

Optimización del proceso metalúrgico de aleación Pb-Sb mediante el método Taguchi

J.F. Magallanes-Armendáriz¹, R.A. Herrera-García², G. García-Legaspi¹, L.I. Cháirez-Acosta¹, M.P. Serrano-Ruiz², T.E. Rascón-Escajeda¹

Resumen—Se presentan los resultados que se obtuvieron al aplicar un Diseño de Experimentos por el método Taguchi en el proceso de afinación para la producción de la aleación de plomo (Pb) y antimonio (Sb) a nivel laboratorio. El objetivo de este diseño fue obtener la mayor reducción del contenido de arsénico en la aleación para definir los niveles óptimos a los que se deben operar los factores de consumo que intervienen en el proceso de producción, como son la cantidad de sosa cáustica utilizada, el tiempo de dosificación de sosa y el tiempo de agitación. Se determinaron los niveles óptimos de los factores a operar: consumo de sosa (330 gramos), tiempo de dosificación (66 minutos) y tiempo de agitación (120 minutos), lo que representa un ahorro en el consumo de sosa y una reducción en los tiempos de agitación y dosificación.

Temas claves— Arsénico, Diseño de Experimentos, Método de Taguchi, Plomo, Sosa Cáustica.

Abstract— The following results were obtained after applying an experimental design based on the Taguchi method, in the tuning process for the lead (Pb) - antimony (Sb) alloy production at lab level. The objective was to obtain the highest reduction of arsenic in the Pb-Sb alloy, and determine the optimal levels that the consumption factors involved in the production process should operate with; such as the amount of caustic soda used, caustic soda dosing and stirring time. After the experimental design, optimal levels of these factors were determined as follows: soda consumption (330 grams), soda dosing time (66 minutes) and soda stirring time (120 minutes), representing savings in soda consumption and a reduction in dosing and stirring time.

Keywords – arsenic, , experimental design, Taguchi method, lead, caustic soda.

I. INTRODUCCIÓN

Muchas estrategias de optimización y de mejora continua, y en particular el diseño de experimentos, embonan en el llamado *ciclo de Deming*, el cual representa una estrategia a seguir para mejorar continuamente cada

producto o proceso, y consiste en los cuatro pasos: *planear, hacer, verificar o estudiar y actuar* [1].

El Diseño de Experimentos es el proceso de plantear, ejecutar y analizar el experimento de manera que los datos apropiados sean recolectados, tengan validez estadística y poder obtener conclusiones válidas y útiles y se puede aplicar a problemas o situaciones en las que se quiere investigar y/o probar conjeturas en las que se comparan dos o más situaciones para las causas o factores involucrados [2].

El saber diseño de experimentos y otras técnicas estadísticas, en combinación con conocimientos del proceso, sitúan al responsable del mismo como un observador perceptivo y proactivo que es capaz de proponer mejoras y de observar algo interesante (oportunidades de mejora) en el proceso y en los datos donde otra persona no ve nada [1]. Al respecto diversos estudios se han realizado aplicando estas técnicas en la industria metalúrgica [3]-[5] y en diferentes tipos de empresas [6]-[9].

La calidad de un producto debe ser medida en términos de abatir al mínimo las pérdidas que ese producto le trae a la sociedad, desde que inicia su fabricación hasta que concluye su ciclo de vida; estas pérdidas sociales se traducen en pérdidas de la empresa en el mediano y largo plazos. El método Taguchi de parámetros tiene como meta lograr productos y procesos robustos frente a las causas de la variabilidad, que hacen que las características funcionales de los productos se desvíen de sus valores óptimos provocando costos de calidad [10].

El diseño de experimentos consiste en determinar cuáles pruebas se deben realizar y de qué manera, para obtener datos que, al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que permitan responder las interrogantes planteadas, y de esa manera clarificar los aspectos inciertos de un proceso, resolver un problema o lograr mejoras. Algunos problemas típicos que pueden resolverse con el diseño y el análisis de experimentos son los siguientes:

1. Comparar a dos o más materiales con el fin de elegir al que mejor cumple los requerimientos.
2. Comparar varios instrumentos de medición para verificar si trabajan con la misma precisión y exactitud.

