

## Metodología Seis Sigma en el Incremento de Producción de Spirulina

Freire Daniel<sup>1</sup>, Flor Omar<sup>2</sup> y Alvarez Gabriela<sup>3</sup>

{daniel.freire.balseca<sup>1</sup>, omar.flor<sup>2</sup>, gabriela.alvarez.velasco<sup>3</sup>}@udla.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-3149-5395><sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0001-5302-141X><sup>2</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-0882-3875><sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad de las Américas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Ingeniería en Biotecnología, Quito-Ecuador.

<sup>2,3</sup>Universidad de las Américas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Ingeniería Industrial, Quito-Ecuador.  
Quito - Ecuador

Recibido (09/03/20), Aceptado (27/03/20)

**Resumen:** En este trabajo se presentan resultados de mejora en la productividad de la *Arthrospira platensis* (spirulina) en una empresa dedicada a su producción. Se aplicó la metodología seis sigma en los procesos productivos que requieren el uso de biorreactores. Partiendo del análisis del estado actual, se identificaron aspectos, variables físicas y químicas que influyen directamente en la productividad alcanzada. Se probaron varios medios de cultivo que posteriormente se escalaron para su producción industrial. Además, se controló la incorporación de carbono al medio de cultivo, optimizando el rango de potencial hidrógeno pH. Se midieron los parámetros identificados y asignaron estrategias de la metodología seis sigma. Se comprobó una mejora en la productividad correspondiente al 66% con la misma calidad de producto final.

**Palabras Clave:** Seis sigma, biorreactores, productividad, *Arthrospira platensis*.

## Six Sigma Methodology in Increasing Spirulina Production

**Abstract:** This work presents results of improvement in the productivity of *Arthrospira platensis* (spirulina) in a company dedicated to its production. The six sigma methodology was applied in production processes that require the use of bioreactors. Starting from the analysis of the current state, aspects, physical and chemical variables that directly influence the productivity achieved were identified. Various culture media were tested and subsequently scaled for industrial production. In addition, the incorporation of carbon into the culture medium was controlled, optimizing the range of potential hydrogen pH. The identified parameters were measured and six sigma methodology strategies were assigned. An improvement in productivity corresponding to 66% was verified with the same quality of final product.

**Keywords:** Six sigma, bioreactors, productivity, *Arthrospira platensis*.



## I. INTRODUCCIÓN

La alta variabilidad de los parámetros químicos del cultivo de *Arthrospira platensis* como el pH, y la concentración de los compuestos químicos, además de la necesidad de un control adecuado de la temperatura han ocasionado la disminución de la vida productiva del cultivo, incrementando costos de producción y una baja rentabilidad de las productoras [1]. La metodología seis sigma que emplea los procesos DMAMC, cuyas siglas indican: definir, medir, analizar, mejorar y controlar. El uso de estas herramientas, permiten alcanzar los objetivos de mejora en un periodo corto de tiempo. Además, disminuye los errores en los procesos de forma significativa, contribuyendo de manera permanente en el control de dichas actividades [2].

La implementación de la metodología encamina a la reducción de los costos de producción y a la mejora de la productividad del proceso a partir de la optimización de recursos y materias primas. Por lo anteriormente expuesto, se considera esta metodología como ideal para la mejora del proceso productivo en las productoras. El presente proyecto encamina a mejorar la productividad del proceso de obtención de spirulina en al menos un 15%, mediante la implementación de la metodología 6  $\sigma$ , con el fin de crear un control estadístico, reducir los costos de producción y optimizar los recursos que inciden en el proceso productivo [3].

En la siguiente sección, se describe el proyecto implementado en la planta Industrial Andesspirulina C.A. En la sección de metodología, se explica las consideraciones para su implementación. Posteriormente se exponen resultados de los ensayos realizados y se evidencia la mejora en la productividad, finalizando con sus respectivas conclusiones.

