	19.83	
Total	7	469.86		

Tabla 4 Análisis de varianzas de medias.

Por su parte las gráficas de efectos principales para las medias, muestra que el factor D tiene mayor inclinación (gráfico 2)

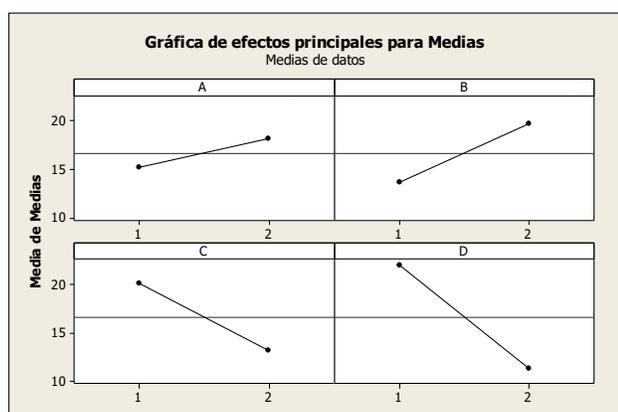


Gráfico 2 Gráfico de efectos principales para Medias en la obtención de H

También se determinaron efectos significativos que afectan a la Razón S/R, el anova arrojó que los factores C y D con valores F de 11.88 y 25.99 respectivamente, son significativos al ser mayores que F_{Tablas} al 95% de confianza y un grado de libertad: $F_{0.05,1,3} = 10.13$ (tabla 5)

Factores	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F
A	1	3.046	3.046	1.23
B	1	14.211	14.211	5.75
C	1	29.378	29.378	11.88
D	1	64.290	64.290	25.99
Error Residual	3	7.420	2.473	
Total	7	118.346		

Tabla 5 Análisis de varianzas de Relación Señal/Ruido.

Lo anterior indica que el tipo de material afecta tanto a la media como a la S/R, mientras que el tamaño del electrodo solo a la media para la obtención de Hidrógeno.

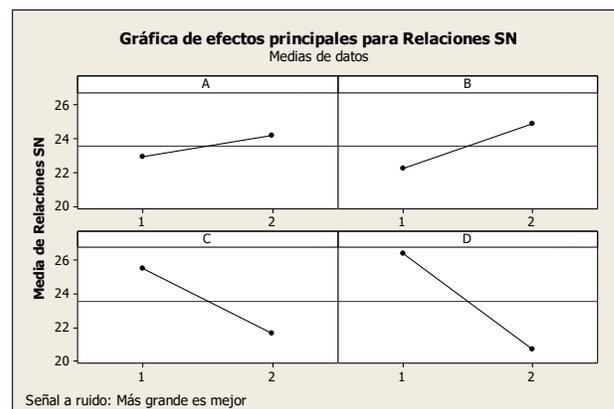


Gráfico 3 Gráfico de efectos principales para relaciones S/R para H.

Efectos significativos en la obtención de O

Ningún factor fue significativo en la obtención del O respecto a la media; todos fueron menores al valor $F_{0.05,1,3} = 10.13$ (tabla 6). En tanto que el factor B: Tiempo, resultó significativo respecto a S/R (Tabla7), con un valor F de 19.83.

Variable	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F
A	1	0.0689	0.0689	0.01
B	1	20.9547	20.9547	1.75
C	1	2.0987	2.0987	0.18
D	1	9.1967	9.1967	0.77
Error Residual	3	35.8740	11.9580	
Total	7	68.1931		

Tabla 6 Análisis de varianzas de medias en la obtención de O.

Variable	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F
A	1	9.764	9.764	0.75
B	1	259.340	259.340	19.83
C	1	21.326	21.326	1.63
D	1	73.345	73.345	5.61
Error Residual	3	39.236	13.079	
Total	7	403.011		

Tabla 7 Análisis de varianza de Relación Señal/Ruido.

Predicción

A fin de realizar una predicción y maximizar la robustez del proceso, se analiza la media y se elige el factor D en su nivel 1; mientras que en el análisis de la S/R, se eligen los factores C y D ambos en su nivel 1; lo anterior hará menos sensible a los factores de ruido (K y L); empleándose como factores de ajuste.

La ecuación para la predicción respecto a la media de H queda establecida:

$$\hat{y} = \bar{y} + (\bar{D}_2 - \bar{y}) = \bar{D}_2 \quad (2)$$

Usando la ecuación 2, se obtiene

$$\hat{y} = 21.92$$

La ecuación para la predicción respecto a S/R de H queda establecida:

$$\widehat{S/N} = \overline{S/N} + (\bar{C}_1 - \overline{S/N}) + (\bar{D}_1 - \overline{S/N}) \quad (3)$$

Usando la ecuación 3, se obtiene:

$$\widehat{S/N} = 20.09 + 21.92 - 16.63 = 35.23$$

La ecuación para la predicción respecto a S/R de O queda establecida:

$$\widehat{S/N} = \overline{S/N} + (\bar{B}_2 - \overline{S/N}) = \bar{B}_2 \quad (4)$$

Usando la ecuación 4, se obtiene $\hat{y} = 19.63$

Agradecimiento

Al Tecnológico Nacional de México por la aprobación del proyecto de investigación "Sistema de tratamiento del lactosuero para mitigar los efectos en sistemas hidrosanitarios en Tempoal, Ver.", así como al Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca por el apoyo institucional.