¹J.F. Magallanes-Armendáriz (jfmagar@gmail.com), R.A. Herrera-García, G. García-Legaspi, L.I. Cháirez-Acosta, T.E. Rascón-Escajeda Instituto Tecnológico de Torreón, BCarretera Antigua Torreón San Pedro Km 7.5 Torreón, Coahuila.Tel: (871) 750-71-98 / (871) 750-71-99
²M.P. Serrano-Ruiz (paloma.serranor@gmail.com) Universidad Tecnológica de Torreón.Carretera Torreón-Matamoros Km10, El Águila, 27400 Torreón, Coahuila. Tel: (871) 7297400

3. Determinar los factores (las x vitales) de un proceso que tienen impacto sobre una o más características del producto final.
4. Encontrar las condiciones de operación (temperatura, velocidad, humedad, por ejemplo) donde se reduzcan los defectos o se logre un mejor desempeño del proceso.
5. Reducir el tiempo de ciclo del proceso.
6. Apoyar el diseño o rediseño de nuevos productos o procesos.
7. Ayudar a conocer y caracterizar nuevos materiales. [11].

En el caso de la industria metalúrgica el proceso de producción tradicional de la aleación de plomo (Pb) y antimonio (Sb) comprende las siguientes etapas:

Fusión: El Pb llega en barras y es cargado a una paila para ser fundido a una temperatura de 450-500 °C, el nivel de llenado de la paila debe quedar entre 10 y 15 cm de vacío, una vez alcanzado el nivel se introduce un agitador con campana y se agita el contenido por un tiempo de 20 minutos. Transcurrido este tiempo se retira el agitador y se procede a retirar las impurezas o residuos de hierro formado.

Afinación: En esta etapa se procede a colocar de nueva cuenta el agitador y se comienza la dosificación de la sosa cáustica (660 g) en un tiempo de 100 minutos a la paila, después que se termina de adicionar la sosa se deja agitando por 180 minutos para que esta reaccione, una vez transcurrido este tiempo se procede a retirar de nueva cuenta las impurezas y residuos del cáustico generado. Este proceso se repite hasta lograr un contenido de arsénico del 1%.

Cristalización: Una vez terminado el proceso de afinación y obtener el contenido deseado de arsénico (1%) se procede a bajar la temperatura a 350 °C, esto para que se generen cristales de antimonio y estos sean retirados, una vez retirados los cristales se procede a subir la temperatura para iniciar el moldeo.

Moldeo: Teniendo la paila una temperatura de 400-500 °C se procede a colocar la bomba y tubería para iniciar la etapa final de moldeo [12]-[13].

El método Taguchi establece tres etapas para el desarrollo del experimento:

1. Diseño del sistema.
2. Diseño de los factores.
3. Diseño de los niveles.

Este trabajo muestra la aplicación del diseño de experimentos por el método Taguchi para establecer los niveles óptimos de operación de los factores a considerar

en un proceso metalúrgico de producción, en este caso de aleación.

El objetivo del estudio fue establecer los niveles óptimos a los que se deben operar los factores de consumo de sosa cáustica en gramos, el tiempo de dosificación de sosa en minutos y el tiempo de agitación en minutos para reducir los contenidos de arsénico.

II. METODOLOGÍA

De acuerdo a la información histórica de operación, experiencia y conocimiento en el proceso del área operativa y a los resultados de un estudio realizado por el personal del área de Ingeniería Industrial de los tiempos de ciclo por etapas en la producción de la aleación de plomo-antimonio (Pb-Sb), la etapa de afinación es la que mayor tiempo y variación tiene (Figura 1). El objetivo de esta etapa es eliminar o reducir al mínimo el contenido de arsénico (As) y las principales actividades dentro de ésta son la cantidad de sosa agregada, el tiempo de dosificación de sosa y el tiempo de agitación para que reaccione la sosa y elimine o arrastre el As.