## II. DESARROLLO

Para la ejecución de este proyecto, se identificaron los procesos más generales y representativos (Fig. 1) para la producción de espirulina. Se identificaron etapas generales como el escalado, biorreactores, tratamiento de medios de cultivo y concentración de spirulina [4].

Posteriormente se identificaron los parámetros físico-químicos que afectaban la variabilidad de la producción, considerando para ello la temperatura, tiempo, el pH, fuentes de carbono, nitrógeno y fósforo. Se plantó como meta lograr un 15% del proceso productivo de la biomasa de spirulina, presentada en la Fig. 1 [5].

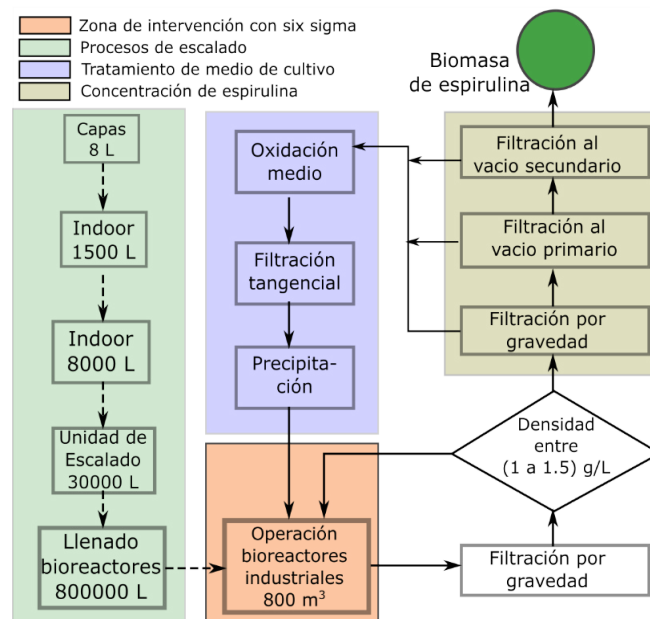


Fig. 1. Procesos para producción de spirulina a escala industrial

Para la intervención de mejora, se consideró relevante analizar los costos y procesos del área de producción de spirulina. Posteriormente, se requerirá la medición de variables físicas-químicas antes especificadas, que se ajustarán a un específico. Un posterior análisis de los datos adquiridos de las variables de control identificadas, servirá de base para la determinación de procesos de mejora a escala industrial.

Para la intervención de mejora, se consideró relevante analizar los costos y procesos del área de producción de spirulina. Posteriormente, se requerirá la medición de variables físicas-químicas antes especificadas, que se ajustarán a un específico. Un posterior análisis de los datos adquiridos de las variables de control identificadas, servirá de base para la determinación de procesos de mejora a escala industrial.

### III.METODOLOGÍA

En base a los direccionamientos de la sección de desarrollo y a los procesos presentados en la Fig. 1, se realizó un análisis del costo de producción de la situación actual del proceso. Se presenta además, un apartado sobre los planes de mejora que se realizarán en cierta etapa del proceso del cultivo en el Biorreactor, el mismo que constituye el proceso más representativo y en el que confluyen los demás procesos. Finalmente, se detalla un análisis de la producción a escala piloto.

#### A.Análisis de costo de la situación actual del proceso

Para definir las actividades operacionales de la producción de spirulina en todas sus etapas, se realizaron diagramas de flujo de procesos y se identificaron los diferentes procedimientos correspondientes a la Fig. 1, según la norma ISO 9000.

Los costos de producción de spirulina deshidratada se obtuvo tomando en cuenta como costos directos, la mano de obra directa (MOD), medio de cultivo, fertilizantes, control de pH y material de empaque. Para la

MOD, se estableció un valor monetario por hora considerando el sueldo base, beneficios de ley, fondos de reserva, el aporte patronal y los bonos de producción [6].

Los costos indirectos consideraron: mano de obra indirecta (MOI), energía eléctrica, insumos de limpieza, control de calidad, depreciación de máquinas, equipos e instalaciones y otros costos indirectos de fabricación, como consumo de agua, uniformes, material de protección para el personal, seguro de las instalaciones y alimentación [6].

