ESCUELA DE ESTUDIOS DE
POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA

REVISTA 2019

DE LA ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA, GUATEMALA. AÑO 10, NÚMERO 1

La Revista de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería publica investigaciones originales de los diferentes campos de la ingeniería. Constituye una publicación en formato digital en la plataforma institucional Repositorio USAC, en línea y anual en formato impreso.

REEP

Año 10

N° 1

2019

Autores:	Escuela de Estudios de Postgrado EEP (Facultad de Ingeniería USAC)
Títulos:	Revista de la Escuela de Estudios de Postgrado, FIUSAC
Imp / Ed.:	Guatemala: Escuela de Estudios de Postgrado, USAC, 2019.
Idioma:	Esp.
Descripción:	#p . ; il. 27 cm
Ejemplares:	2019: Año 10, N° 1 (publicación anual)
ISSN:	2518-4725
Temas:	Ingeniería - Revistas

CC BY NC ND

Revista de la Escuela de Estudios de Postgrado, Vol. 10 No. 1, año 2019.
ISSN 2518-4725.

ESCUELA DE ESTUDIOS DE
POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA

AUTORIDADES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada, DECANA.

Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez, SECRETARIO ACADÉMICO.

JUNTA DIRECTIVA

Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada, DECANA.

Ing. José Francisco Gómez Rivera, VOCAL I.

Ing. Mario Renato Escobedo Martinez, VOCAL II.

Ing. José Milton de León Bran, VOCAL III.

Br. Christian Moisés De la Cruz Leal, VOCAL IV.

Br. Kevin Vladimir Armando Cruz, VOCAL V.

Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez, SECRETARIO ACADÉMICO.

©Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Estudios de Postgrado, 2019.
Los textos publicados en este documento son responsabilidad exclusiva de sus autores.

ISSN 2518-4725.

Directorio

Revista de la Escuela de Estudios de Postgrado Año 10. Número 1
Escuela de Estudios de Postgrado, Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala,
Edificio S11, Primer nivel, Ciudad Universitaria, zona 12

CONSEJO EDITORIAL

Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí.
Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de Ingeniería.
USAC.

Dra. Mayra Virginia Castillo Montes. Editora.
Profesora de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.
USAC.

Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque.
Profesor de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.
USAC.

Mtro. Armando Fuentes Roca.
Profesor de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.
USAC.

Mtra. Hilda Palma Ramos.
Profesora de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.
USAC.

Dr. Marvin Roberto Salguero Barahona.
Profesor de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.
USAC.

Dr. Alfredo Salvador Gálvez Sinibaldi.
Profesor de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.
USAC.

COMITÉ EDITORIAL

Mtra. Anabelle Castro Castro.
Instituto Tecnológico de Costa Rica. Sede San Carlos.

Mtro. Marlon Antonio Pérez Turk.
Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Dra. Marta Guisela Gaitán Garavito.
Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Dra. Casta Petrona Zeceña Zeceña.
Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Mtro. Walter Arnoldo Bardales Epinoza.
Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Dr. Renato Giovanni Ponciano Sandoval.
Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Mtra. Krista Ivonne Aguilar Ovando.
Consultora Independiente.

COMITÉ CIENTÍFICO

Mtro. Esteban Ballestero Alfaro.
Instituto Tecnológico de Costa Rica. Sede San Carlos.

Dr. José Luis Argueta Mayorga.
Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Dra. Waleska Aldana Segura.
Universidad Galileo. Guatemala.

Mtro. Daniel Augusto Sosa González.
Universidad Centroamericana José Simeón Cañas.
El Salvador.

Mtro. Erlin Felipe Chiquitó.
Consultor independiente.

COORDINACIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA

Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí.
Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de Ingeniería.

Dra. Mayra Virginia Castillo Montes.
Editora.

Andrea María Calderón Castillo
Diseño y Diagramación.

Mtra. Hilda Myriam Méndez de Avila.
Revisión Linguística.

Revista de la Escuela de Estudios de Postgrado, Vol. 10 No. 1, año 2019.
ISSN 2518-4725.

FACULTAD DE INGENIERÍA

Universidad de San Carlos de Guatemala

MISIÓN

Formar profesionales de la ingeniería con valores éticos, capaces de generar y adaptarse a los cambios del entorno, conscientes de la realidad nacional y comprometidos con la sociedad, para que, a través de la aplicación de la ciencia y la tecnología apropiada, contribuyan al bien común y desarrollo sostenible del país y la región.

VISIÓN

Ser una institución académica con incidencia en la solución de la problemática nacional, formando profesionales emprendedores en distintas áreas de la ingeniería, con sólidos conceptos científicos, tecnológicos, éticos y sociales, fundamentados en la investigación y promoción de procesos innovadores orientados hacia la excelencia profesional.

ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

MISIÓN

Formar maestros de la ingeniería para que sean competitivos y fomenten el desarrollo del país, a través de su emprendimiento de forma ética y responsable con la realidad nacional.

VISIÓN

Ser innovadores en la formación profesional a nivel de postgrado, con liderazgo y sólidos conocimientos de la ciencia y la tecnología, sin olvidar a la sociedad que demanda la excelencia académica.

Revista de la Escuela de Estudios de Postgrado, Vol. 10 No. 1, año 2019
ISSN 2518-4725.

Editorial

La investigación y la divulgación de sus resultados, productos y aportes al desarrollo de la ciencia, la tecnología y la sociedad, son ejes fundamentales del proyecto académico implementado por el equipo docente y administrativo que colabora en el impulso de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

La publicación del presente volumen de la Revista de la Escuela de Estudios de Postgrado, es un resultado tangible de los esfuerzos conjuntos de las autoridades, investigadores, profesionales que integran el Comité Editorial, el Consejo Editorial y el Comité Científico, a quienes se expresa muestras de reconocimiento.

Los resultados de investigación que se presentan, abarcan diferentes perspectivas para el estudio de la sostenibilidad de cuerpos lénticos, acuíferos y subcuencas, tanto de Guatemala como de otros países. La aplicación de ciencias básicas y ciencias de la ingeniería, generan modelos para realizar pronósticos en actividades económicas, trasporte de carga marítima y optimización de tiempos en procesos industriales. De suma importancia se consideran los resultados de estudios de ahorro energético y satisfacción de normas de calidad en la industria azucarera. La innovación tecnológica se refleja en un estudio que describe el prototipo de una arquitectura multiservidor que promueve el uso de la tecnología con fines de aprendizaje en un sentido amplio.

Con mucha satisfacción se comparte a la comunidad de docentes e investigadores de los diferentes campos de la ingeniería y ciencias afines, así como a docentes y estudiantes de carreras de ingeniería y de programas de postgrado, que este importante órgano de divulgación científica se encuentra en una etapa avanzada del proceso de indexación, por lo que en el futuro cercano la Facultad de Ingeniería contará con otro medio de difusión del conocimiento generado por medio de la investigación científica.

Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana
Facultad de Ingeniería

Revista de la Escuela de Estudios de Postgrado, Vol. 10 No. 1, año 2019.
ISSN 2518-4725.

Tabla de contenidos

ARTÍCULO DE LA DIRECCIÓN

Prefacio 9
Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí

AUTORES INVITADOS

Sostenibilidad e implicaciones en el aumento de las tasas de bombeo del acuífero de Nejapa, El Salvador 12
Mtra. Marcia Lizeth Barrera de Calderón

Reducción del tiempo de preparación de una línea de envasado implementando la técnica Single Minute Exchange of DIE (SMED) 17
PhD. Edward Mario Agusto Guerrero Gutiérrez, Ing. Glenda Carolina Zuñiga Garrido

ARTÍCULOS DE DOCTORADO

Metodología para determinar la sostenibilidad del Lago de Atitlán, basándose en la Huella Hídrica 26
Dr. Dennis Salvador Argueta Mayorga

Modelación y prospección de la sostenibilidad hídrica 32
Dr. Leonel Ignacio de la Paz Gallardo

ÁREA DE CIENCIAS APLICADAS

Modelo de regresión lineal aplicado a la cantidad de contenedores a movilizar en Puerto Santo Tomás de Castilla, Guatemala 40
Mtro. Antonio Daniel Asencio Marroquín

Pronósticos de corto plazo del comportamiento de la actividad manufacturera de productos plásticos en Guatemala, a partir de una encuesta de opinión empresarial 44
Mtro. Elmer Humberto Lémus Flores

ÁREA DE DESARROLLO SOCIO AMBIENTAL Y ENERGÉTICO

Ahorro energético mediante la implementación del uso de variadores de frecuencia, en el tratamiento de jugo de caña de azúcar, Ingenio la Unión 49
Mtro. Luis Enrique González Pivaral

Estudio energético para el cumplimiento de parámetros de la norma ISO 50001 en una refinería de azúcar 53
Mtro. Edy René Aguilar Chic

ÁREA DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

Prototipo de una arquitectura multiservidor basada en el modelo utilizado en los juegos en línea tipo MMO (Massively Multiplayer Online) 58
Mtro. Gabriel José Ortíz Flores

ISSN 2518-4725.

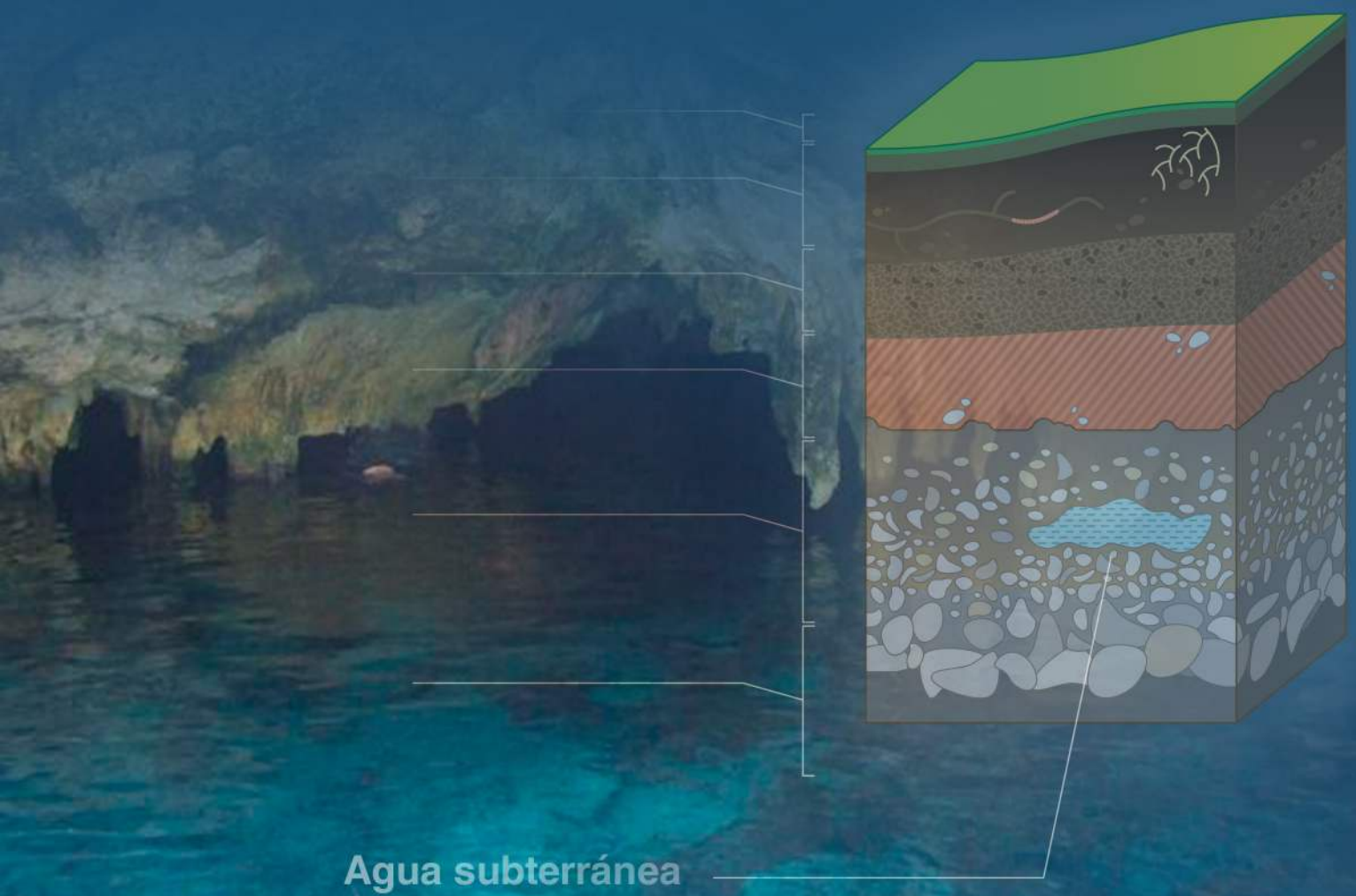
PREFACIO

Edgar Darío Álvarez Cotí
Mtro. en Docencia Universitaria
Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería
Correspondencia al autor: edalvarezc95@gmail.com

Los diferentes avances tecnológicos y científicos del siglo XXI implican cambios importantes en el ámbito académico e industrial. La primera revolución industrial fue con el carbón y el hierro en el siglo XVII y siglo XVIII. Luego el transporte con la locomotora de vapor. La segunda revolución fue el desarrollo de los sistemas electrónicos, la televisión, radio, la transmisión, alimentos deshidratados y enlatados, la aviación a principios y mediados del siglo XX. La tercera revolución tecnológica e industrial fue de los años 50s a los años 90s con la exploración del espacio, los sistemas y tecnologías de la información, el internet. Actualmente estamos en la cuarta revolución industrial que se le ha llamado Industria 4.0. Esto incluye la Inteligencia artificial, la biotecnología y nanotecnología, la mecatrónica medicina y educación virtual a distancia. Los modelos matemáticos la simulación, la Gestión Integral de los Recursos Hídricos más específicamente el Agua. Son algunos de los temas abordados en los artículos de la Revista de Postgrado en ingeniería del año 2019.

La investigación aplicada a solucionar problemas nacionales y regionales como el transporte, la energía, la salud, la infraestructura, nuevos materiales también son temas de interés para el país y que tienen como medio de divulgación nuestra revista de la Escuela de Postgrado . Esperamos contribuir con este medio profesional al desarrollo de Guatemala y la región con artículos multidisciplinarios y de relevancia en el ámbito regional, parte de nuestros productos en las diferentes Maestrías y especialidades; algunos de estos programas de postgrado también son impartidos en algunos centros regionales departamentales de la Universidad, la Maestría virtual en Gestión Municipal y el Doctorado en Cambio Climático y Sostenibilidad de la Facultad de Ingeniería.

AUTORES INVITADOS



Revista de la Escuela de Estudios de Postgrado, Vol. 10 No. 1, año 2019.
ISSN 2518-4725.