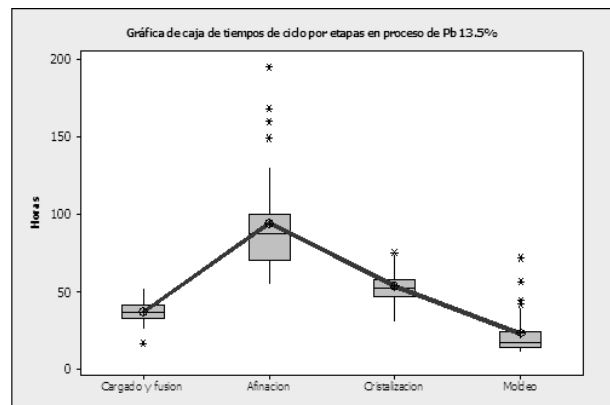


Figura 1. Tiempos de ciclo por etapas de la aleación Pb-Sb (estudio Ingeniería Industrial)

Los factores que impactan fuertemente en el proceso de producción, además de la factibilidad de ser controlados en esta etapa son: el consumo de sosa por la alta cantidad que es utilizada, tiempo de adición de sosa y tiempo de agitación. No existe alguna evidencia que indique que los niveles a los que actualmente se operan estos factores (Tabla I) sean los óptimos o sean los que impliquen un mejor aprovechamiento de los recursos, por lo tanto se decidió enfocarse en estos tres factores, así como tomar el contenido de As como trazador pues este elemento al final del proceso de agitación debe estar cercano a cero, en el

caso del proceso actual de aleación el contenido de arsénico fluctúa alrededor de un 2%.

TABLA I
FACTORES Y NIVELES ACTUALES DE OPERACIÓN.

Factores	Niveles
Sosa Añadida (gr.)	660
Tiempo de Agitación (min.)	180
Tiempo de Dosificación (min.)	100

III. DESARROLLO DE ACTIVIDADES

Para establecer el diseño de los factores y sus respectivos niveles se tomaron en cuenta los niveles actuales de operación mostrados en la Tabla I, de la información histórica de operación se observaron otros niveles a los que se llegó a operar y se obtuvieron bajos consumos de sosa así como en tiempos de agitación y dosificación. Estos niveles de operación siempre fueron realizados a prueba y error sin llegar en ningún momento a oficializar que fueran mejores a los que se opera actualmente, por lo cual basados en esas pruebas realizadas y con el conocimiento y experiencia en el proceso se establecieron los niveles para cada factor, según se muestra en la Tabla II.

TABLA II
DISEÑO DE FACTORES Y NIVELES

Factores	Código	Niveles		
Sosa Añadida (gr.)	A	330	500	660
Tiempo de Agitación (min.)	B	60	120	180
Tiempo de Dosificación (min.)	C	66	100	200

IV. APLICACIÓN DEL METODO

Con los arreglos ortogonales se pueden estudiar muchas variables en pocos experimentos lo cual es factible cuando el realizar un experimento es demasiado costoso. Taguchi [10] definió uno de los arreglos ortogonales como L₉ (Tabla III) este arreglo permite estudiar factores con tres niveles (9 corridas en un diseño de hasta 4 factores a tres niveles); dado que este diseño experimental satisface el diseño establecido en la Tabla II, se consideró apropiado para este caso.

En este estudio se tuvieron tres factores, por lo cual según lo que se muestra en la Tabla III es necesario tomar solo las columnas 1, 2 y 3 para el desarrollo del experimento, adicional a esto se decidió realizar solo una réplica esto debido al costo y disponibilidad de materia prima (Pb), consumo de recursos y los tiempos previos en que se incurre para llevar a cabo todo el proceso de Afinación. Esta decisión fue por consenso del área operativa y apoyada por la Gerencia.

TABLA III
ARREGLO ORTOGONAL L₉

Arreglo L ₉				
No. Corrida	No. Columna			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	2	1	3
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1
2 factores: columnas 1, 2.				
3 factores: columnas 1, 2, 3.				
4 factores: columnas 1, 2, 3, 4.				

Los resultados de la experimentación a nivel laboratorio bajo el diseño L₉ se muestran en la Tabla IV. En ella se presentan los resultados de cada una de las corridas tomando como variable de respuesta el porcentaje de reducción de As. Cabe mencionar que la realización de estas corridas fue de manera aleatoria aun y cuando Taguchi no enfatiza la necesidad de correr el experimento de esta forma.