Para los cálculos del costo por depreciación, se identificó la cantidad de equipos, área usada en cada proceso y aplicó el método de depreciación de línea recta, con un valor residual del 10% del costo del bien, una vida útil de 10 años para maquinaria y equipos, y de 20 años para instalaciones (construcción), según el reglamento ecuatoriano de ley tributaria, decreto 1051 [7].

Las variables del proceso para ser monitorizadas, se identificaron usando un diagrama de causa efecto con un método de estratificación o enumeración de causas, la cual se analizó en 4 pasos como se describe a continuación: (1) Identificación del problema, (2) Encontrar la causa del problema, (3) Matriz de priorización, (4) Evaluación de ponderaciones [8].

La identificación del problema fue la baja productividad del cultivo y el elevado costo de producción. Se empleó para la determinación del problema un diagrama causa efecto primario y secundario. La causa del problema se pudo corroborar del diálogo con los involucrados: Gerente Técnico, Jefe de Control de Calidad, Supervisores de cultivo y mantenimiento. Los mismos calificaron a la causa más importante con el valor de 5 y a la menos importante con el valor de 1. Validadas las encuestas se determinó que el proceso de incorporación de CO<sub>2</sub> poseía una alta variabilidad, falta de control de parámetros químicos y variabilidad en la temperatura.

#### B.Plan de Mejora para el proceso de producción

Para mejorar el proceso productivo, se optimizó la inyección de CO<sub>2</sub>, medición de parámetros químicos y la variabilidad en la temperatura en los biorreactores. Respecto a la inyección de CO<sub>2</sub>, se reemplazó la fuente productora de este gas, que antes combustionaba gas licuado de petróleo por generadores del gas puro.

Para la medición de las variables químicas se implementó un espectrofotómetro para la medición de diferentes compuestos químicos, como: NO<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>, Fe, etc. Para el control de temperatura se implementó una serie de termocuplas para las mediciones facilitando la medición constante en los biorreactores, permitiendo alcanzar temperatura óptima en menor tiempo.

En vista de que la inyección de CO<sub>2</sub>, es de suma importancia para el cultivo de spirulina, ya que constituye su fuente de carbono, se implementó un pHmetro digital portable para controlar su rango óptimo.

Mediante el empleo de los sistemas de medida incorporados, se monitorizó la inyección de CO<sub>2</sub> al proceso, el valor del pH, la temperatura, y las concentraciones de los compuestos químicos en el medio de cultivo se monitorizaron y compararon con patrones de soluciones establecidas para estos procesos [9]. Como referencia del valor

de pH, se calculó el valor de los índices ( $Z_s$ ) y ( $Z_i$ ) los cuales presentan la capacidad del proceso, el cual se basa en calcular la distancia entre las especificaciones y la media en unidades de la desviación estándar, mediante la ecuación 1 y 2, respectivamente.

$$Z_s = \frac{ES - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

$$Z_i = \frac{\mu - EI}{\sigma} \quad (2)$$

En donde, "ES" representa la especificación superior y EI es la especificación inferior  $\mu$  es la media de los datos y  $\sigma$  es la desviación estándar.

Estos datos fueron registrados y posteriormente ingresados al programa Statgraphics, en el cual se realizaron gráficas de control de lecturas individuales. Se calculó la capacidad del proceso y la desviación estándar a largo plazo, con una frecuencia mensual, para cada uno de los 5 biorreactores del proceso de producción de spirulina [10].

Con el mínimo valor de Z se calculó el nivel  $\sigma$  para cada biorreactor, después de los 6 meses de ensayo para las variables pH y temperatura.

Se definieron intervalos de tiempos para las mediciones del pH y la temperatura en el cultivo de spirulina, en cada uno de los 5 biorreactores. Para las variables químicas no se realizó el análisis del nivel  $\sigma$ , ya que no se poseía históricos de las mediciones, y fue parte del proyecto de mejora implementar el control de estas variables.