SOSTENIBILIDAD E IMPLICACIONES EN EL AUMENTO DE LAS TASAS DE BOMBEO DEL ACUÍFERO DE NEJAPA, EL SALVADOR

Sustainability and implications in the increase of pumping rates of the Acuífero de Nejapa, El Salvador

Marcia Lizeth Barrera de Calderón
Mtra. en Gestión de Recursos Hidrogeológicos
Correspondencia al autor: marcia.barrera@ues.edu.sv

Recibido: 15 de septiembre 2019 | Revisado: 17 de octubre 2019 | Aprobado: 20 de noviembre 2019

Resumen

El acuífero de Nejapa (AN) se caracteriza por su buena calidad e importancia para el abastecimiento del Área Metropolitana de San Salvador e importantes industrias que utilizan agua como materia prima. Tal situación ha preocupado a diversos actores ante un eminente agotamiento del acuífero por el aumento de las extracciones. Con el objetivo de comparar las entradas y salidas de agua en el AN y determinar las implicaciones que tendría un aumento en sus extracciones, se elabora un balance de agua subterránea en la microcuenca del río San Antonio (RSA). La investigación incluye un detallado levantamiento de las extracciones y aforos en el RSA donde se presenta la mayor descarga del acuífero. Los resultados indican que podría haber un aporte externo al sistema de aproximadamente 3.8 millones de metros cúbicos al año (Mm³/año), ya que los aforos tanto en el nacimiento como en la salida de la microcuenca superan a las descargas naturales estimadas en el Balance. El aumento en las extracciones se vería reflejado en una reducción del caudal del río.

Palabras clave

Tratamientos térmicos, estructuras metalográficas, transformaciones alotrópicas, perlita, martensita.

Abstract

The Nejapa aquifer (AN) is characterized by its good quality and importance for the supply of the San Salvador Metropolitan Area as well as important industries that use water as raw material. This condition has worried various actors for an eminent depletion of the aquifer due to the increase in extractions. With the objective of comparing water inflows and outlets in the AN and determining the implications that an increase in their extractions would have, a groundwater balance was prepared in the San Antonio River microbasin (RSA). The research included a detailed gathering of extractions and water flow gauging in the RSA where the largest aquifer discharge occurs. The results indicate that there could be an external contribution to the system of approximately 3.8 million cubic meters per year (Mm³ / year), since the gaps both at the source of the river and at the exit of the microbasin exceed the natural discharges estimated in the groundwater balance. The increase in extractions would be reflected in a reduction in the river volume.

Keywords

Heat treatments, metallographic structures, allotropic transformations, pearlite, martensite.

ISSN 2518-4725.

Los balances de agua subterránea son herramientas importantes para la planificación hídrica y la definición de acciones de manejo sostenible que garanticen agua en calidad y cantidad a las actuales y futuras generaciones. El acuífero de Nejapa se encuentra localizado en la microcuenca del río San Antonio, departamento de San Salvador, El Salvador. Ha sido objeto de conflictos sociales y preocupación por parte de los usuarios y organizaciones ambientalistas, ya que se considera sobreexplotado. Por ello que diversos autores (Ponce de León Gil, de San Antonio Escribano, Mañé Jané, Seisdedos Santos, 2003; Gil, 2007; Barrera de Calderón y Juárez, 2013) se han preocupado por establecer un balance de agua subterránea que brinde información sobre el grado de explotación que tiene el acuífero y las implicaciones de un aumento en las extracciones. En este artículo se presentan resultados de un nuevo balance de agua subterránea en el acuífero, que incluye nuevas mediciones en el caudal del RSA.

Desarrollo del estudio

El balance de agua subterránea requiere la estimación de entradas y salidas en el acuífero. Como entradas al sistema se considera la recarga de agua subterránea, asumida como la recarga hídrica potencial (Ec. 1), utilizando la metodología propuesta por Schosinsky (2006), adicionalmente, se considera los retornos por fugas del sistema de agua potable.

$$P=Int+ETR+Esc+I\pm\Delta HS \qquad (1)$$

donde, para un período de análisis definido, P, corresponde a la precipitación; Int, es la intercepción de lluvia en la vegetación; ETR, es la evapotranspiración real; Esc, corresponde a la escorrentía superficial; I, es la infiltración que sobrepasa la zona radicular y es igual a la Recarga Hídrica Potencial; finalmente, ΔHS, es el cambio en la humedad del suelo en la zona radicular.

La precipitación mensual se toma como un promedio multianual utilizando datos de lluvia para un registro de 30 años (1971-2001) y la evapotranspiración potencial se determina a partir de las ecuaciones de correlación Altitud – Evapotranspiración de Referencia (Servicio Hidrológico Nacional, 2005) para el mismo período.

El balance de humedad de suelo se determina a escala mensual para cinco zonas con capacidad de infiltración aproximadamente homogénea, determinada por medio del uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), con los cuales se realizan operaciones matemáticas de ráster a partir de la distribución espacial de la pendiente, textura y ocupación del suelo.

Las salidas, contabilizadas como la evapotranspiración real, se estiman para cada zona tomando en consideración la capacidad de campo, punto de marchitez permanente y densidad aparente del suelo, tomando como máximas salidas la evapotranspiración potencial.

Las fugas en el sistema de agua potable se asumen como un 25 % del caudal abastecido a la población de la zona de estudio.

Por su parte, las salidas artificiales del acuífero se contabilizan y depuran con el inventario de extracciones en pozos realizado en campo. Además, se realizan aforos en el RSA en los años 2013, 2015 y 2019, para calibrar el Balance. Los resultados se comparan con otros estudios de la zona.

Resultados obtenidos

a. Recarga de agua subterránea

La Figura 1 presenta la distribución de la recarga hídrica potencial en las cinco zonas con similares características de capacidad de infiltración. Los resultados indican que la recarga varía entre 244.22 y 621.25 mm/año, lo cual representa un caudal de 614.85 L/s.

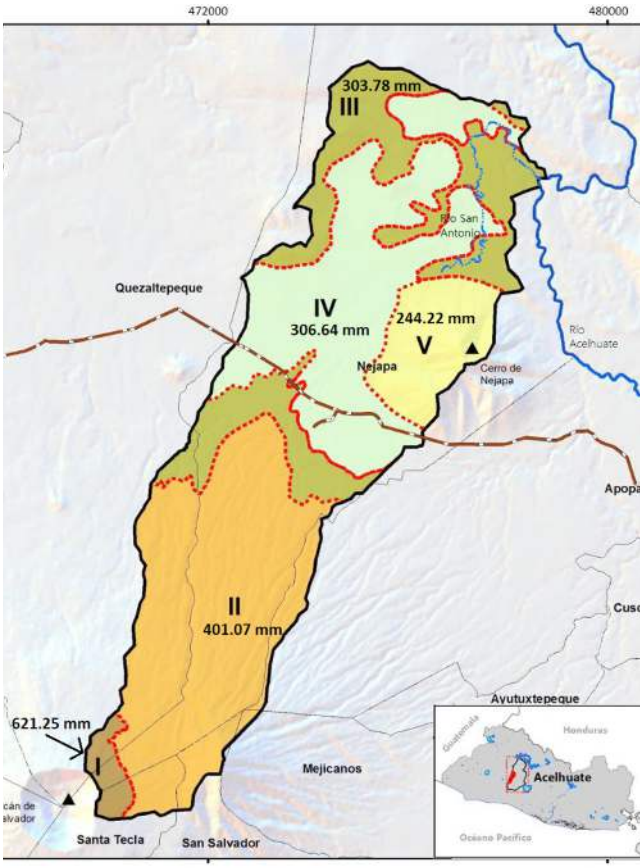


Figura 1. Recarga media anual de agua subterránea en la microcuenca del río San Antonio mostrando su variabilidad espacial.

b. Retornos por fugas del sistema de agua potable

El caudal circulante en la ciudad de Nejapa es de 21.44 L/s y se estima a partir de información de las empresas estatal y municipal que proveen agua a la población. El 25 % corresponde a 5.36 L/s.

c. Extracciones por bombeo

De un total de 30 pozos y captaciones reportados en el inventario existente, solamente 20 (67 %) están en uso. Los caudales reportados para los pozos de la zona varían entre 1 y 34 L/s, mientras que las captaciones en el nacimiento del río rinden caudales de hasta 60 L/s. En total se contabiliza las extracciones en 403.67 L/s. De los cuales se estima que el 90 % lo extrae la empresa estatal de agua, el restante 10 % es aprovechado por industrias y un relleno sanitario existente en la zona.

d. Variación del caudal base en el río San Antonio

Aunque se carece de un monitoreo permanente del caudal del RSA, se han reportado mediciones de caudal base durante los años 2007, 2013, 2015 y 2019, resultando un valor medio de 251 L/s, en el año 2015 el caudal mínimo reportado a la salida de la cuenca es de 337 L/s en el mes de mayo y 340 L/s en el mes de junio. La tabla 1 presenta el registro de caudales para dichos años

Tabla 1

Caudal base en el nacimiento del río San Antonio en el período 2007-2019

Año	Caudal (L/s)
2007	251
2013	257
2015	253
2019	243

Fuente: Gil, 2007; Barrera de Calderón, 2010; López Hernández y Barrera de Calderón, (2019).

d. Balance de agua subterránea en la microcuenca

La tabla 2 presenta los resultados del balance de agua subterránea para el acuífero de Nejapa, tomando como unidad de análisis la microcuenca del río San Antonio.

De acuerdo a los resultados, sin considerar entradas externas a la microcuenca el acuífero tendría descargas de 216.57 L/s, equivalentes a 6.81 Mm³/año.

Tabla 2

Balance de agua subterránea de la microcuenca del río San Antonio

Parámetro	Entradas L/S	Salidas L/S
Recarga potencial	614.85	251
Retornos por fugas	5.39	257
Extracciones por bombeo		403.67
Total	**620.24**	**403.67**
Otras descargas(QRSA)	216.57	

Fuente: elaboración propia.

ISSN 2518-4725.

Discusión de resultados

Los resultados del Balance de Agua Subterránea presentados en la Tabla 2, reflejan una diferencia considerable entre las descargas del acuífero de Nejapa, cuantificadas en la microcuenca del RSA como un sistema cerrado y los datos de caudal base en el nacimiento del río y la salida de la microcuenca (35 L/s y 121 L/s, respectivamente). Parte de las diferencias pueden atribuirse a la dificultad en la estimación de la recarga de agua subterránea, tal y como lo consideran Scanlon, Healy y Cook (2002).

Asimismo, puede haber cierta diferencia en la cuantificación de las extracciones, sin embargo, las descargas medidas duplican aproximadamente a las calculadas, lo cual podría indicar que el sistema no es completamente cerrado como se ha considerado hasta ahora y que existe un aporte de flujo desde otras cuencas, situación que hasta hoy se consideraba descartada. Una evaluación más detallada sobre este comportamiento podría ser objeto de futuras investigaciones.

Un elemento importante de este sistema hídrico es el cuidado que debe tenerse en la autorización del aumento de las extracciones, ya que, por las características geológicas del acuífero, el 74 % de sus descargas ocurren en el nacimiento del río San Antonio debido al cambio de conductividad hidráulica de los materiales presentes que pasan de materiales fracturados y porosos del Terciario y Cuaternario a otros más consolidados del Terciario. Lo anterior puede implicar que el aumento en las tasas de bombeo puede reducir proporcionalmente el caudal base del río San Antonio.

Conclusiones

1. Los balances de agua subterránea muchas veces son elaborados con registros antiguos de extracciones, los cuales no siempre se encuentran depurados. En este proyecto, el trabajo de campo permite demostrar que las extracciones pueden llegar a alterarse hasta en un 33 % si no se cuenta con datos verificados y actualizados, lo cual puede implicar una sobrevaloración del nivel de explotación del acuífero.
2. El balance de agua subterránea de la microcuenca del río San Antonio indica que el sistema hídrico no es completamente cerrado, un aporte de aproximadamente 121 L/s (3.8 Mm^3/año) se atribuyen al ingreso de flujo desde otras cuencas, sin embargo, se desconoce la proveniencia de dicho aporte.
3. El nacimiento del río San Antonio es un importante indicador visible del nivel de explotación del acuífero de Nejapa, se ha estimado que su caudal base representa aproximadamente el 74 % de las descargas totales de dicho acuífero.

Recomendaciones

Para las Universidades, el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) y la Administración Nacional de Acueducto y Alcantarillado (ANDA).

1. Retomar una investigación para identificar la procedencia del flujo adicional que recibe el acuífero de Nejapa.
2. Monitorear de forma sistemática el acuífero de Nejapa, estableciendo como puntos de control, el nacimiento del río San Antonio y la descarga del río al río Acelhuate. Disponer la información al público.
3. Trabajar en la depuraración de los inventarios de fuentes de agua (pozos, manantiales, aforos) ya que esa información es determinante en la calidad de los balances de agua y consecuentemente en la estimación de la disponibilidad e Índice de Explotación, asi como para definir acciones de manejo sostenible del acuífero de Nejapa.

Referencias

Barrera, M. (2010). *Caracterización hidrogeoquímica e isotópica de áreas de recarga en el acuífero de San Salvador* (Tesis de Maestría). Universidad de El Salvador, El Salvador.

Barrera, M., y Juárez, M. (2013). *Evaluación cuantitativa del recurso hídrico subterráneo de la microcuenca del río San Antonio, municipio de Nejapa, departamento de San Salvador* (p. 46). San Salvador, El Salvador: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Gil, L. (2007). *Evaluación Hidrogeológica y vulnerabilidad intrínseca del sistema acuífero del Municipio de Nejapa, San Salvador,* El Salvador (Master Scientiae). Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

López, F., Alberto, R., y Barrera, M. (2019). *Informe de visita de campo a microcuenca del río San Antonio, municipio de Nejapa,* departamento de San Salvador (p. 26). San Salvador, El Salvador: Universidad de El Salvador.

Ponce D., de San Antonio Escribano, J. A., Mañé Jané, R., y Seisdedos Santos, J. (2003). *Caracterización de los riesgos geológicos y dimensionamiento de los recursos hidrogeológicos. Directrices para la ordenación territorial del municipio de Nejapa* (p. 259) [Memoria]. Nejapa: Geólogos del Mundo.

Scanlon, B., Healy, R., y Cook, P. (2002). *Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge.* Hydrogeology Journal, 10, 18-39.

Schosinsky, G. (2006). *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un Balance Hídrico de Suelos.* Revista Geológica de América Central, 34(35), 13-30.

Servicio Hidrológico Nacional. (2005). *Balance Hídrico Integrado y Dinámico de El Salvador. Componente Evaluación de Recursos Hídricos. San Salvador*: Servicio Nacional de Estudios Territoriales.

Información del autor

MSc. e Ing. Marcia Lizeth Barrera de Calderón, profesora de la Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de El Salvador, graduada de la carrera de Ingeniería Civil (1999) y de la Maestría en Gestión de Recursos Hidrogeológicos (2011) en la misma universidad.

Afiliación Laboral; Universidad de El Salvador.

ISSN 2518-4725.

REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE PREPARACIÓN DE UNA LÍNEA DE ENVASADO IMPLEMENTANDO LA TÉCNICA SINGLE MINUTE EXCHANGE OF DIE (SMED)

Reduction of the setup time of a packing line by using the single minute exchange of DIE (SMED) technique

Edward Mario Augusto Guerrero Gutiérrez
PhD. Ingeniero Industrial e Ingeniero Químico.
Correspondencia al autor: edward.guerrero@upr.edu

Glenda Carolina Zuñiga Garrido
Ingeniera Industrial
Correspondencia al autor: zuroga@gmail.com

Recibido: 15 de junio 2019 | Revisado: 17 de junio 2019 | Aprobado: 20 de julio 2019

Resumen

Las empresas buscan siempre ser competitivas por medio de la implementación de proyectos que promuevan la mejora continua. *Single Minute Exchange of DIE* (SMED) es una herramienta de mejora continua que permite reducir el tiempo de preparación de una línea de producción. El objetivo de este trabajo fue la implementación de la metodología SMED en la línea de envasado de una empresa de fabricación de productos agroquímicos. El análisis realizado, por medio de una Gráfica de Pareto y un Diagrama de Causa y Efecto, permitió identificar los cuellos de botella en la línea de envasado. Asimismo, se realizó un estudio de tiempos al proceso de cambio de formato en la línea de envasado. Estas acciones previas permitieron implementar la metodología SMED, donde se cuantificaron los tiempos de preparación de la línea, los índices de evaluación, así como los tiempos muertos de los operarios. Uno de los índices obtenidos muestra que el tiempo de preparación de la línea de envasado se redujo un 27 % al implementar la técnica de SMED.