TABLA IV
RESULTADO DE LOS ARREGLOS ORTOGONALES L₉

No. Corrida	A	B	C	% Reducción de As
1	1	1	1	0.000
2	2	1	2	0.285
3	1	2	2	0.225
4	3	2	1	0.333
5	3	1	3	0.255
6	2	2	3	0.000
7	1	3	3	0.365
8	2	3	1	0.000
9	3	3	2	0.030

Con los resultados de la Tabla IV se puede determinar que las corridas 7 (A1 B3 C3) y la corrida 4 (A3, B2, C1) son las que presentan una mayor reducción en el contenido de arsénico en el proceso de afinación con valores de 0.365 y 0.333, respectivamente; sin embargo con la finalidad de corroborar estos resultados se realizó un análisis estadístico con el software MINITAB, el cual muestra otra manera de identificar los mejores niveles de operación, es decir, indica en base a la respuesta de las medias, cuáles niveles son los óptimos de cada factor, adicional a esto ayuda a identificar de mejor manera cuáles factores tienen mayor influencia, pues muestra la clasificación de cada uno de estos.

En la Figura 2, se puede observar que el factor que tiene mayor influencia sobre la respuesta en la disminución del contenido de arsénico es el tiempo de dosificación, seguido de la cantidad de sosa añadida y el tiempo de agitación. La Tabla V muestra los resultados del análisis estadístico del MINITAB para cada factor y nivel.

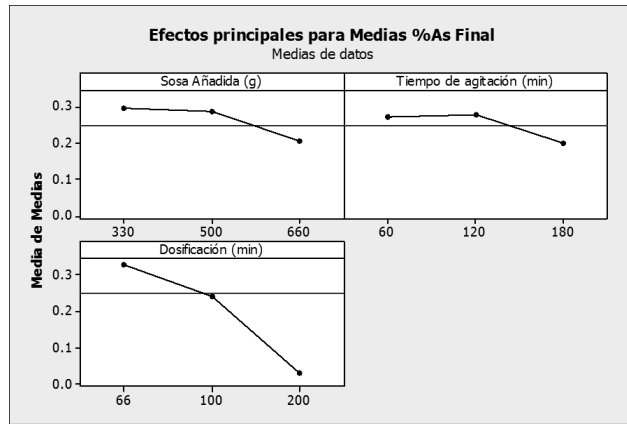


Figura 2. Efectos principales para medias de medias para contenido de arsénico final.

TABLA V
TABLA DE RESPUESTAS PARA MEDIAS OBTENIDA CON EL SOFTWARE MINITAB.

Nivel	Sosa Añadida (g)	Tiempo de agitación (min)	Tiempo de Dosificación (min)
1	0.29500	0.27000	0.32667
2	0.28500	0.27750	0.24000
3	0.20500	0.19750	0.03000
Delta	0.09000	0.08000	0.29667
Clasificar	2	3	1

De acuerdo a lo anterior se concluye que los mejores niveles de operación son A1, B2 y C1, los cuales muestran las mejores relaciones para obtener una mayor reducción de As.

V. CONCLUSIONES

El uso de esta metodología, mostró más efectividad que realizar pruebas de los diferentes factores y seleccionar al azar sus niveles, como se mencionó anteriormente se realizaban experimentos a prueba y error sin saber si se lograba obtener algún beneficio.

El tratar de buscar algún beneficio, ya sea en el proceso o económico realizando pruebas al azar sin ningún

fundamento, ocasiona un alto desperdicio de recursos materiales, humanos y económicos.

Esta metodología es considerada como una herramienta de mejora la cual debe ser utilizada con más frecuencia pues brinda más altos niveles de entendimiento de los procesos en donde se aplica y por ende alcanzar más altos rendimientos de éstos.

Con los resultados obtenidos se logró un mejoramiento del proceso al fijar los niveles óptimos de operación de los factores, además fue posible observar lo que ocurre con otros niveles los cuales no logran el objetivo de maximizar la reducción de As.

Además de establecer los niveles óptimos de cada factor se logró disminuir el consumo de sosa en un 50%, el tiempo de agitación en 60 minutos, así como el tiempo de dosificación en 34 minutos, estas disminuciones son comparándolas con los consumos y tiempos mencionados en la etapa de afinación del proceso.

Se recomienda seguir utilizando esta metodología en otros procesos, con otras problemáticas y en otras empresas y así se adopte sin importar el tamaño y tipo de la empresa.