### Análisis de la productividad a escala piloto

Para mejorar la productividad y reducción de costos de producción, se realizó un ensayo a escala piloto (indoor), variando las materias primas que mayor impacto tienen en el costo de producción de spirulina [11]. Para el análisis se cambió la fuente de nitrógeno de  $KNO_3$  a  $(NH_2)_2CO$ , y se ensayaron con diferentes concentraciones de  $NaHCO_3$  en la formulación del medio cultivo. Se empleó un diseño central compuesto (DCC) con dos factores y dos niveles, representándolo en la ecuación 3.

$$N = 2^k + 2k + n \quad (3)$$

En donde, N es el número de tratamientos o corridas experimentales, k los factores (fuente de nitrógeno y carbono), y n el número de repeticiones de cada tratamiento. Se consideró nueve tratamientos y dos puntos sobre cada eje a una distancia  $\pm\alpha$  respecto al origen, representada en la Ecuación 4.

$$\alpha = (F)^{1/4} \quad (4)$$

En donde, F es el número de puntos en la parte factorial y  $\alpha$  es la distancia del eje respecto al origen.

Para el análisis estadístico de los resultados se empleó un análisis de varianza (ANOVA) con un intervalo de confianza del 95% ( $p \leq 0,05$ ), para la productividad de spirulina [12].

Para el análisis económico del costo beneficio del cambio de materias primas, se consideraron 4 casos: modelo de producción actual, caso optimista, caso malo y caso deseado. Para la evaluación de estos casos, consideraron indicadores económicos: tasa interna de retorno (TIR), valor actual neto (VAN) y el indicador costo beneficio (CBC) [13]. Para los cálculos se usó un valor de precio venta al público de 25 USD/kg como ingreso y una tasa de costo de capital del 10%.

La viabilidad y rentabilidad del proyecto de mejora, consistió en reducir el costo de producción cambiando materias primas y controlando los procesos productivos de spirulina. Luego de la implementación, se socializó a todo el personal de la planta, las modificaciones que se implementaron en los diferentes procesos para la obtención de spirulina deshidratada [14].

El análisis de la mejora económica se basó en el cálculo de los costos directos e indirectos de todos los procesos de producción en hojas de cálculo, considerando los siguientes rubros: Costos directos: MOD, fertilización, control de pH, material de empaque, agua y medio de cultivo; y como costos indirectos: MOI, GLP, análisis químicos,

análisis microbiológicos, energía eléctrica, insumos de limpieza, caja chica, mantenimiento, uniformes, servicios externos, comida, depreciaciones, seguro de daños de máquinas y calibraciones [15].

Para evaluar la mejora, se realizó un análisis comparativo de la productividad obtenida de la producción en gramos dividida para el área y el número de días. Se obtuvieron los costos de producción por procesos, se calculó el costo por metro cubico de medio de cultivo y finalmente se obtuvo el ahorro monetario, considerando el costo por procesos y producción obtenida con el sistema mejorado [16].

#### IV.RESULTADOS

##### A.Análisis de costo de la situación actual del proceso

La Fig. 1, empleada en el desarrollo y usada para identificar la zona de intervención con metodología seis sigma, se obtuvo un diagrama de flujo, considerando etapas y equipos de los procesos más representativos. En la TABLA I., se presenta los costos del medio de cultivo del sistema actual, por m<sup>3</sup>.