Palabras clave

Manufactura esbelta, mejora continua, 5S, productividad.

Abstract

The continuous improvement projects are the key for companies to be competitive around the world. Single Minute Exchange of Die (SMED) is a continuous improvement tool in Lean Manufacturing that allows the reduction of the setup time in a production line. The research goal of this project was the SMED implementation in a packaging line in an agrochemical manufacturing industry. The bottlenecks were determined using a Pareto graphic and a Cause and Effect diagram. Additionally, a Time Study (TS) was performed to determine the format change time. The indicators and dead times were quantified after the TS and SMED implementation. The indicators show that the preparation time of the packaging line was reduced by 27 % following the SMED technique.

Keywords

Lean manufacturing, continuous improvement, 5S, productivity.

Introducción

En la actualidad, una empresa de productos agroquímicos tiene inconvenientes con el tiempo de preparación de la línea de envasado luego de finalizar un lote de producción. El proceso presenta una oportunidad de mejora para reducir el tiempo de preparación de la línea de producción al realizar un cambio en el producto envasado. Algunas de las variables identificadas que provocan esta situación son: la falta de un estudio que determine tiempos estándares de operación y en algunos casos la falta de detección de necesidades de capacitación en el personal involucrado.

Actualmente, las líneas de envasado cumplen con las metas de producción establecidas, sin embargo, el tiempo de preparación de la línea de envasado consume la mayor parte del turno de producción. En consecuencia, es necesario recurrir al uso de horas extra provocando costos adicionales. De igual manera, los procesos de mejora continua de la planta requieren que los tiempos de producción sean más cortos y efectivos. Por lo que con el uso técnicas de manufactura esbelta se pretende alcanzar estos objetivos.

Los sistemas de producción bajo el sistema de manufactura esbelta (ME), son procesos sistemáticos que ayudan a identificar y eliminar todos los desperdicios a través del mejoramiento continuo, persiguiendo siempre la satisfacción del cliente (Sundar, Balaji, & Satheesh Kumar, 2014). Una de las herramientas de ME utilizadas es Single Minute Exchange of Die (SMED); la cual permite reducir los tiempos de preparación de la línea de producción, en menos de 10 minutos, teóricamente (Filla, 2016).

Esta técnica ha sido utilizada en diferentes investigaciones para reducir tiempo de preparación de línea y el tiempo de entrega de productos. Por ejemplo, Chen, Fan, Xiong, & Zhang (2017) utilizaron una combinación entre un sistema de administración basado en JMP/SAP, Six Sigma y SMED para acortar el tiempo de preparación de la línea. Con esta metodología lograron aumentar la eficiencia de la producción. Azizi & Manoharan (2015) diseñaron un Value Stream Mapping (VSM), para mejorar la productividad en la compañía. Adicionalmente utilizaron actividades tipo Kaizen y SMED para darle el apoyo necesario a las implementaciones ejecutadas. Con estas mejoras redujeron el tiempo de preparación de la línea de 145 a 54 segundos. Empresas Eléctricas en Puebla, México han utilizado este tipo de metodología para reducir el tiempo de entrega y eliminar inventario (Rodríguez-Méndez, Sánchez-Partida, Martínez-Flores, & Arvizu-Barrón, 2015). El presente estudio tiene como objetivo la reducción del tiempo de preparación de una línea de envasado en una industria de fabricación de agroquímicos utilizando la técnica de manufactura esbelta llamada SMED.

Desarrollo del estudio

Se establecen cuatro etapas para el desarrollo de este estudio. La primera etapa consiste en la evaluación de las causas de los paros en la línea de envasado, identificadas por un Diagrama de Causa y efecto y un Gráfico de Pareto. La segunda etapa fue un estudio de tiempos en la línea de envasado, y la tercera etapa la implementación de SMED. La metodología para esta etapa es la siguiente (Viqar Nadaf Pinjar & Patil, 2015):

1. Realizar un detallado estudio de las operaciones y el tiempo de preparación de la línea.
2. Identificar las actividades internas y externas durante la preparación de la línea.
3. Separar las actividades internas y externas cuidadosamente.
4. Convertir las actividades internas a externas.
5. Optimizar todas las actividades, confirmar los resultados y estandarizar las operaciones.

Finalmente, se analiza los resultados y se presentan las recomendaciones para el proyecto.

ISSN 2518-4725.

Resultados

Análisis de cuello de botella en el proceso de envasado

La Figura 1 presenta la gráfica de Pareto con las causas de paro identificadas en la línea de envasado. Los resultados muestran que el 80 % de los paros se deben al mantenimiento del equipo, la limpieza de la llenadora de envases al realizar un cambio de producto, el cambio de formato al realizar un cambio de presentación de producto y el almuerzo. En la Figura 2 se presenta el Diagrama de Causa y Efecto con las causas de paro que afectan el cambio de formato en la línea de envasado. Una de las causas principales identificadas en la demora del proceso de cambio de formato es la limpieza, provocando que el proceso de cambio de formato esté en espera hasta que el proceso de limpieza del sistema de formulación se finalice.

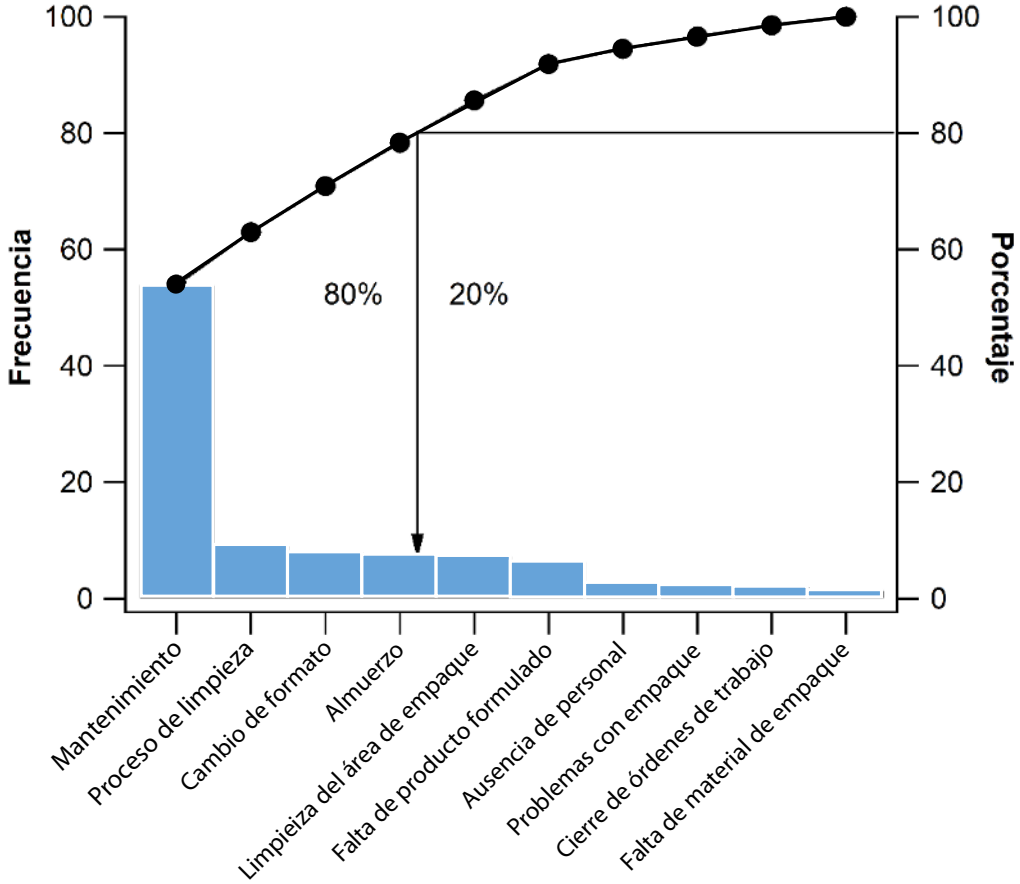


Figura 1. Gráfica de Pareto de las causas de paro en la línea de llenado.

Estudio de tiempos

Los tiempos estándares de producción y los tiempos muertos de la línea de envasado se determinaron por medio de un estudio de tiempos. Todas las operaciones y verificaciones que se realizan durante todo el proceso del cambio de formato fueron determinadas y cuantificadas. En la Figura 3 se presentan todas las operaciones con el tiempo estándar que dura cada una de ellas; en este caso cada operación se identificó por operario. Ver la tabla 1 para identificar la leyenda de operación realizada por cada operario en la línea de envasado. La Figura 3 muestra que el tiempo requerido para realizar el cambio de formato es de 1 hora con 2 minutos, siendo la operación más lenta el cambio de formato para la taponadora, con un total de 39 minutos.

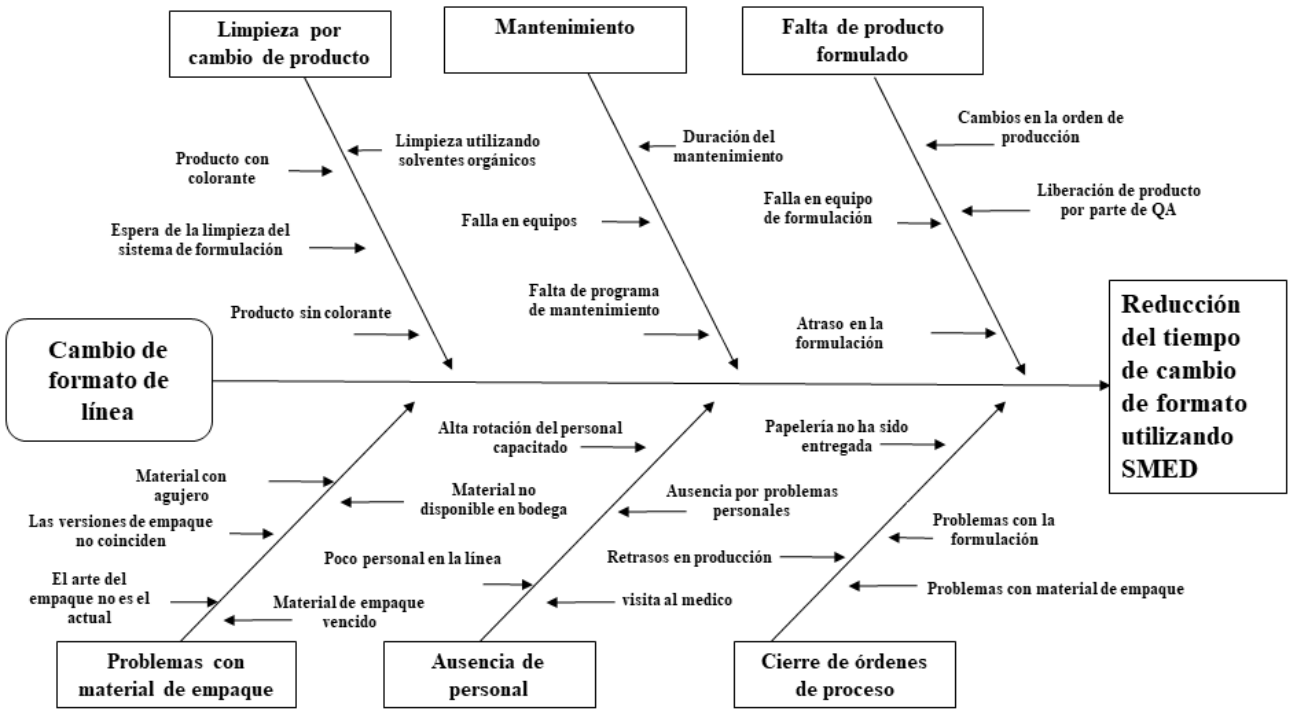


Figura 2

Diagrama de Causa y Efecto para las causas de paro que afectan el cambio de formato en la línea de envasado. *Fuente: elaboración propia.*

Dicha operación es realizada por el operario 1. Adicionalmente, se puede observar que el operario 2 tiene asignado el cambio de formato de la taponadora y el cambio de formato para la selladora; luego de realizar estas dos operaciones el operario no tiene asignada alguna actividad relativa al cambio de formato. Este mismo comportamiento es identificado para el operario 3.

Tabla 1

Leyenda utilizada en tabla 2

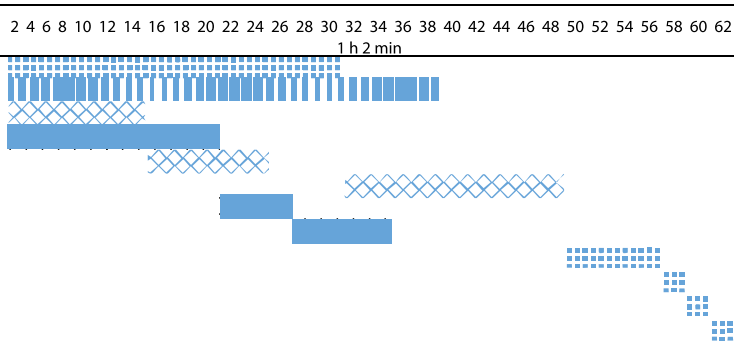
Personal	Leyenda
Encargado de línea	
Operario 1	
Operario 2	
Operario 3	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2

Tiempo de preparación de la línea de envasado para realizar un cambio de formato

Operaciones en el cambio de formato	Tiempo (min) Duración
Tiempo para cierre de orden encargado de línea	30
Cambio de formato taponadora	39
Cambio de formato taponadora - operación en paralelo	14,5
Preparación de empaque	20
Cambio formato selladora	10,9
Cambio de formato llenadora	19,24
Cambio de formato armado y sellado caja	7
Cambio formato etiquetadora de cajas	9,04
Cambio formato etiquetadora envase	8
Verificación de taponadora	2
Verificación de selladora por encargo de línea	1
Verificación de armado y etiquetado de caja	3



Fuente: elaboración propia.

ISSN 2518-4725.

El operario 3 posee tres operaciones asignadas: la preparación de empaque, el cambio de formato del armado y sellado de caja y el cambio en la etiquetadora de caja.

El tiempo que se toma para la preparación de la línea de envasado para realizar un cambio de formato, tiene como factor limitante las operaciones asignadas al encargado de línea. Tiene asignada cinco operaciones del cambio de formato; una de ellas representa el 48 % del tiempo requerido para finalizar un cambio de formato, operación de cierre de orden de proceso.

Adicionalmente, tiene que realizar el cambio de formato para la llenadora (19.24 min), el cambio de formato para la etiquetadora de envases y tres verificaciones: la taponadora, la selladora de caja y el armado y etiquetado de caja.