VI. REFERENCIAS

- [1] Gutiérrez P., H y De la Vara S., R (2008). "Análisis y Diseño de Experimentos", 2ª edición, Mc Graw Hill, (México) 322 p.
- [2] Montgomery D., C. (2004) "Diseño y Análisis de Experimentos". Wiley (Estados Unidos).
- [3] Barros Ch., D.J.; Valencia O., G. y Vargas H., L. (2014). Implementación del RCM II en planta de producción de lingotes de plomo. Scientia et Technica Año XIX, Vol. 19, No. 2. Disponible en: <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/articulo/view/8949/5791>
- [4] Caicedo S., N. y Pons M., R. (2011). "Optimización del Proceso de fabricación de Alambres de Aleación 6201 T-81". Revista INGE CUC Vol. 7 No. 1 pp 207-216. Disponible en: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4869031>
- [5] Meseguer V., J. L., Martínez C., E. y Portolés, A. (2014). "Optimización de las uniones soldadas en la aleación de aluminio 7010-t76 aplicando el método de taguchi." In: XVIII Congreso Internacional de Dirección e Ingeniería de Proyectos, Alcañiz, España. pp 890-902. Disponible en: http://aeipro.com/index.php/es/repository/congresos/congresos_alcaniz2014/congresos_alcaniz2014_03/OPTIMIZACION%20DE-LAS-UNIONES-SOLDADAS-EN-LA-ALEACION%20DE-ALUMINIO-7010-T76-APLICANDO-EL-METODO%20DE-TAGUCHI/CIDIP2014_0890_0902.pdf
- [6] Bernal G., S. y Trejo V. R. (2001). "Caracterización de un Proceso Químico Mediante la Técnica de Taguchi". Ciencia Tecnológica 16 pp. 29-32. Disponible en: www.redalyc.org/articulo.oa?id=94401706
- [7] Cruz R., E.A.; Restrepo C., J.E. y Medina V., P.D. (2008). Comparación de las metodologías clásica y Taguchi del diseño

- experimental en un ingenio azucarero del valle del cauca. *Revista Tecnura* 12 (23) :46-59. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257020605006>
- [8] Hernández R., M.A.; Santillán G.,S.; Sabelkin, V. y López P., M. (2003). Caso de aplicación del Método Taguchi en el diseño de herramientas de muestreo de hidrocarburos. *Ingeniería Mecánica vol 1* pp 91-101. Disponible en: http://revistasomim.net/revistas/1_3/art3.pdf
- [9] Salazar F., M. H.; Perdomo O., O. E. y Soto F., J. A. (1993). Diseño estadístico de experimento aplicado a refractarios Técnica Taguchi: dos ejemplos sencillos. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, Vol. 12, N° 1 Y 2, pp 85-88. Disponible en: www.rlmm.org/archives.php?f=.../RLMM%20Art-92V12N1-p85.pdf
- [10] Taguchi, G. (2005). *Taguchis Quality Engineering Handbook*. New York. Wiley. 1662 p.
- [11] Kavanaugh C.F. (2002). "Los diseños de Taguchi contra los diseños clásicos de experimentos". *Conciencia Tecnológica* 19. 5 p. J. J. Barrera S. (Trad.). Disponible en : <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94401906>
- [12] Kalpakjian S. y Schmid S.R. (2002). *Manufactura. Ingeniería y Tecnología*. (4ta ed.) México, D.F. Prentice Hall. Pearson Educación pp: 102-150, 261-278.
- [13] Morral F.R., Jimeno E., y Molera P. (2004). *Metalurgia General* Tomo II. Barcelona. Reverte. 1442 p.

VII. BIOGRAFÍA



Magallanes A. Jesús Francisco, 31 de marzo de 1984, Torreón Coahuila.

Maestría en Administración de Sistemas de Calidad, Universidad del Valle de México Campus Laguna, Torreón, Coahuila, México (2014). Ingeniería Industrial, Instituto Tecnológico de la Laguna, Torreón, Coahuila, México (2006)

El actualmente labora en la Metalúrgica Met-Mex Peñoles ubicada en boulevard Laguna 3200 poniente, Torreón, Coahuila, México, como Ingeniero Industrial A.



Herrera G. Ramon Alberto. Torreón Coah. México, 06 Agosto de 1984. Maestro en Administración y Alta Dirección de la Facultad de Contabilidad y Administración de la Universidad Autónoma de Coahuila (2010), Ingeniero Industrial egresado del Instituto Tecnológico de la Laguna (2006).