**TABLA I. Costo del medio de cultivo por m<sup>3</sup>.**

| Medio de cultivo               | Costo (USD/m <sup>3</sup> ) |
|--------------------------------|-----------------------------|
| NaHCO <sub>3</sub>             | 8,00                        |
| NaCl                           | 0,15                        |
| K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 1,15                        |
| MgSO <sub>4</sub>              | 0,01                        |
| CaCl <sub>2</sub>              | 0,01                        |
| KNO <sub>3</sub>               | 4,11                        |
| H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> | 0,30                        |
| Total                          | 13,73                       |

En la TABLA II., se puede observar que las materias primas NaHCO<sub>3</sub> y KNO<sub>3</sub> son las que mayor valor económico aportan al medio de cultivo, alcanzan un valor de 12,11 USD/m<sup>3</sup>, que corresponde al 88% de participación en el costo. Los parámetros a ser monitorizados se determinaron mediante un diagrama causa efecto, aplicando el método de las 6M para el problema de baja productividad por la falta de control de las variables, que intervienen en el proceso de producción de spirulina e inadecuado proceso de control de pH [17]. En la TABLA II., se presentan los resultados de las causas del problema de baja productividad.

**TABLA II. Causas de baja productividad en producción de spirulina**

| No | Causa / Problema a la baja productividad del proceso de cultivo de spirulina. | Participantes |   |   |   | Total |
|----|---|---------------|---|---|---|-------|
|    |   | A             | B | C | D |       |
| 1  | Elevado costo en productos de fertilización                                   | 2             | 2 | 2 | 3 | 9     |
| 2  | Falta de control de parámetros químicos                                       | 3             | 4 | 3 | 2 | 12    |
| 3  | Variabilidad en el pH   | 4             | 4 | 3 | 3 | 14    |
| 4  | Variabilidad en la temperatura de los biorreactores                           | 3             | 4 | 3 | 3 | 13    |

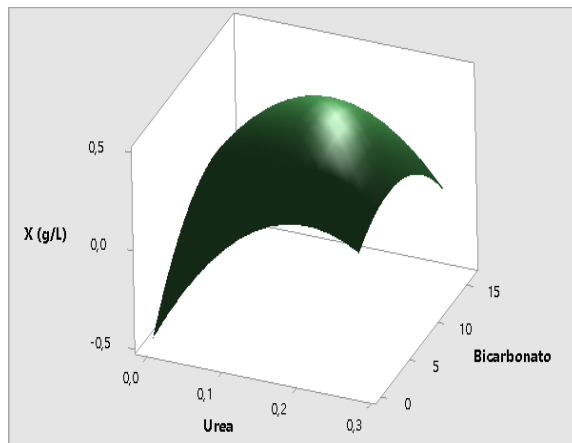
La causa del problema fue una mala incorporación de carbono al proceso de cultivo, por medio de la combustión de gas licuado de petróleo (GLP), lo que ocasionó que el pH del medio de cultivo del proceso de obtención de spirulina alcance valores de 11,5 a 12,0; lo que ocasionaba problemas de precipitación de compuestos químicos y por tanto, un desbalance en las concentraciones. Según Vonshak [18], los valores aconsejables de pH para el proceso de cultivo de spirulina están en un rango de 9,0 a 10,5.

El sistema de manejo del pH con la quema del gas licuado de petróleo (GLP), no presentó un proceso controlado ya que, en las observaciones, se encontraban fuera de los límites de la especificación, presentando más del 45% de sus observaciones fuera de los límites de control. Este proceso presentó un nivel 1  $\sigma$  ya que el valor de Z calculado fue de -1,80. La variable temperatura presentó todos los puntos dentro de los límites de control, a pesar de ello se

calculó una alta desviación estándar de  $6,48^{\circ}\text{C}$  y un valor  $Z = 3,47$ , lo cual indica que se encuentra en un nivel de  $\sigma$  de 3,50.

Los datos de pH y temperatura fueron registrados a lo largo de todo el proceso de producción de spirulina que fue de 6 meses, teniendo alrededor de 552 datos para cada uno de los 5 biorreactores. Para las variables químicas del cultivo se obtuvieron 6 mediciones a lo largo del proyecto de mejora. Los límites de la especificación y registros no se presentan debido a cuestiones de confidencialidad de la empresa.