Hasta que el encargado de línea termine de realizar todas las verificaciones se puede empezar a producir. Una observación importante, es la identificación del impacto del proceso de limpieza sobre el proceso de cambio de formato. Este proceso se realiza antes del cambio de formato. Durante el proceso de limpieza, todo el personal de la línea de envasado está asignado a alguna actividad relacionada al proceso de limpieza, imposibilitándolos a realizar alguna actividad del cambio de formato.

Los tiempos cronometrados para realizar la limpieza en la línea de envasado para una formulación sin colorante es de 90 minutos y la limpieza de llenadora es de 50 minutos. Un factor que atrasa la limpieza es el tiempo requerido para limpiar la tubería que proviene de formulación hacia la línea de envasado.

En esta operación, todo el tanque de formulación es limpiado, y el agua de limpieza es transportada a través de la tubería que comunica el tanque de formulación con la máquina de envasado. Se debe esperar hasta que el tanque de formulación se encuentre limpio para empezar el proceso de limpieza de la máquina de llenado.

Implementación de SMED a la línea de envasado

Siguiendo la metodología de SMED se procedió a identificar, separar y convertir las actividades internas a externas.

Las actividades internas identificadas son: cálculo de rangos de pesos y buscar la densidad de formulación en documentación de aseguramiento de calidad, la preparación de empaque y realizar un cierre parcial de la orden de proceso.

Tomando como base la conversión de actividades internas a externas; se procede a determinar el tiempo de cambio de formato luego de la implementación de SMED. Los resultados muestran que el tiempo para cerrar una orden de proceso se reduce un 50 %, el tiempo de preparación de empaque también se disminuye un 50 %. Con estos cambios el tiempo de cambio de formato disminuyó de 62 minutos a 48 minutos (Figura 4[A]).

La implementación de SMED junto con el estudio de tiempos muestra que existen operaciones que pueden ser reasignadas entre los operarios de la línea de envasado.

La operación de cambio de formato de la etiquetadora de envases se le reasignó y capacitó al operario 3. La Figura 4[A] muestra el tiempo que se llevaría el cambio de formato con la implementación de SMED y con la capacitación de operario 3. Los resultados muestran que la capacitación del operario reduce adicionalmente un 6 % el tiempo del cambio de formato en la línea de envasado luego de la implementación de SMED.

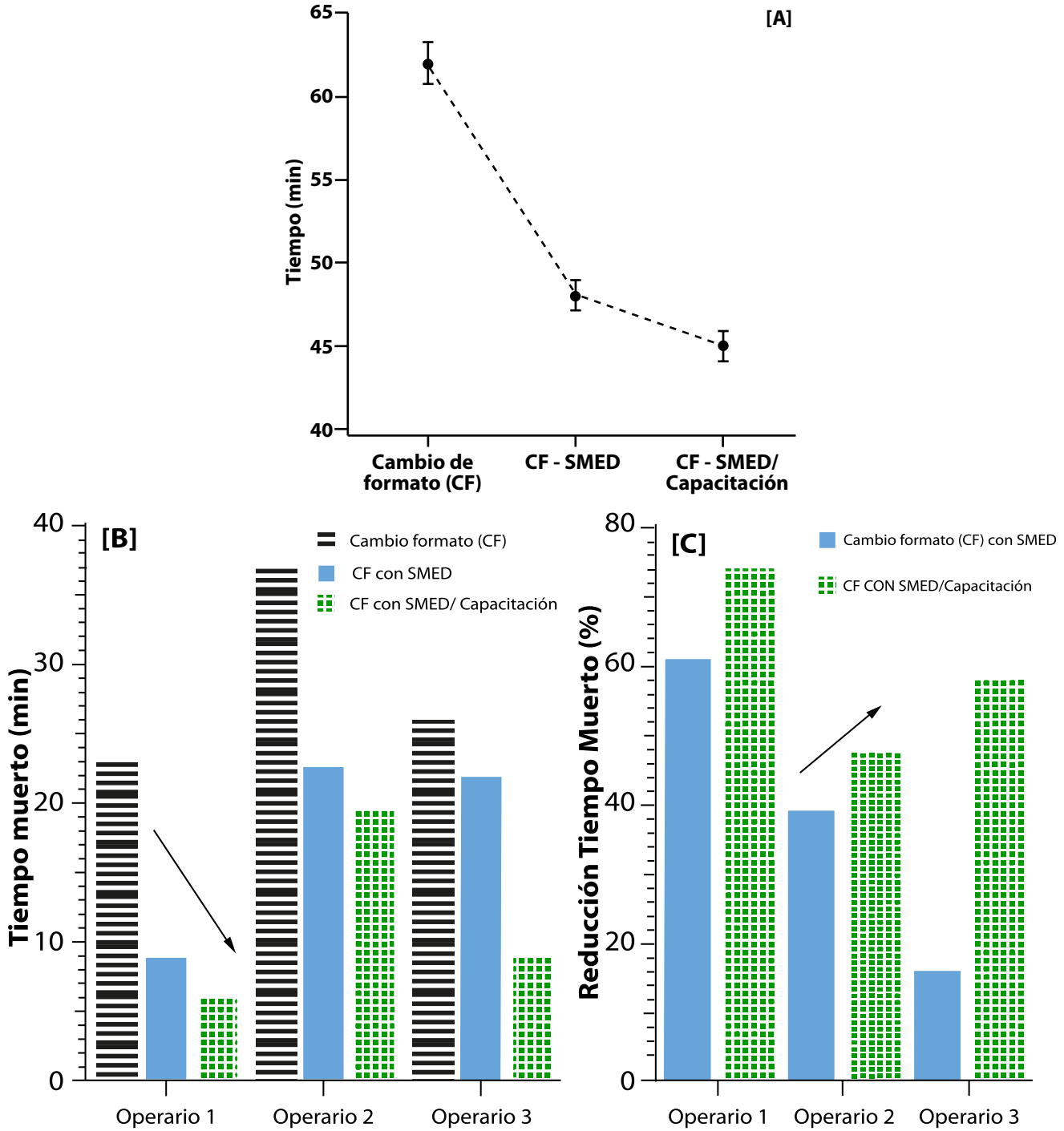


Figura 4. Tiempo de preparación de la línea de envasado [A], tiempo muerto de los operarios [B] y reducción del tiempo muerto de los operarios [C].

La Figura 4[B] y 4[C] muestran los tiempos muertos y la reducción de tiempos muertos de los operarios durante el cambio de formato luego de la implementación de SMED y con la capacitación y reasignación de operaciones. Los resultados muestran que el operario 1 presentó el mayor porcentaje de reducción de tiempo muerto, siendo este de 74 %. El operario 2 y 3 presentaron una

reducción de 47 y 58 % respectivamente. El índice de productividad de la línea de envasado puede incrementarse 62 % si el proceso de limpieza se reduce un 64 %.

Conclusiones

1. El tiempo de preparación de la línea de envasado en una empresa de fabricación de agroquímicos se redujo un 27 % al implementar la técnica de *Single Minute Exchange of Die* (SMED).
2. La productividad de la línea de envasado aumentó 5 % por medio de la simplificación de las operaciones de cierre de órdenes y la reasignación de actividades de cambio de formato.
3. El tiempo muerto en la línea de envasado para los operarios 1, 2 y 3 se redujo un 74 %, 47 % y 58 % respectivamente, por medio del establecimiento de las actividades internas y externas que se producen durante el cambio de formato
4. La productividad de la línea aumenta un 62 % cuando una de las operaciones más lentas de la línea de envasado se reduzce un 64 %.

Recomendaciones

1. Capacitar a más empleados de la línea de envasado para delegarles las actividades de cambio de formato.
2. Estandarizar procesos por medio de un diseño de experimentos.
3. Capacitar a los operarios de línea en temas de excelencia operacional.
4. Implementar los cambios sugeridos a las otras líneas de envasado líquido y sólido.

Referencias bibliográficas

Azizi, A., & Manoharan, T. (2015). Designing a Future Value Stream Mapping to Reduce Lead Time Using SMED-A Case Study. *Procedia Manufacturing*, 2, 153–158. doi: 10.1016/j.promfg.2015.07.027.

Chen, S., Fan, S., Xiong, J., & Zhang, W. (2017). The Design of JMP/SAP Based Six Sigma Management System and its Application in SMED. *Procedia Engineering,* 174, 416–424. doi: 10.1016/j.proeng.2017.01.161.

Filla, J. (2016). The Single Minute Exchange of Die Methodology in a High-Mix Processing Line. *Journal of Competitiveness,* 8(2), 59–69. doi: 10.7441/joc.2016.02.05.

Rodríguez-Méndez, R., Sánchez-Partida, D., Martínez-Flores, J., & Arvizu-Barrón, E. (2015). A case study: SMED & JIT methodologies to develop continuous flow of stamped parts into AC disconnect assembly line in Schneider Electric Tlaxcala Plant. *IFAC-PapersOnLine,* 48(3), 1399–1404. doi:10.1016/j.ifacol.2015.06.282.

Sundar, R., Balaji, A., & Satheesh, R. (2014). A review on lean manufacturing implementation techniques. *Procedia Engineering*, 97, 1875–1885. doi:10.1016/j.proeng.2014.12.341

Viqar, M., & Patil, G. (2015). Productivity Improvement through Single Minute Exchange of Die (SMED) Technique. *International Journal of Scientific and Research Publications,* 5(7), 2250–3153. Recuperado de: www.ijsrp.org.

Información del autor

Edward Mario Augusto Guerrero Gutiérrez.

Ingeniero Industrial e Ingeniero Químico, PhD.

Universidad de San Carlos de Guatemala.

Glenda Carolina Zuñiga Garrido.

Ingeniera Industrial.

Universidad de San Carlos de Guatemala.

Afiliación laboral; Facultad de Ingeniería USAC.

CAMBIO CLIMÁTICO Y SOSTENIBILIDAD

DOCTORADO

Revista de la Escuela de Estudios de Postgrado, Vol. 10 No. 1, año 2019.
ISSN 2518-4725.

METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA SOSTENIBILIDAD DEL LAGO DE ATITLÁN, BASÁNDOSE EN LA HUELLA HÍDRICA

Methodology to determine the sustainability of Lake Atitlan, based on the water footprint.

Dennis Salvador Argueta Mayorga
Dr. en Cambio Climático y Sostenibilidad
Correspondencia al autor: arguetadennis@gmail.com

Asesorado por: Dr. en Ciencias Técnicas Agropecuarias con énfasis en Manejo del Recurso Hídrico **Tomás Antonio Padilla Cámbara** tpadillacambara@hotmail.com

Recibido: 15 de junio 2019 | Revisado: 17 de julio 2019 | Aprobado: 20 de agosto 2019

Resumen

El presente trabajo investigativo detalla el procedimiento requerido para realizar un análisis de sostenibilidad de un cuerpo hídrico, basándose en el indicador de la economía ecológica denominado huella hídrica.

Los resultados obtenidos en la aplicación de la huella hídrica en el lago de Atitlán indican que se tiene una huella hídrica verde de 341.86 millones de metros cúbicos por año, la cual refleja la cantidad de agua proveniente de la precipitación pluvial que se aprovecha para riego de cultivos y bosques; se obtiene un valor de huella hídrica azul de 63.55 millones de metros cúbicos por año, que corresponde a la cantidad de volumen de agua que se extrae para complementar actividades de riego y para consumo humano, cuando el agua proveniente de la precipitación es insuficiente; en cuanto a la huella hídrica gris se obtiene un valor de 18.70 millones de metros cúbicos por año, que corresponde a la cantidad de agua que sirve para amortiguar ambientalmente la carga contaminante del sector agrícola. Analizando estos datos, se refleja un valor relativamente bajo de carga ambiental.

Palabras clave

Huella hídrica, sostenibilidad, cambio climático, cuerpo léntico, contaminación

Abstract

The present research details the procedure required to perform a sustainability analysis of a water body, based on the indicator of the ecological economy called water footprint.

The results obtained in the application of the water footprint in Lake Atitlán indicate that there is a green water footprint of 341.86 million cubic meters per year, which reflects the amount of water coming from the rainfall that is used to irrigate crops and forests; a blue water footprint value of 63.55 million cubic meters per year was obtained, which corresponds to the amount of water volume extracted to complement irrigation activities and for human consumption, when water from rainfall is not enough; As for the gray water footprint, a value of 18.70 million cubic meters per year was obtained, which corresponds to the amount of water used to buffer the pollution load of the agricultural sector. Analyzing these data, the value of environmental load is relatively low.

Keywords

Water footprint, sustainability, climate change, lentic body, pollution.

ISSN 2518-4725.

Introducción

Esta investigación corresponde a una nueva disciplina de la economía denominada "economía ecológica", la cual tiene una visión termodinámica y geodinámica de los distintos ecosistemas. Se basa en la aplicación de dos metodologías en un cuerpo hídrico.

El lago de Atitlán, que se localiza en la región occidental de Guatemala, es un importante reservorio de agua dulce, y su importancia radica en que es uno de los sitios turísticos más visitados, además de proveer desarrollo social y económico a las comunidades que se localizan en la circunscripción del lago. Desde el 2009, se ha suscitado una serie de variaciones en los parámetros físicos, químicos y biológicos, debajo del espejo de agua del lago de Atitlán; por ejemplo, brotes frecuentes de cianobacteria, eutroficación debido al exceso de nutrientes, incrementos y decrementos súbitos del nivel de agua, extinción de especies endémicas, entre otros. Todo esto ha provocado pérdida de especies originarias de la zona, eutrofización paulatina de toda la columna de agua del lago, florecimientos periódicos de cianobacteria, entre otras afectaciones.

Common y Stagl (2008) indican que el desarrollo sostenible consiste en satisfacer requerimientos presentes sin comprometer la satisfacción futura.

La huella hídrica admite la consideración del agua y su uso, de forma oculta, por medio de la producción de bienes o prestación de servicios de consumo, de tal forma que se proporciona información sobre los efectos en el agua que son ligados a acciones antrópicas ya sea de forma individual o por medio de empresas. La metodología se basa en la propuesta de Hoekstra y Mekonnen (2011).

Desarrollo del estudio

El tipo de diseño de investigación de este estudio es no experimental ya que los datos no son manipulados. En este sentido los datos e información con que se cuenta provienen de fuentes primarias, los cuales explican los fenómenos relacionados con la huella hídrica.

Debido a la ubicación en donde se realiza la investigación, este estudio corresponde espacialmente a una investigación de campo (lago de Atitlán). De acuerdo con su ubicación en el tiempo, la investigación es transversal, en cuanto a la evaluación de la sostenibilidad basándose en aspectos ambientales, económicos y sociales.

Geográficamente, la investigación se centra en la circunscripción del departamento de Sololá, que contiene la cuenca del lago de Atitlán.

Con pleno conocimiento de la relación entre las problemáticas de polución paulatina del lago de Atitlán y la carencia de estudios completos relacionados con dicho lago, así como la búsqueda de soluciones para conducir políticas sostenibles para el lago, esta investigación se desarrolla de la siguiente forma.

De acuerdo con Arévalo, Lozano y Sabogal (2011), primero se realiza una investigación bibliográfica para definir un marco teórico. Se realiza una síntesis crítica del estado del conocimiento sobre las aplicaciones de la energía, y cómo éstas son determinadas de acuerdo con las variables que conforman un producto, servicio o un elemento ecológico. Asimismo, se realiza un análisis exhaustivo de la metodología concerniente a la determinación de la huella hídrica para lagos en general, indicando sus ventajas y potencialidades de evaluar un cuerpo léntico con este método.