El actualmente labora en el Instituto Tecnológico de Torreón Ubicado en carretera Torreón-San Pedro

km 7.5, como Profesor de la Carrera de Ingeniería Logística impartiendo materias como Programación de procesos productivos, Gestión de mejora de procesos e Investigación de operaciones, ha ocupado cargos administrativos dentro de la Institución como Jefe de Departamento de Ingenierías (2012), Jefe de la División de Estudios Profesionales (2013) y recientemente Jefe del Departamento de Recursos Materiales y Servicios. Ha fungido como asesor de 12 proyectos de residencia profesional. Las líneas de investigación de interés están orientadas a la optimización de la producción, control de la calidad y análisis de tiempos y movimientos.



García L. Guillermo. Torreón, Coah. México, 14 de julio de 1959.

Doctorado en Ciencias (1996) y Maestro en Ciencias (1984) por el ITESM campus Monterrey. El actualmente labora en el Instituto Tecnológico de Torreón ubicado en carretera Torreón-San Pedro km 7.5, como Profesor-Investigador Titular C de tiempo completo en la División de Estudios de Posgrado e

Investigación. Ha impartido diferentes materias a nivel licenciatura y posgrado, ha dirigido 23 tesis de maestría en ciencias y es coautor del libro Técnicas de Riego publicado por Editorial MundiPrensa. Ha publicado diversos artículos científicos y participado como ponente en eventos científicos nacionales e internacionales. Ha impartido cursos de capacitación al personal docente de la DGEST. Las líneas de investigación de interés están enfocadas al uso eficiente del agua, agricultura protegida y producción de cultivos forrajeros.

El Dr. García es miembro de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo y del Colegio de Ingenieros Agrónomos, fue distinguido como Investigador Estatal en el Sistema de Investigación Estatal de Coahuila durante el periodo 2004-2006.



Cháirez A. Luvianka Ivonett. Torreón, Coah. México. 28 de febrero de 1976. Licenciada en Comercio Exterior y Aduanas por la Universidad Iberoamericana Plantel Laguna (1997), Certificada en Competencias de Enseñanza del Idioma Inglés como Segunda Lengua por la Universidad de Olds, Alberta, Canadá (2004) y Maestra en Innovación Educativa por la Universidad La Salle Laguna

(2012).

Desde febrero de 2003 a la fecha, se desempeña como Docente del Área de Ciencias Económico Administrativas del Instituto Tecnológico de Torreón ubicado en Carretera Torreón-San Pedro km. 7.5 de esta misma ciudad. Es actualmente responsable del Programa de Idiomas y de la Oficina de Servicios Externos perteneciente al Depto. de Gestión Tecnológica y Vinculación. Ha sido Jefa de la División de Estudios Profesionales de 2007 a 2010, Coordinadora de las carreras de Ingeniería en Logística e Ingeniería en Gestión Empresarial de 2012 a 2014, donde también ha impartido diferentes materias. Recientemente participó como ponente en el Congreso de Investigación de CIESLAG en mayo 2014 en la mesa de Educación.



Serrano R. María Paloma, 18 de julio de 1983, Torreón Coahuila.

Maestría en Ingeniería Industrial, Instituto Tecnológico de la Laguna, Torreón, Coahuila, México (2009) Ingeniería Industrial, Instituto Tecnológico de la Laguna, Torreón, Coahuila, México (2005).

Ella actualmente labora como Profesor de Tiempo Completo en la Universidad Tecnológica de Torreón, Torreón, Coahuila, México (2011). Además de ser Profesor de Asignatura en la Universidad Autónoma de Coahuila, Escuela de Sistemas (2012).



Rascón Escajeda Tania Elizabeth, Torreón, Coah. México. 23 de Junio de 1986

Licenciada en Mercadotecnia por la Universidad Autónoma de Coahuila (2009), se encuentra actualmente estudiando la Maestría en Administración de Negocios con especialidad en Mercadotecnia en la Universidad Tec Milenio Campus Laguna.

Actualmente labora en el Instituto Tecnológico de Torreón, como docente en el área de Ciencias Económico Administrativas. Ha impartido diversas materias dentro de las Ingenierías de Administración y Gestión Empresarial. Fue Jefa de oficina de Proyectos de Docencia y Jefa del Departamento de Desarrollo Académico y actualmente se desempeña como Jefa del Departamento de Gestión Tecnológica y Vinculación.