El medio de cultivo optimizado, varió su concentración de  $\text{NaHCO}_3$  y cambió el  $\text{KNO}_3$  por  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ , con cuyo cambio se redujo el costo del proceso productivo. En la Fig. 2, se presenta el gráfico de superficies del diseño central compuesto como representación del modelo y el comportamiento de las diferentes concentraciones de  $\text{NaHCO}_3$  y  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  respecto a la variable de respuesta (crecimiento).



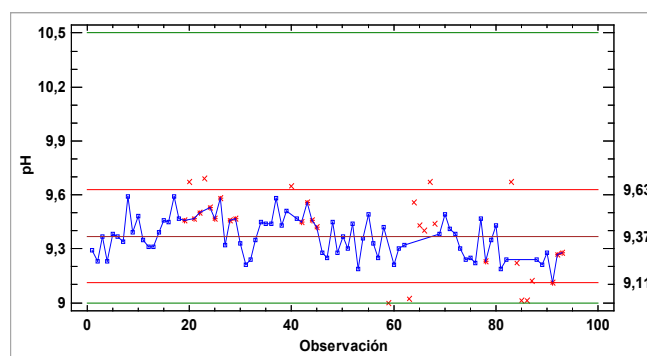
**Fig. 2. Superficie de crecimiento de spirulina X (g/L) vs.  $\text{NaHCO}_3$  y  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$**

Tomando en cuenta el costo de producción inicial, y un antiguo valor de TIR del 2%, se confirma desde el punto de vista económico, que el proceso no era rentable. Respecto del proyecto implementado, este, presentó un valor de TIR del 10% evidenciando y dándole el carácter de viable al proceso de mejora.

Para la mejora en la operación continua de los biorreactores, se aplicó un plan que define la gestión para solucionar los problemas de mala incorporación de  $\text{CO}_2$  y control de las variables físicas y químicas del cultivo.

Una vez concluidos los cambios en el proceso de producción se realizó el control del sistema desde el punto de vista técnico y también el económico.

Con la planta a máxima producción se obtuvieron los resultados de los valores económicos presentándolos como costos directos e indirectos; estos valores fueron calculados después de implementar la mejora técnica en los procesos de producción de spirulina anteriormente mencionados, disminuyendo el costo unitario de producción (USD/kg) en un 58%. En la Fig. 3., se presenta una gráfica de control de lecturas individuales del biorreactor 3 al sexto mes de control. Se observa el proceso dentro de los límites establecidos con una variabilidad no sistemática y comportamiento normal.



**Fig. 3. Control de lecturas del valor de pH del biorreactor en el sexto mes de operación.**

En el sistema de producción anterior se obtuvo el costo unitario el cual fue de 21,15 USD/kg y con el sistema de producción mejorado el costo promedio de producción en los 6 meses de análisis bajo a 13,36 USD/kg teniendo una disminución del 58,3%. Mediante el análisis de optimización del medio de cultivo al cambiar y modificar las materias primas ( $\text{NaHCO}_3$  y  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ ), El costo del nuevo medio de cultivo es de 6,77 USD/m<sup>3</sup> comparando con el costo de medio de cultivo de sistema de producción anterior, el cual fue de 13,76 USD/m<sup>3</sup>

El ahorro monetario mensual aproximado en la operación de la planta, es de 16 000 USD considerado un aumento de un 37% de la producción. Además, se mejoró el costo promedio unitario de producción a 13,36 USD/kg. Lo cual demuestra que el proyecto de mejora seis sigma ayudó a elevar la rentabilidad de la planta de producción AndesSpirulina C.A.

## V.CONCLUSIONES

El alto costo en el proceso de producción de spirulina fue afectado por el uso de las materias primas  $\text{KNO}_3$  y  $\text{NaHCO}_3$  y además influenciado por las continuas actividades de escalado, las cuales demandan de altas cantidades de medio de cultivo y mano de obra directa, debido a que la vida útil del cultivo era de máximo 4 meses debido a un control deficiente.