Posteriormente, se realiza la caracterización del objeto de estudio y metodología utilizada. Se incluye una monografía de su cuenca, así como la descripción de las características generales que determinan su estado trófico, como también las principales variables climáticas, sociales, demográficas, entre otras. Se indican además, los criterios de la metodología para el cálculo de los índices emergéticos y la aplicación de la huella hídrica que conforman el análisis que se realiza en el lago de Atitlán, para alcanzar la sustentabilidad en el futuro inmediato.

La parte medular de la investigación consiste en el desarrollo de las metodologías explicadas para

describir, analizar y evaluar las mejoras propuestas, por medio de cálculos, gráficos y tablas, el análisis de la huella hídrica que conlleve a la sustentabilidad del cuerpo léntico en estudio.

Para el desarrollo metodológico propuesto, se utilizan como base los procesos planteados por Agroder (2012), de tal manera que se determina el estado actual del lago de Atitlán, y se generan las propuestas generales para alcanzar la sustentabilidad de dicho recurso hídrico.

Resultados obtenidos

Se presentan los resultados de la aplicación metodológica para evaluar la huella hídrica.

Tabla 1

Identificación del área de estudio

Característica	Descripción o valor
Cuenca	Atitlán
Municipios	19
Departamentos	3
Área	54,100 ha
Porcentaje del área en el país	0.5 %
Vertiente	Océano Pacífico
Disponibilidad total	333 millones de metros cúbicos

Fuente: elaboración propia.

Como puede notarse en la tabla 1, se incluyen municipios de tres departamentos (Sololá, Totonicapán y Quiché), de tal manera que es evidente la importancia de estudiar dicho cuerpo hídrico ya que en la región intervienen diversos grupos étnicos, así como divisiones político-administrativas dentro de la cuenca.

A continuación se muestra el proceso de cálculo de la determinación de la huella hídrica para el sector agrícola.

$$HH_{cultivo.verde} = \frac{CWU_{verde}}{Y} = \frac{8{,}398 m^3/ha}{2.11 Ton/ha} = 3{,}980.09 \frac{m^3}{Ton}$$

$$HH_{cultivo.azul} = \frac{CWU_{azul}}{Y} = \frac{3{,}426 m^3/ha}{2.11 Ton/ha} = 1{,}623.70 \frac{m^3}{Ton}$$

$$HH_{gris} = \frac{1008.00 \frac{m^3}{ha}}{2.11 \frac{Ton}{ha}} = 477.73 \frac{m^3}{Ton}$$

Tabla 2

Huella hídrica, por tonelada

Descripción	Valor	Dimensional
Huella hídrica verde	3,980.09	m³/Ton
Huella hídrica azul	1,623.70	m³/Ton
Huella hídrica gris	477.73	m³/Ton

Fuente: elaboración propia.

Para obtener los valores de la huella hídrica por año, es necesario realizar operaciones aritméticas entre la huella hídrica en m³/Ton y la cantidad de toneladas de productos cosechados en un año (Ton/año).

Tabla 3

Huella hídrica, por año

Descripción	Valor	Dimensional
Huella hídrica verde	341,865,596.67	m³/año
Huella hídrica azul	63,545,577.84	m³/año
Huella hídrica gris	18,696,575.04	m³/año

Fuente: elaboración propia.

La huella hídrica para el sector doméstico se calcula de la siguiente manera

$$Huella\ hídrica\ azul = 47{,}041.50 \frac{m^3}{día} * 365 \frac{días}{año} = 17{,}170{,}147.50 \frac{m^3}{año}$$

$$HH_{gris\ sector\ doméstico} = 24.54 + 57.75 + 0.68 + 1.60 = 84.57 \frac{m^3}{año}$$

ISSN 2518-4725.

Discusión de resultados

En el desarrollo metodológico planteado en esta investigación y que plasma el cumplimiento del objetivo principal de la misma, en relación con el establecimiento de una metodología para estimar la huella hídrica en sistemas lénticos, se encuentran ciertas limitantes que se basan fundamentalmente en la carencia de información actualizada relacionada con: variables climáticas, usos de suelo actuales e históricos, censo poblacional actual, entre otros.

En cuanto al objeto de estudio investigado (cuenca del lago de Atitlán), se tiene que política y administrativamente hay 19 municipios circunscritos a esta cuenca que representa el 0.5 % del área del país. El hecho de que existan tantos municipios (pertenecientes a 3 departamentos, Sololá, Totonicapán y Quiché) convierte en una tarea difícil la definición e implementación de políticas sustentables para garantizar una buena calidad hídrica en el lago de Atitlán, debido a aspectos culturales y de costumbres, así como diferentes asignaciones presupuestarias para cada municipio, de tal manera que no todos apoyarían de la misma forma.

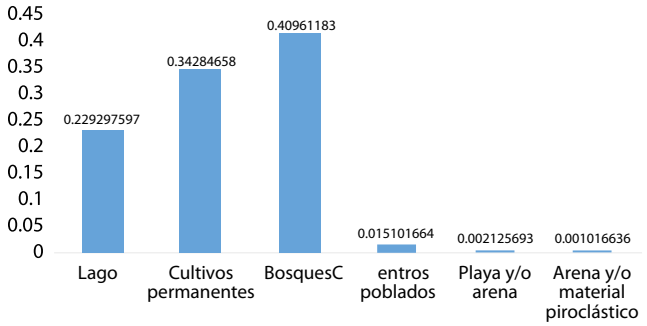


Figura 1. Uso de la tierra en la cuenca del lago de Atitlán.

En la figura 1 se muestra que el uso de suelo dentro de la cuenca de Atitlán se compone en su mayoría del área que ocupa el lago de Atitlán y la siembra de granos básicos y café, dejando con un valor de 12.23 % el área de bosques. Estos datos resultan importantes en el análisis, ya que los cambios en el uso de la tierra pueden ocasionar mayor uso de fertilizantes que al aplicarlos a las siembras, pueden llegar por escorrentía hacia el espejo del agua que representa el lago de Atitlán, de tal forma que el control de las variaciones geográficas de las fronteras agrícolas es de vital importancia para garantizar un desarrollo sostenible dentro del área de influencia dentro de la cuenca en estudio.

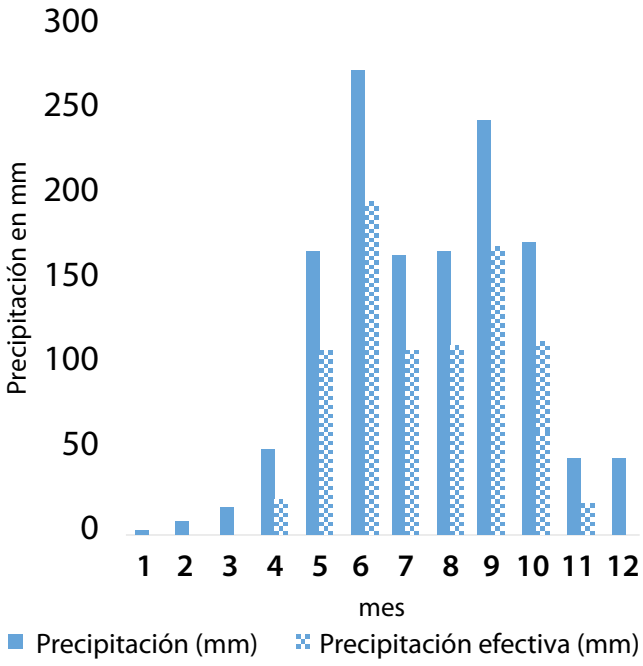


Figura 2. Precipitación (mm) y precipitación efectiva (mm) en la cuenca del lago de Atitlán.

Es de esperarse que para los meses de mayo a octubre se observe mayor precipitación dentro del área de la cuenca, debido a los regímenes de lluvia en Guatemala (época lluviosa), por lo que la huella hídrica verde para estos meses es mayor que para el periodo comprendido de finales de octubre a principios de mayo.

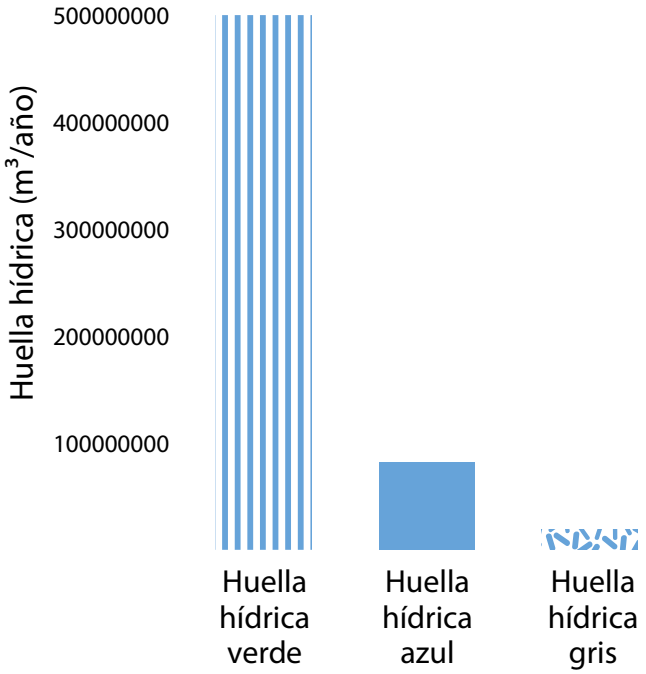


Figura 3. Huella hídrica para el sector agrícola en la cuenca de Atitlán.

La interpretación de la figura 3 es que la mayor cantidad de agua consumida para cultivos, dentro de la cuenca de Atitlán, proviene de la precipitación, siendo aproximadamente un 71 % del total del agua consumida. De igual manera se tiene que el 29 % del agua requerida para riego es extraída de la superficie o del subsuelo para satisfacer las demandas de los cultivos.

El valor de la huella hídrica anual para el sector agrícola es del orden de 18.7 millones de metros cúbicos de agua. Este valor corresponde al volumen de agua que sirve como amortiguador ambiental para asimilar la carga contaminante del sector agrícola.

Como puede notarse, la huella hídrica gris es aproximadamente un 8.5 % del valor de la sumatoria de la huella hídrica verde y azul (que representan el agua de consumo para los cultivos). Por consiguiente, se considera que la carga contaminante no es tan alta, sin embargo, hay que tomar medidas ya que en un corto plazo puede incrementarse la cantidad de carga contaminante al haber más áreas de cultivos.

Conclusiones

1. La metodología determinada en este estudio doctoral se aplica en la cuenca del lago de Atitlán, a partir de variables climáticas, parámetros de calidad del agua del lago, así como aspectos físicos, sociales y económicos de la población que reside dentro de la cuenca que subtiende al lago de Atitlán. Se obtienen datos que indican que el lago en estudio se considera de buena calidad, de acuerdo con el análisis emergético y la aplicación de la huella hídrica.

2. Se desarrolla una metodología para determinar la huella hídrica en un sistema léntico, el cual conlleva el proceso siguiente: definición del alcance general del estudio, cuantificación de la huella hídrica, evaluación de la sustentabilidad, y formulación de propuestas.

3. De acuerdo con los valores obtenidos en el análisis de la huella hídrica aplicada a la cuenca que subtiende el lago de Atitlán, se deduce que hasta el año 2017 hay sostenibilidad en dicho cuerpo hídrico, tomando en consideración que el 71 % del agua consumida en los cultivos proviene de la precipitación y que el 29 % proviene de agua superficial o subsuperficial. Asimismo, de acuerdo con los datos obtenidos para el funcionamiento del sector agrícola dentro de la cuenca del lago de Atitlán, se requieren 219.3 millones de metros cúbicos de agua por año, siendo la oferta hídrica de 333 millones de metros cúbicos anuales, se concluye que la demanda de agua no pone en peligro la disponibilidad hídrica para otras actividades.

ISSN 2518-4725.

Recomendaciones

1. Se recomienda a las autoridades designadas a la obtención de datos técnicos y científicos, depurar las bases de datos y generar líneas basales rigurosas para manejo de datos, por ejemplo, sobre variables climáticas, parámetros de calidad del agua, entre otros. Esto con la finalidad de facilitar las investigaciones futuras en relación con los cuerpos lénticos, asimismo, se requiere que instituciones públicas, privadas y académicas cuenten con información que permita tomar decisiones adecuadas y que representen los fenómenos sociales actuales. Principalmente, con recursos naturales que son finitos para el existir de los seres humanos como sociedad, por consiguiente, el enfoque sustentable depende en buena medida de la información con la que se cuente para la toma de decisiones e investigaciones futuras.

2. Las instituciones académicas a través de sus entidades responsables en el manejo de información y la generación de conocimiento, deben facilitar los medios y herramientas para propiciar la investigación sobre temas trascendentales en la actualidad. Para ello, la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala debería ser una de las principales entidades que desarrolle diferentes investigaciones y que cuente con la capacidad de generación de información relacionada con el uso del suelo, variables climáticas y dinámicas sociales en relación con los cuerpos lénticos.

Referencias bibliográficas

Agroder. (2012). Huella hídrica en México en el contexto de Norteamérica. México: WWF México y AgroDer. Recuperado de http://www.huellahidrica.org/Reports/AgroDer,%202012.%20Huella%20h%C3%ADdrica%20en%20M%C3%A9xico.pdf.

Arévalo, D., Lozano, J., y Sabogal, J. (2011). *E*studio nacional de huella hídrica Colombia sector agrícola. *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo.* España:

Common, M., y Stagl, S. (2008). Introducción a la Economía Ecológica. España, Editorial Reverté, S. A.

Hoekstra, A., y Mekonnen, M. (2011). *Global Water Scarcity*: The Monthly Blue Water Footprint Compared to Blue Water Availability for The World´s Mayor River Basins. Report Nº53. Holanda.

Suárez, G. (2011). *Cuencas hidrográficas de Guatemala.* Guatemala: Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.

Información del autor

Doctor en Cambio Climático y Sostenibilidad, Dennis Salvador Argueta Mayorga, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2018.

Maestro en Ingeniería Sanitaria, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2011.

Maestro en Ingeniería Vial, Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2010.

Ingeniero civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2006.

Afiliación laboral; Docente investigador de la Facultad de Ingeniería. USAC.

Revista de la Escuela de Estudios de Postgrado, Vol. 10 No. 1, año 2019.
ISSN 2518-4725.

MODELACIÓN Y PROSPECCIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD HÍDRICA.

Modeling and prospection of water sustainability

Leonel Ignacio de la Paz Gallardo
Dr. en Cambio Climático y Sostenibilidad
Correspondencia al autor: lgnapaz64@gmail.com

Asesorado por: Dr. en Gestión en Recursos Hídricos **Marvin Roberto Salguero Barahona** marvinsal@gmail.com

Recibido: 15 de junio 2019 | Revisado: 17 de junio 2019 | Aprobado: 20 de junio 2019

Resumen

En esta investigación se propone un modelo matemático para la sostenibilidad hídrica de la subcuenca sur de ciudad Guatemala por medio de la valoración de ocho criterios de sostenibilidad, entre ellos tres ambientales que son: la escasez hídrica (fenómeno estudiado), la contaminación ambiental hacia los cuerpos de agua y un factor de demanda de agua por afectación del calentamiento global; tres económicos que incluyen: costo del agua en el sistema público, el del sector privado inmobiliario (colonias, condominios, edificios) y por último la industria que lo incorpora en la producción; en cuanto al tema social se consideran dos criterios: satisfacción del servicio de agua y el índice de estrés social hídrico de cada zona de la ciudad capital analizada (11, 12, 13, 14 y 21).