Conclusiones

La experimentación aplicando la idea de robustez de Taguchi permitió minimizar el efecto de los factores de ruido (salinidad y pH) sin tener que controlarlos directamente; buscando minimizar la varianza. La importancia de la aplicación del método de Taguchi en este trabajo, radica en que el proyecto se encuentra en la etapa de diseño de un nuevo producto, por lo tanto tiene mayor impacto, puesto que este tipo de diseño de experimentos son aplicables a la etapa de diseño y desarrollo de nuevos productos y procesos. De tal manera, que el experimento de 8 tratamientos con dos réplicas, probando el voltaje, tipo de material, tiempo y tamaño del electrodo a dos niveles cada uno mostró que usando Al como electrodos en cátodo y ánodo se genera mayor cantidad de H y O en el proceso electrolítico.

Referencias

Bezerra, R.A., Rodrigues, J.A.D., Ratusznei, S.M., Zaiat, M. y Foresti, E. (2007). whey treatment by AnSBBR with Circulation: Effects of organic loading, shock loads, and alkalinity supplementation. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 143(3) 257-275. doi: 10.1007/s12010-007-8330-1

Bezerra, R.A., Rodrigues, J.A.D., Ratusznei, S.M., Zaiat, M. y Foresti, E. (2009). Effects of feed time, organic loading and shock loads in anaerobic whey treatment by an AnSBBR with Circulation. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 157-140. doi: 10.1007/s12010-008-8371-4

Callejas, J. H., Prieto, F. G., Reyes V. E., Marmolejo, y., Méndez M. A. (2012) Caracterización fisicoquímica de un lactosuero: potencialidad de recuperación de fósforo. *Acta universitaria*. 22 (1) 11-18.

Escalante, E. J. (2014) *Seis Sigma: Metodología y técnicas*. México. Limusa. ISBN: 978-607-05-0448-8

Fournier, D., Schwitzguébel, J. P. y Péringer, P. (1993) Effect of different heterogeneous inocula in acidogenic fermentation of whey permeate. *Biotechnology Letters*. Vol. 15, 627-632. Doi: 10.1007/BF00138553

Gutiérrez, H. y De la Vara R. (2012) *Análisis y diseño de experimentos*. México. Mc Graw Hill. ISBN: 978-607-15-0725-9

Moeini, H., Nahvi, I., y Tavassoli, M. (2004) Improvement of SPC production and BOD removal of whey with mixed yeast culture. *Electronic journal of biotechnology*. 7(3). ISSN: 0717-3458

Melchioris, M.S., Piovesan, M., Becegato, V. R., Becegato, V. A., Tambourgi, E.B. y Paulino, A. T. (2016). Treatment of wastewater from the dairy industry using electroflocculation and solid whey recovery. *Journal of Environmental Management*, 182(1), 574-580.

Parra, R. A. H. (2010) Digestión anaerobia de lactosuero: efectos de altas cargas puntuales. *Rev.Fac.Nal. Agr. Medellín* 63(1): 5385-5394.

Parra, R. A. H. y Campos, R. G. M. (2013) Tratamiento de lactosuero ácido en un reactor UASB a diferentes cargas constantes y puntuales. *Producción + Limpia*. 8 (2) 60-71.

Prazeres, A. R., Rivas, J., Paulo, U., Ruas, F., Carvalho, F. (2016). Sustainable treatment of different high-strength cheese whey wastewaters: an innovative approach for atmospheric CO₂ mitigation and fertilizer production. *Environmental Science and Pollution Research*. 23(13) 13062-13075. Doi: 10.1007/s11356-016-6429-3

Sánchez, G. L. S., Gil, M. J. G, Gil M. A. G., Giraldo, F. J. R., Millán, L. J. C. y Villada M. E. R. (2009) Aprovechamiento del suero lácteo de una empresa del norte antioqueño mediante microorganismos eficientes. *Producción + Limpia*. 4(2)

Valencia, E. D. y Ramírez M. L. C. (2009) La industria de la leche y la contaminación del agua. *Elementos* 73. 27-31

Zmievskii, Y. G., Kirichuk, I. I., Mironchuk, V. G. (2014). Membrane treatment of wastewater obtained after the whey processing. *Journal of water Chemistry and Technology*. 36(6) 309-316 DOI: 10.3103/S1063455X14060095