El diseño central compuesto, permitió optimizar un nuevo medio de cultivo a escala piloto, el cual se implementó a escala industrial y se mantuvo en una productividad promedio de 4,16 g·m<sup>2</sup>/d. La optimización de las fuentes de nitrógeno y carbono contribuyó a disminuir a la mitad, el costo del medio de cultivo en el proceso de producción de spirulina, y mejoró la optimización de recursos en los diferentes subproceso.

El proceso de mejora, permitió bajar las actividades de escalado de 3,0 a 1,5 por año, ya que el deterioro fisiológico del cultivo se redujo con el control continuo de las variables del proceso de cultivo, evidenciándose con el aumentando de un 33% en la producción de spirulina. La implementación de cartas de control facilitan el mantenimiento de las variables del proceso de producción, dentro de sus límites de control respectivos, a aumentando la vida productiva del cultivo de spirulina en su proceso de obtención.

## REFERENCIAS

- [1]E. Ariawan y A. Makalew, “Smart Micro Farm: Sustainable Algae Spirulina Growth Monitoring System” in 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), Bali, 2018, pp. 1-4.
- [2]L. Socconini y C. Reato, Lean six sigma: sistema de gestión para liderar empresas. Primera edición. Barcelona: Marge Books, 2019.
- [3]H. Gutiérrez, Calidad y productividad. Cuarta edición. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana, 2014.
- [4]G. Usharani, P. Saranraj y D. Kanchana, “Spirulina Cultivation: A Review” in International Journal of Pharmaceutical & Biological Archives, vol. 3, no. 6, pp. 1327-1336, December 2012.
- [5]J. Udin, O. Gani, A. Mahato, I. Sakib and M. Rakiuzzaman, SPIRULINA (Spirulina platensis) PRODUCTION IN DIFFERENT PHOTOBIOREACTORS ON ROOFTOP, International Journal of Business, Social and Scientific Research, vol. 8, no. 1, pp. 15-19, January 2020.
- [6]M. Arredondo, Contabilidad y análisis de costos. Primera edición. México D.F.: Grupo Editorial Patria, 2015.
- [7]J. García, Contabilidad de costos. Cuarta edición. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana, 2014.
- [8]L. Socconini, Certificación Lean Six Sigma Green Belt para la excelencia en los negocios. Primera edición. Barcelona: Marge Books, 2015.
- [9]A. Vian, Introducción a la Química Industrial. Segunda edición. Buenos Aires: Reverté, 2012.
- [10]S. Milton, Estadística para Biología y Ciencias de la Salud. Tercera edición. Madrid: McGraw-Hill Interamericana, 2014.
- [11]M. Messmacher, V. Rubio y M. Andrade, Crecimiento y Productividad. Tomo I. Primera edición. México D.F.: Fondo de Cultura Económica, 2018.
- [12]H. Gutiérrez, R. de la Vara, Análisis y diseño de experimentos. Tercera edición. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana, 2012.
- [13]G. Baca, Ingeniería económica. Sexta edición. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana, 2015.
- [14]J. De Freitas y H. Costa, “Impacts of Lean Si Sigma over organizational sustainability”, in International Journal of Lean Six Sigma, vol. 8, no. 1, pp. 89-108, January 2017.

- [15]R. López, “Proyecto de reducción de costos mediante el seis sigma y su impacto financiero”, Tesis de fin de Máster en Administración, Facultad de Contaduría y Administración, Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro, Qro., 2013.
- [16]D. Silva, “Teoría de indicadores de gestión y su aplicación práctica”, Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Informe de Gestión Efectiva de Emprendimiento Social, no. 1, 2016.
- [17]E. Navarro, V. Gisbert y A. Pérez, “Metodología e implementación de Six Sigma” en 3C Empresa: Investigación y pensamiento crítico, Edición especial, pp. 73-80, Diciembre 2017.
- [18]A. Vonshak, *Spirulina platensis (Arthrospira) Physiology, Cell-biology and Biotechnology*. Primera edición. Inglaterra: Taylor & Francis, 1997.