Palabras clave

Sostenibilidad hídrica, modelación matemática, cambio climático, recursos hídricos, escasez de agua.

Abstract

This research proposes a mathematical model of water sustainability of the southern sub-basin of Guatemala city, through the assessment of the eight susteinability criteria, three of them environmental: water scarcity (studied phenomenon), contamination of the environment towards the water bodies and a water demand factor due to the effects of global warming; three economic factors which include: water cost in the public system, the private real state sector (Houses, condos and buildings) and last the industry which incorporates it into production of goods. Regarding the social issue, two criteria are considered: a satisfaction survey of the water service and the water stress index of each zone of Guatemala City that were analized (11, 12, 13, 14 and 21).

Keywords

Water sustainability, mathematical modeling, climate change, water resources, water scarcity.

ISSN 2518-4725.

Introducción

Desde hace varios años la ciudad de Guatemala ha sufrido de escasez de agua y se ha pensado que existen dos formas de arreglar el problema, la primera es aumentar la oferta, captando más fuentes superficiales por medio de embalses y acueductos ubicados afuera del departamento, tal y como sucedió hace diez años cuando se intenta traer agua del municipio de San Lucas Sacatepéquez, enfrentando una gran oposición de la población de esa región. Debido a la falta de certeza jurídica y buena disposición de las autoridades, la comuna metropolitana no ha podido aumentar la oferta de agua de cuencas externas, que hasta el momento ha sido una de tantas dificultades que ha enfrentado; una solución parcial ha sido perforar más pozos en todo el valle. La segunda, es mejorar y optimizar la gestión de la demanda por medio del ahorro, reuso y evaluación de la sostenibilidad.

Desarrollo del estudio

El estudio tiene un enfoque mixto, de alcance explicativo y correlacional y diseño no experimental. La investigación abarca dos etapas en las que se estudia el fenómeno de escasez de agua buscando aproximarse al conocimiento real de la sostenibilidad hídrica en una cuenca urbana. La primera parte consiste en la modelación matemática, tomando un conjunto de variables claves, que se definen por un grupo de expertos mediante entrevistas a profundidad, en las que se analiza y define el comportamiento de la sostenibilidad hídrica de la subcuenca sur de la ciudad de Guatemala, lo que permite estudiar la interrelación entre las dinámicas socioeconómicas y ambientales que repercuten en la gestión del recurso hídrico, durante el periodo de 1977 a 2014.

La segunda parte se desarrolla con la metodología prospectiva, pues es la que mejor define los escenarios proyectados al año 2030 de forma científica para aproximarse al conocimiento de la sostenibilidad hídrica. El modelo generado puede ser una herramienta de diagnóstico para decisores y alcaldes, ya que se plantean escenarios probables tales como: escenario pesimista, tendencia, alcanzable o deseado y optimista. La combinación de ambas partes se define por medio de una propuesta metodológica, como un aporte científico. También se realiza una encuesta y se desarrollan ocho indicadores de sostenibilidad los cuales consisten en: tres de la componente ambiental, tres de la componente económica y dos de la componente social.

Las relaciones matemáticas que se utilizan se basan en diferentes criterios:

1) El primer criterio expresa: que el suministro de agua debe cubrir todas las demandas de la población, f (CA1). Para muchos hidrólogos es denominado escasez hídrica (fenómeno objeto de esta investigación).

$$f(CA1) = \frac{A}{D} \quad (1)$$

donde:

A = Suministro; D = Demanda

2) Este criterio dice: la demanda de agua es afectada por el calentamiento global f (CA2).

Para evaluar los efectos del calentamiento global sobre los recursos hídricos, se considera que la principal consecuencia en la ciudad de Guatemala es el incremento de la temperatura media del ambiente (Ti) expresada en (º C), para definir el incremento se hace uso del concepto de anomalía de temperatura, denotada por (Ω T), que Hernández(2002) define como:

$$\Omega T = Tm - Ti \quad (2)$$

en la cual Ω T = anomalía de temperatura;

Tm = temperatura promedio de todos los meses de enero; Ti = temperatura media del mes analizado.

$$\Omega\, T_{3m} = \frac{\sum(\Omega\, T)}{3} \quad (3)$$

Ω T3m = Persistencia de la anomalía

ΣΩ (ΩT) = Sumatoria de anomalías de tres meses consecutivos, y el número 3 indica el promedio de

tres meses, con su signo respectivo, lo cual puede portar indicios de evidencia del cambio climático al graficarlo y analizar su tendencia.

En resumen, se puede indicar que la persistencia de la anomalía el promedio de tres meses consecutivos de la anomalía.

De acuerdo a recomendaciones de expertos, se asume que mientras más alta es la temperatura ambiente, se observa un incremento en la demanda del agua. Para considerar este criterio se incorpora el concepto de Factor de demanda de agua afectada por cambio climático (Dcc), el cual se calcula por medio de la persistencia de la anomalía de temperatura, adoptada por recomendaciones de los expertos y también utilizada por la Agencia Nacional Oceanográfica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA, 2017) para analizar el Fenómeno del Niño.

Ω T3m < 0.5 ºC entonces Dcc = 1.00
Ω T3m ≥ 0.5 ºC entonces Dcc = 1.05
Ω T3m ≥ 1.0 ºC entonces Dcc = 1.10
Ω T3m ≥ 1.5 ºC entonces Dcc = 1.15
Ω T3m ≥ 2.0ºC entonces Dcc = 1.20

El factor de demanda de agua afectada por el calentamiento global (Dcc) define por lo tanto al segundo componente de la sostenibilidad hídrica así:

f (CA2)=Dcc (4)

3) El tercer criterio expresa: es imprescindible que se minimice la cantidad de contaminación en peso que se vierte al sistema hídrico f (CA3).

Para desarrollar este indicador se determina la cantidad de vertidos líquidos hacia el sistema hídrico de la cuenca, para lo cual se propone:

$$f\ (CA3) = V = \frac{Agua\ residual\ tratada}{Agua\ residual\ Generada} = 1 \quad (5)$$

Para el año 2014 se estima que la ciudad de Guatemala produce 211 millones de m³/año de aguas servidas, las cuales son vertidas en dos grandes subcuencas (la norte y la sur), de estas solamente el 27 % van hacia la subcuenca sur (área de estudio de esta investigación: zona 11, 12, 13, 14 y 21) y el río que lo recibe es el Villalobos, que descarga directamente al lago de Amatitlán y posteriormente al río María Linda en la vertiente del Océano Pacífico.

4) Para la componente económica, el primer criterio establece: para que cualquier sistema que presta un servicio de agua se mantenga, los costos de operación deben ser cubiertos por las tarifas prestadas, f (CE1).

Este indicador evalúa el sistema público provisto por la Empresa Municipal de Agua de ciudad Guatemala (EMPAGUA):

$$f\ (CE1) = \frac{(A1)\ (Ca)}{[(Ao)*(Cp1)+Gv]} \quad (6)$$

Ao = (a) + (p1) en m³ / mes; A1 = Ao – (pa) e n m³/mes; pa = (Ao) (Xrp / 100) en m³ /mes; Ao = Toda el agua de suministro público (EMPAGUA) superficial y subterránea que sale de las plantas potabilizadoras; A1= Toda el agua que logra llegar a las viviendas o que es facturada de acuerdo a su consumo; pa = total de pérdidas de agua del sistema de distribución; Ca = canon de agua afectado por el consumo de cada vivienda. Éste varía de acuerdo al sector, en esta investigación se le denomina, canon de agua promedio real. Ca = Todos los ingresos por agua / A1 (Q/ m³); Cp1 = Costo de producción de 1 m³ de agua en el sector público;

Cp1 = (Presupuesto mensual de EMPAGUA) / Ao en Q/ m³ ; Gv = Todos los gastos varios no contemplados en el presupuesto; Gv = (%Gv)*(Presupuesto mensual de EMPAGUA);

%Gv = porcentaje de gastos administrativos no contemplados en el presupuesto; Xrp = porcentaje de pérdidas de agua en el sistema de distribución;

ISSN 2518-4725.

a = toda el agua superficial que sale de las plantas de EMPAGUA; p1 = Toda el agua subterránea que sale de los pozos de EMPAGUA.

5) Según el segundo criterio de sostenibilidad económica f (CE2) se tiene que: para que un sistema privado de abastecimiento de agua pueda funcionar, como mínimo todos los gastos de inversión, operación y mantenimiento deben ser cubiertos por los usuarios.

$$f\ (CE2) \geq 1\ \geq \frac{(Pv*p2d)}{(Cp2*p2)} = \frac{Q}{Q} adimensional \quad (7)$$

Pv = Canon del agua privada en colonias o el precio de venta al consumidor final por el derecho de consumir 30 m³ de agua al mes; p2d = Agua subterránea disponible (en la puerta del usuario) por el sector privado para colonias y condominios en m³/mes, también definida como: p2d = p2 – pb; p2 = Agua subterránea extraída por el sector privado para colonias y condominios de toda la ciudad en m³/mes. Se considera tomar datos de toda la ciudad pues la obtención de información es más accesible; P2 = Ao *z2; Ao = Toda el agua producida por EMPAGUA, superficial y subterránea, que sale de las plantas potabilizadoras para toda la ciudad en m³ / mes; Z2= Porcentaje de demanda de agua insatisfecha por EMPAGUA; Pb = pérdidas en la red de distribución privada de toda la ciudad en m³/mes Pb = (p2) (Xrpv / 100); Xrpv = porcentaje de pérdidas de agua en la red de distribución privada; Cp2 = Costo de extraer un m³ de agua en las colonias y condominios (Q /m³).

Este segundo criterio económico está dedicado exclusivamente para evaluar la sostenibilidad del agua usada para condominios, colonias y edificios que no son abastecidos con el servicio de agua pública.

6) El tercer criterio económico dice: dado que el agua utilizada por el sector privado es requerida para incorporarla a la producción de un producto su rentabilidad es inherente f (CE³).

El objetivo de este criterio es determinar qué tan sostenible es la operación del uso del agua en la industria, y específicamente la utilizada para producir, desde aquellos procesos que incorporan agua a su producto, hasta los que la requieren como materia prima.

$$f(\text{CE3}) = (\text{Pv/m}^3) / (\text{Cpv}) \quad (8)$$

Pv/m³ = Precio de venta por vender 1 m³ de agua embotellada en Q / m³; Cpv = Costo de 1 m³ de agua empacado en el punto de venta en Q / m³

7) El primer criterio de sostenibilidad social indica que: la satisfacción del servicio que percibe el cliente sea igual al servicio satisfactorio dado por el proveedor, f (CS1).

Durante el proceso de las entrevistas a profundidad se establece que un servicio satisfactorio es aquel que se provee por lo menos, durante 12 horas continuas todos los días con un caudal mínimo de 3 L / min.

Siguiendo en la línea de este concepto, se analiza que un usuario del servicio de agua para que se sienta satisfecho, por lo menos debe recibir la cantidad de agua que contrata.

$$f(CS1) = \frac{(\text{Agua recibida})}{(\text{Agua contratada})} \quad (9)$$

8) El segundo criterio de la sostenibilidad social, denotado por f (CS2), se basa en lo indicado por Ohlsson (1999), con relación a la necesidad de medir la condición de escasez de agua en el área de estudio y la capacidad de adaptación de la sociedad. La ecuación propuesta es:

$$\mu_5 = (\frac{1}{2})(\frac{d_{5,i}}{h_i}) \quad (10)$$

donde:

μ_5 = Índice social de estrés hídrico, adimensional;

$d_{5,i}$= Índice de estrés hídrico, adimensional y para el caso particular de este estudio; h_i = IDH Índice de desarrollo humano, adimensional.

Resultados obtenidos

Con la determinación de los anteriores criterios se realizan cálculos:

$$f(\mathrm{CA}) = f(CA1, CA2, CA3)$$

$$f\ (CA) = \frac{(Aze) \times (Vze^{0.05})}{(Dze) \times (Dcc)}$$

$$f(\mathrm{CE}) = f(CE1, CE2, CE3$$

$$f(CE1, CE2, CE3) =$$

$$F(CE1) + 0.162 * F(CE3) + \frac{F(CE1) * F(CE2)}{F(CE3)}$$

$$f(\mathrm{CS}) = f(\mathrm{CS1}, \mathrm{CS2})$$

$$f\ (CS) = f\ (CS1)^{0.20} * f\ (CS2)^{0.80}$$

En la Tabla 1 se presentan los valores de las variables en estudio.

Tabla 1

Variables del modelo propuesto f (CA, CE, CS)

AÑO	F(CA)$^{0.40}$	F(CE)$^{0.35}$	F(CS)$^{0.25}$	F (CA, CE, CS)
1977	0.897	0.769	0.831	0.574
1978	0.874	0.776	0.829	0.563
1979	0.855	0.762	0.828	0.540
1980	0.853	0.755	0.814	0.524
1981	0.882	0.783	0.828	0.572
1982	0.909	0.791	0.855	0.614
1983	0.893	0.797	0.846	0.602
1984	0.926	0.786	0.845	0.616
1985	0.923	0.775	0.842	0.602
1986	0.917	0.776	0.844	0.601
1987	0.932	0.784	0.848	0.620
1988	0.932	0.777	0.845	0.612
1989	0.930	0.761	0.859	0.608
1990	0.953	0.791	0.862	0.650
1991	0.915	0.860	0.831	0.654
1992	0.924	0.923	0.827	0.706
1993	0.937	0.926	0.834	0.724
1994	0.924	1.063	0.816	0.802
1995	0.955	1.065	0.846	0.860
1996	0.953	1.087	0.833	0.863
1997	0.940	1.125	0.814	0.860
1998	0.901	1.136	0.818	0.837
1999	0.941	1.136	0.823	0.880
2000	0.932	1.163	0.789	0.855
2001	0.960	1.268	0.729	0.888
2002	0.952	1.216	0.796	0.921
2003	0.935	1.256	0.779	0.916
2004	0.950	1.349	0.782	1.002
2005	0.914	1.374	0.765	0.961
2006	0.939	1.402	0.769	1.013
2007	0.918	1.363	0.749	0.937
2008	0.906	1.357	0.762	0.937
2009	0.882	1.357	0.739	0.883
2010	0.904	1.355	0.763	0.935
2011	0.907	1.357	0.762	0.938
2012	0.896	1.373	0.738	0.908
2013	0.902	1.386	0.744	0.929
2014	0.891	1.438	0.724	0.927

Fuente: elaboración propia.

El modelo matemático que describe el comportamiento de los datos de la Tabla 1 es:

$$f\ (CA, CE, CS) = 0.24 + 0.455\ (CE)\ (CS) + 0.346\ (CA)^2$$

Los datos de ajuste del modelo son:

Coeficiente de correlación: r = 0.9973207

Coeficiente de determinación: $R^2 = 0.99387634$

Error Máximo = 0.033314366

Error medio cuadrático = 0.00014889793

Error medio absoluto = 0.0086268834

Debido a que la base fundamental de la sostenibilidad hídrica es la existencia suficiente y oportuna del recurso agua, dentro de este escenario se contempla el suministro de agua de una fuente superficial adicional a la ya existente con un caudal mínimo de 8 m³/s, disponible para iniciar operaciones a más tardar el año 2023, si lo que se desea es mantener el nivel de sostenibilidad por lo menos en 0.74.

El escenario deseado (ver figura 1) según el análisis prospectivo que se desarrolla en este estudio, indica que puede ser alcanzable de acuerdo a los siguientes eventos probabilizados.

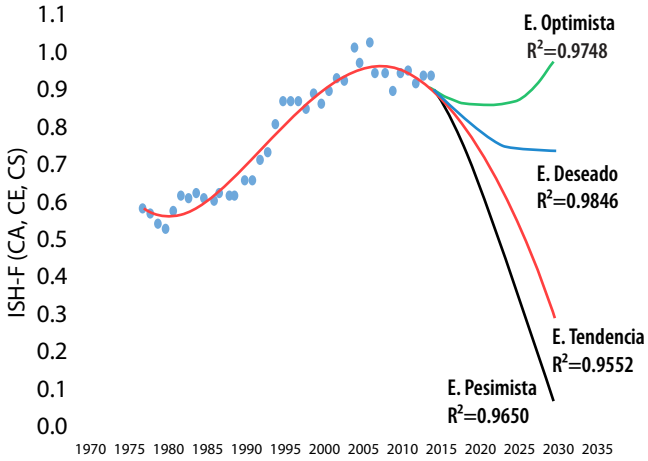


Figura 1. Resumen de los posibles escenarios del índice de sostenibilidad hídrica (ISH).

ISSN 2518-4725.

a) Se inicia programa urgente en cada una de las zonas de estudio para minimizar las fugas (en no más del 5 %) en la red de distribución de agua, lo cual permite recuperar el 75 % del caudal perdido.

b) El precio del agua sube a consecuencia de las inversiones en la renovación de redes de tubería, pues se traslada el costo en la factura del usuario.

c) Al mejorar los caudales de agua disponibles, se aumentan las horas de abasto en el suministro, lo cual relaja al usuario y evita las protestas por el aumento de precio.

d) El nivel de sostenibilidad hídrica alcanzado en este escenario es de un 0.74 para el año 2030, siempre y cuando se comience por emprender estos proyectos no más allá del año 2018.

Discusión de resultados

Al graficar los datos proporcionados por la Tabla 1 se logra observar la tendencia que el índice de sostenibilidad hídrica de la zona de estudio ha tenido a través del tiempo (1977-2014).

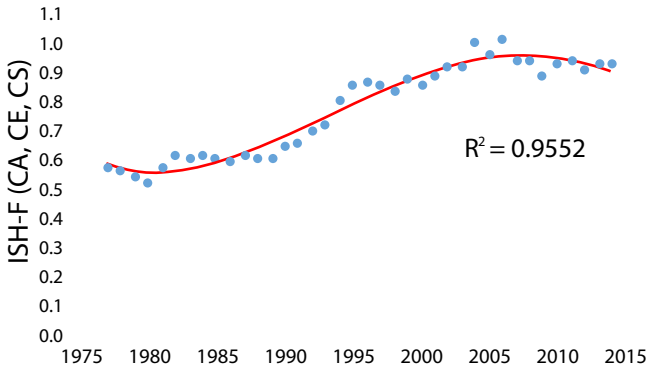


Figura 2. Trayectoria del índice de sostenibilidad hídrica total (ISH).

Se esperaba que la trayectoria de la sostenibilidad hídrica fuese decreciente, o sea, que con respecto al tiempo ésta disminuyera, pero su comportamiento es totalmente opuesto de acuerdo con los datos analizados; y esa es la evidencia construida y proyectada de lo que ha pasado en la cuenca sur de la ciudad de Guatemala.

Sin embargo, en los últimos cinco años, el valor esperado ha comenzado a decrecer desde 0.95 hasta 0.90 (ver Figura 2).

En cuanto al escenario deseado se contempla la implementación de un proyecto de trasvase de agua de una cuenca externa, construcción de un acueducto y de una represa, también se considera la inversión en la renovación de la tubería de abastecimiento para reducir en por lo menos un 5 % de fugas. Y por supuesto la modernización administrativa de EMPAGUA.

Finalmente, en este escenario se plantea la existencia de una ley de aguas con un porcentaje de implementación del 75 % por lo menos para el año 2020, lo anterior implica contar con un abasto de agua de por lo menos 8 m3/s para el año 2023 para la zona de estudio (zonas 11, 12, 13, 14 y 21).

Conclusiones

1. El proceso de modelación matemática permite aproximarse al conocimiento real de lo que sucede con la sostenibilidad hídrica en la subcuenca sur de la ciudad de Guatemala, mediante la descripción de la trayectoria a lo largo del tiempo, el valor en que se encuentra en el presente y proyecciones de escenarios futuros.

2. El modelo matemático establece cuáles componentes son las que más impactan al recurso hídrico, posibilitando la toma de decisiones con base en los modelos individuales que se generan para la valoración particular de cada componente.

Recomendaciones

1 Para futuros estudios relacionados con la variabilidad climática tales como temperatura, precipitación y series ambientales (INSIVUMEH, 2006) se recomienda ampliar la base de datos a 100 o más años de ser posible para encontrar evidencias de cambio climático más sólidas y con mejores tendencias para su análisis.

2 Para hacer realidad el escenario deseado debe contarse con una ley de aguas e implementarla por lo menos en un 75 %, también considera tomar en cuenta el programa de responsabilidad social empresarial, y un artículo en la ley de aguas, que permita que cada propietario de un pozo que usufructúa el agua, proporcione un 20 % del caudal utilizado hacia el sistema gubernamental (EMPAGUA) y que éste se incorpore hacia la distribución de la población. El otro 80 % deberá pagar un impuesto que mantenga los sistemas de distribución en óptimas condiciones y con ello se (reduzca al mínimo las pérdidas por fugas, también se consideran en las zonas de recarga hídrica y otros proyectos como pozos de absorción

Referencias bibliográficas

Enfield, D. (1996). *Relationships of inter-American rainfall to tropical Atlantic and Pacific SST variability.* Geophys. Res. Lett., 23: 3505-3508.

Hernández, B. (2002). *Variabilidad interanual de las anomalías de la temperatura superficial del mar en aguas cubanas y su relación con eventos El Niño-Oscilación del Sur (ENOS),* Centro de Investigaciones Pesqueras, Ciudad de la Habana, Cuba.

INSIVUMEH. (2006). *Archivo de datos hidrológicos y meteorológicos de Guatemala.* INSIVUMEH, CIV, Guatemala. 78 p

NOAA, (2017). *Reporte oficial, enlace en internet* recuperado de: http://elblogdelatierra.blogspot.com/2013/04/ anomalias-de-la-temperatura-global-anual.html

Ohlsson, L. (1999). *Environment, Scarcity, and conflict* – A study of Malthusian concerns. Dept. of Peace and Development Research, University of Goteborg, Suecia.

Información del autor

Ingeniero Químico, Leonel Igancio de la Paz Gallardo, egresado de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2007.

Maestro en Artes en Energía y Ambiente, egresado de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2013.

Doctor en Cambio Climático y Sostenibilidad, egresado de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2018.

Afiliación laboral; Consultor independiente.

ÁREA DE
CIENCIAS APLICADAS

ESTADÍSTICA APLICADA

Revista de la Escuela de Estudios de Postgrado, Vol. 10 No. 1, año 2019.
ISSN 2518-4725.

MODELO DE REGRESIÓN LINEAL APLICADO A LA CANTIDAD DE CONTENEDORES A MOVILIZAR EN PUERTO SANTO TOMÁS DE CASTILLA, GUATEMALA

Linear regression model applied to the amount of containers to mobilize in puerto Santo Tomás de Castilla, Guatemala

Antonio Daniel Asencio Marroquín
Mtro. en Estadística Aplicada
Correspondencia al autor: antonio.asencio31@gmail.com

Recibido: 01 de junio 2019 | Revisado: 24 de junio 2019 | Aprobado: 20 de septiembre 2019
Asesorado por: Mtro. en Hidrología **Juan Carlos Fuentes Montepeque** jcfuentes24@gmail.com

Resumen

Los modelos de regresión lineal se utilizan para pronosticar valores, en este caso aplicados a la cantidad de contenedores a movilizar en Puerto Santo Tomás de Castilla. Se ha identificado que en la mayoría de casos estos modelos son elaborados sin realizar un análisis previo de los datos, razón por la cual, en el presente artículo se describe la metodología utilizada para su elaboración, las variables a incluir en los mismos; así como la verificación de los supuestos que deben cumplir los residuos, para su validez. De igual forma se realiza el análisis por medio de series de tiempo, en donde se comprueban las propiedades de tendencia, estacionalidad y variabilidad de los datos, finalizando con la comprobación de la significancia y ajuste de los modelos generados por regresión lineal y series de tiempo. Como resultado de lo descrito se obtienen dos modelos que explican el comportamiento de los datos en el tiempo por medio de análisis regresión lineal; así como dos modelos que proyectan hasta 2030 mediante la simulación con ARIMA.

Palabras clave

ARIMA, series de tiempo. tendencia, supuestos.

Abstract

Linear regression models are used to forecast future values, in this case applied to the number of containers to be mobilized in Port Santo Tomás de Castilla. It has been identified that in the majority of cases these models are elaborated without carrying out a previous analysis of the data, reason for which, in this document the methodology used for its elaboration is described, the variables to be included in them; as well as the verification of the assumption that the residuals must fulfill, for its validity. In the same way, the analysis is carried out by means of time series, where the trend, seasonality and variability properties of the data are checked, ending with the verification of the significance and the adjustment of the models generated by linear regression and time series. As a result, two models have been obtained that explain the behavior of the data over time by linear regression analysis; as well as two models that project data until 2030 through ARIMA modeling.

Keywords

ARIMA, Time series, tendency, assumptions.

ISSN 2518-4725.

Introducción

La estadística aplicada brinda distintas herramientas para la resolución de problemas que ocurren en distintas situaciones. En puerto Santo Tomás de Castilla, se hacen proyecciones del movimiento de carga, las cuales se utilizan para planificar obras de infraestructura necesarias para atender dicho volumen. Es por esto que el análisis de los datos, previo a la elaboración de un modelo de regresión lineal es importante; ya que con ello se determina la validez y ajuste de los datos, siendo de beneficio para dimensionar de mejor manera los proyectos a corto, mediano y largo plazo. Como solución a la problemática encontrada se elaboran modelos para la cantidad de contenedores a movilizar realizando investigación con base en distintos estudios que aplican metodologías similares, la cual también puede ser utilizada para la elaboración de presupuestos y planes operativos basados en proyecciones de carga.

Desarrollo del estudio

El enfoque del estudio es cuantitativo, ya que los análisis se realizan a partir de una base de datos organizada, logrando la generación de valores futuros mediante el empleo de análisis de regresión y modelos auto regresivos, razón por la cual, el alcance del mismo es descriptivo.

El diseño es no experimental, con corte longitudinal de tendencia, ya que las unidades de análisis y variables del estudio están constituidas por la cantidad de contenedores movilizados por el puerto durante el periodo 2000-2016, en su estado original, y divididas en sub poblaciones dadas por los movilizados en desembarque y embarque.

Para el análisis de regresión lineal se realiza la comprobación de los supuestos que deben cumplir los residuos del modelo, siendo estos: normalidad, linealidad, independencia, homogeneidad y homocedasticidad. Mientras que, para el caso de análisis de series de tiempo, se comprueban las propiedades de los datos: tendencia, estacionalidad y variabilidad, para generar posteriormente modelos ARIMA para la proyección de los datos.

A partir de los resultados, se procede a determinar la significancia de los modelos y a su validación, mediante la interpretación y discusión de los mismos, determinando el ajuste que tienen para explicar el comportamiento de los datos.

Resultados obtenidos

La aplicación de los modelos de regresión lineal, inicia con el análisis previo de los datos, siguiendo la recomendación de Hair, Anderson, Tatham y Black (1999), buscando seleccionar las variables a incluir en los mismos, en búsqueda de obtener el que incluya el menor número posible de variables, principio conocido como parsimonia, verificando la significancia de las mismas mediante la prueba T de Student. Mientras que la validez del modelo se realiza por medio de la prueba F. Los resultados se muestran a continuación.

Tabla 1

Análisis de varianza y coeficientes de regresión asociados al modelo

FUENTE DE VARIACIÓN	F	F TEÓRICO
Modelo importación	270.74	4.60
Modelo exportación	393.64	4.60
COEFICIENTE	**T**	**T TEÓRICO**
Gastos de consumo final (variable modelo importación)	16.45	1.96
Exportaciones de bienes y servicios (variable modelo exportación)	19.84	1.96

Fuente: elaboración propia.

Para comprobar los supuestos que deben cumplir los residuos de los modelos obtenidos para su validez se realizan las siguientes pruebas, a un nivel de significancia del 0.05. Gómez, Aparicio, y Patiño, (2010); Lind, Marchal, y Wathen, (2012); Díaz, (2009)

1. Linealidad: Significancia r
2. Normalidad: Shapiro – Wilks
3. Independencia: Rachas
4. Homogeneidad: T de Student
5. Homocedasticidad: F de Snedecor

Tabla 2

Comprobación de supuestos modelos de importación y exportación

SUPUESTO	ESTADÍSTICO IMPORTACIÓN	ESTADÍSTICO EXPORTACIÓN	VALOR TEÓRICO
1	16.31	21.28	2.14
2	0.8190	0.2662	0.05
3	6	5	4-13
4	0.00014	0.00011	2.14
5	0.59	2.39	2.79

Fuente: elaboración propia.

Antunez (2011) recomienda utilizar la prueba de raíz unitaria de Dickey – Fuller para comprobar la estacionalidad de las series, la cual una vez aplicada presenta los siguientes resultados.

Tabla 3

Resultados prueba de Dickey-Fuller

MODELO	ESTADÍSTICO DICKEY-FULLER	VALOR CRÍTICO
Importación	0.1421	-2.8766
Exportación	0.4530	-2.8765

Fuente: elaboración propia.

El ajuste de los modelos propuestos se determina por el coeficiente de correlación de cada uno de ellos, como se muestra a continuación.

Tabla 4

Coeficiente de correlación de los modelos obtenidos

ANÁLISIS	MODELO	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN
Regresión	Importación	0.9508
Regresión	Exportación	0.9657
Series de tiempo	ARIMA importación	0.9220
Series de tiempo	ARIMA exportación	0.9450

Fuente: elaboración propia.

Las proyecciones obtenidas mediante la modelación ARIMA se pueden visualizar en la siguiente figura.

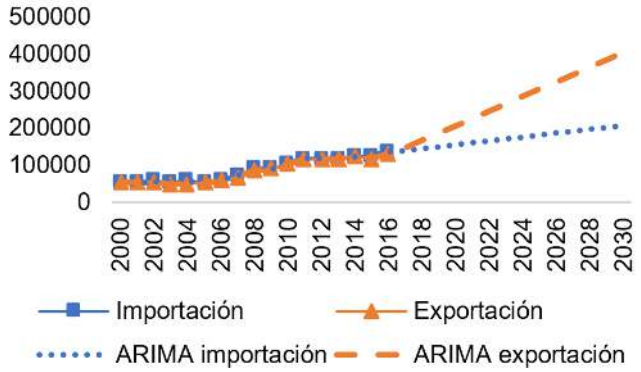


Figura 1. Proyecciones importación y exportación.

Discusión de resultados

La colinealidad existente entre las variables elegidas para formar parte de los modelos, hace necesario realizar las pruebas con las que solamente se explica el comportamiento de los datos.

Derivado de lo anterior, se verifica la validez de los modelos parsimónicos, ya que la prueba de contraste global, según lo muestra la tabla 1, indica que se debe rechazar la hipótesis nula ya que el valor de F calculado es mayor que F teórico en ambos casos.

ISSN 2518-4725.

En cuanto al ajuste, éste se considera bueno, según los resultados expresados en la tabla 4. En cuanto a los supuestos, cuyos resultados están en la tabla 2, se verifica el cumplimiento de los mismos, ya que todas las pruebas que se aplican aportan evidencia de ello. En cuanto a las propiedades de las series de tiempo lo más importante de resaltar es que no cuentan con estacionalidad, según el resultado de la prueba unitaria de Dickey-Fuller ya que el valor crítico es menor que el estadístico de prueba, cumpliendo un precepto fundamental para aplicar modelos ARIMA a las mismas, y cuyas proyecciones se visualizan en la figura 1.

Conclusiones

1. Las variables incluidas en los modelos derivados por el análisis de regresión se determinan mediante la prueba de contraste, buscando la no colinealidad entre las mismas. En las series temporales, se incluyen los componentes de diferenciación para hacer la serie estacional (d=1) y el componente de media móvil (q=1).
2. Los supuestos se cumplen para los modelos generados por medio de análisis de regresión. Las series temporales carecen de estacionalidad.
3. Se obtiene el modelo $Y = 0.26\ X + 12676.01$ para la importación y para la exportación $Z = 1.27\ W - 7809.25$, donde X y W corresponden a gastos de consumo final y exportaciones de bienes y servicios, respectivamente. El modelo a utilizar en el caso de series de tiempo es el ARIMA.
4. Se aplica una prueba de contraste global a los modelos obtenidos por regresión lineal determinando con ello la validez en ambos casos.

   En los modelos de series temporales la robustez está dada por los coeficientes de correlación, que para ambos casos son de un buen ajuste.

Recomendaciones

1. Los modelos de regresión lineal deben utilizarse para describir el comportamiento de los datos a través del tiempo; mientras que las proyecciones se deben realizar con análisis de series de tiempo.
2. Realizar análisis de series de tiempo en los demás puertos del país; así como para los distintos tipos de carga que se movilizan en ellos.

Referencias

Antunez, C. (2011). *Análisis de Series de Tiempo.* Perú. Recuperado de http://www.eumed.net/ce/2011a/chai.htm

Hair Jr., Anderson, R., Tatham, R., y Black, W. (1999). *Análisis multivariante*. España: Prentice Hall.

Gómez, J., Aparicio, J., y Patiño, C. (2010). *Manual de análisis de frecuencias en hidrología.* México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Díaz, A. (2009). *Diseño estadístico de experimentos.* Colombia: Universidad de Antioquia.

Lind, D., Marchal, W., y Wathen, S. (2012). *Estadística aplicada a los negocios y la economía.* México: McGraw-Hill.

Información del autor

Ingeniero Industrial, Antonio Daniel Asencio Marroquín, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2010.

Maestro en Estadística Aplicada de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2018.

Afiliación laboral; Empresa Portuaria Nacional Santo Tomás de Castilla.

Revista de la Escuela de Estudios de Postgrado, Vol. 10 No. 1, año 2019.
ISSN 2518-4725.

PRONÓSTICOS DE CORTO PLAZO DEL COMPORTAMIENTO DE LA ACTIVIDAD MANUFACTURERA DE PRODUCTOS PLÁSTICOS EN GUATEMALA, A PARTIR DE UNA ENCUESTA DE OPINIÓN EMPRESARIAL

Short-term forecasts of the behavior of the production activity of plastic products in Guatemala, of a business opinion survey

Elmer Humberto Lémus Flores
Mtro. en Estadística Aplicada
Correspondencia al autor: elmerhlf@gmail.com

Recibido: 01 de julio 2019 | Revisado: 17 de agosto 2019 | Aprobado: 22 de septiembre 2019
Asesorado por: Mtro. en Economía y Finanzas **Edson Roger Ortíz Cardona**

Resumen

En Guatemala se necesita disponer de estadísticas de corto plazo con la frecuencia, oportunidad, calidad y especificidad idónea para el análisis y pronóstico del comportamiento de las actividades económicas. Esta investigación satisface esta necesidad mediante el uso de las expectativas recolectadas a partir de una encuesta de opinión empresarial.

El instrumento base parte del cuestionario armonizado para América Latina de la CEPAL, el cual permite la construcción de indicadores utilizados para el análisis temporal y sirven como insumo para un modelo de regresión probabilístico, con potencial explicativo superior al 96 % (r2), comprobando su utilidad.

Este estudio permite mejorar las técnicas de análisis y predicción, reduciendo el riesgo y la incertidumbre en la planificación de corto plazo, así como brindar estabilidad a la producción e inversión de las empresas, aportando confianza en la sociedad sobre el desempeño económico.

Palabras clave

Regresión, encuesta, probabilística, expectativa económica.

Abstract

In Guatemala, it is necessary to have short-term statistics that have the frequency, opportunity, quality and specificity suitable for the analysis and forecasting of the behavior of economic activities. This research satisfies this need by using the expectations gathered from a business opinion survey.

The basic instrument is part of the harmonized questionnaire for Latin America of ECLAC, which allows the construction of indicators used for the temporal analysis and serves as input for a probabilistic regression model, with explanatory potential higher than 96 % (r2), verifying its utility.

This study allows improving the analysis and prediction techniques, reducing the risk and uncertainty in the short-term planning, as well as providing stability to the production and investment of the companies, providing confidence in society on economic performance.

Keywords

Regression, survey, probabilistic, plastic products, economic expectations.

ISSN 2518-4725.

Introducción

Esta es una propuesta para satisfacer la necesidad de contar con información estadística de corto plazo, que cumpla con las características idóneas y permita reducir la incertidumbre, el riesgo y mejorar el desempeño empresarial a través de una mejor planificación de la inversión. Se busca estimar el potencial explicativo de indicadores derivados de una encuesta de opinión empresarial de la actividad manufacturera de productos plásticos, para realizar pronósticos de corto plazo (periodo de estudio de abril a noviembre de 2017). Las bases teóricas utilizadas corresponden a las expectativas económicas desde la perspectiva expuesta por Samuelson y Nordhaus (2010), al modelo probabilístico de pronósticos expuesto por Estrada y Urtasun (1998), desarrollado inicialmente por Theil (1952), bajo la justificación teórica de Anderson (1951) y con los lineamentos recomendados por Gallardo y Pedersen (2008).

Desarrollo del estudio

La línea de investigación es la de pronósticos, el enfoque cuantitativo, el alcance descriptivo y correlacional, el diseño no experimental y se considera como estudio de panel rotativo.

La investigación se centra en la demostración de la utilidad estadística de la información no convencional para el análisis y pronóstico de corto plazo. Esta información se deriva de una encuesta de opinión empresarial, como exponen Gallardo y Pedersen (2008). Asimismo, se busca establecer un precedente para Guatemala con el uso del Cuestionario Armonizado para América Latina propuesto por CEPAL. Por lo que el instrumento que se utiliza para la recolección de información contiene un total de 10 preguntas, de las cuales seis corresponden al cuestionario armonizado y cuatro se agregan con base en aportes de un grupo de expertos que participan en la actividad en cuestión. Estas preguntas tienen una formulación cerrada sobre tres posibles respuestas respecto al comportamiento futuro de las variables (optimista, pesimista y nula). El cuestionario cuenta con un Coeficiente de Alfa de Cronbach de 0.66 lo cual otorga confiabilidad aceptable para etapas iniciales de investigación, así como su comparación internacional que le aporta validez de contenido, criterio y constructo.

El marco muestral está conformado por un total de 35 elementos, estimados a través del muestreo estratificado por el ingreso, seleccionados por medio de las técnicas de muestreo irrestricto aleatorio y muestreo sistemático; y administrados a través del panel rotativo. El error de muestreo es de 15.4 % y una tasa de sustitución de 48 %.

La información se recolecta los primeros tres días hábiles de cada mes y se transforma a porcentajes de respuesta optimista S^e_{t+1} y pesimista C^e_{t+1}, que posteriormente se someten a un intervalo de indiferencia, el cual Estrada y Urtasun (1998) lo definen alrededor de cero y representa las respuestas nulas de la evolución en el corto plazo de la variable. Lo que en términos de la distribución normal estandarizada es:

$$\theta(C^e_{t+1}) = C^e_{t+1} \quad (1)$$

$$\theta(S^e_{t+1}) = 1 - S^e_{t+1} \quad (2)$$

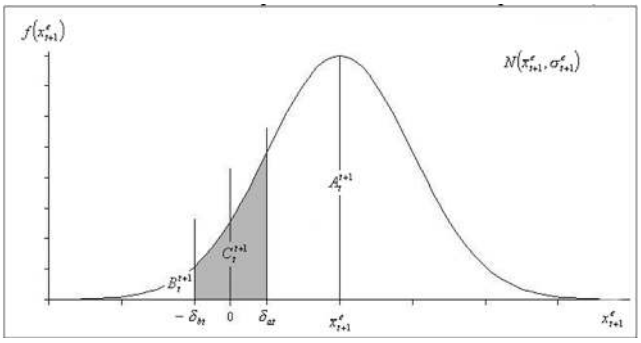


Figura 1. Distribución normal de la media de expectativas.

Fuente: Clavería y Pons (2001, p.10).

Con estos resultados se define la variable de síntesis:

$$d^e_{t+1} = \frac{C^e_{t+1} + S^e_{t+1}}{C^e_{t+1} - S^e_{t+1}} \quad (3)$$

Estrada y Urtasun (1998) recomiendan estimar los límites al intervalo de indiferencia utilizando:

$$\bar{x}_t = \alpha' + \beta' d_t \quad (4)$$

En donde los parámetros α' y β' corresponden a a^e_{t+1} y b^e_{t+1}, variables definidas como los límite del intervalo de indiferencia pesimista y optimista, respectivamente. Con los resultados de esta regresión simple del indicador de referencia (RI) (variación interanual del volumen de producción de la actividad en cuestión), es posible realizar la regresión probabilística a partir de:

$$\bar{x}^e_{t+1} = \frac{b^e_{t+1} - a^e_{t+1}}{2} + \frac{b^e_{t+1} + a^e_{t+1}}{2} d^e_{t+1} \quad (5)$$

donde $\bar{x}^e_{t+1}$ representa la estimación de RI, mientras que d^e_{t+1} es construido con las respuestas de la encuesta referentes a las expectativas del comportamiento del periodo siguiente (t+1).

Los resultados del modelo deben cumplir los supuestos clásicos de regresión según Gujarati y Porter (2010), a través de: Shapiro Wilks para la normalidad; análisis de la prueba F y t de Student para la multicolienalidad; prueba de Park para la homocedasticidad; y Durbin-Watson para la autocorrelación. Cabe indicar que también debe cumplir los contrastes de insesgadez (significancia estadística del error "expectacional") y eficiencia (significancia de los parámetros y el estadístico F de la regresión), descritos por Clavería y Pons (2001).

Por último, los porcentajes de respuesta que se utilizan son simples, es decir, que no tienen ninguna ponderación de importancia sobre una variable de referencia adicional.

Resultados obtenidos

Los porcentajes de respuesta optimista y pesimista tienen una correlación alta respecto al indicador de referencia, lo cual permite al estadístico de síntesis obtener una mejor explicación de su comportamiento:

Tabla I.

Coeficiente de correlación entre estadísticos de la encuesta y serie de referencia

	Series simples	
r	**RI**	**St+1**
St+1	97.9 %	
Ct+1	-93.8 %	-91.1 %

Fuente: elaboración propia.

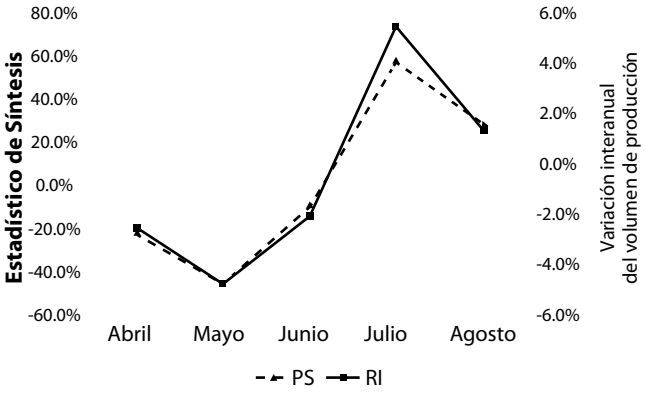


Figura 2. Estadístico de síntesis e Indicador de referencia.

El comportamiento del estadístico de síntesis se ajusta significativamente al comportamiento del indicador de referencia, lo cual permite identificar una relación estrecha entre las expectativas económicas de los empresarios y los resultados históricos obtenidos en el desempeño de la producción. Esto permite al modelo utilizar un buen estimador para el pronóstico.

Tabla 2.

Resultados del modelo probabilístico

Mes	Inverso de la distribución normal		dt+1	xt+1	RI
	St+1	Ct+1			
Abril	0.6302	-0.4047	-0.2179	4.19%	-2.58%
Mayo	0.6745	-0.2533	-0.4539	3.15%	-4.75%
Junio	0.4837	-0.4047	-0.0890	4.76%	-2.10%
Julio	0.1800	-0.6745	0.5787	7.71%	-5.40%
Agosto	0.3661	-0.6522	0.2809	6.40%	5.40%
Pronóstico	0.0896	-0.8164	0.8021	8.70%	1.30%

Fuente: elaboración propia.

A partir de la Ec. (4) se obtienen los límites al intervalo de indiferencia en aproximadamente -0.0073 para las respuestas pesimistas y 0.0957 para las optimistas. Con el modelo probabilístico de la Ec. (5) se obtiene la serie estimada, la cual cumple las pruebas de validación de los supuestos clásicos y los contrastes de insesgadez y eficiencia, dotando de consistencia estadística a los resultados, aunado a un r^2 superior de 96 %.

Discusión de resultados

Según los resultados, se espera un crecimiento del volumen de producción de la actividad manufacturera de productos plásticos de 8.7 % para el siguiente periodo, cabe indicar que este pronóstico tienen un umbral temporal de tres a cuatro meses. La confiabilidad del pronóstico es superior al 96 %, la cual se considera alta y representa la utilidad estadística de las series obtenidas a través de una encuesta de opinión empresarial.

Entre las principales bondades de este método para solucionar al problema estadístico identificado en el país, está su oportunidad de disponer de la información en un periodo significativamente menor a las estadísticas convencionales, tal como el Índice Mensual de la Actividad Económica (IMAE), así como la posibilidad de obtener series estadísticas específicas de las actividades económicas.

Conclusiones

1. El potencial explicativo del modelo aplicado, a partir de una encuesta de opinión empresarial, es superior al 96 % según el coeficiente de determinación, por lo que se evidencia su utilidad para la planificación empresarial.
2. Se estima que la actividad manufacturera de productos plásticos en Guatemala experimente un crecimiento de aproximadamente 8.7 % para los meses de septiembre a noviembre del 2017.

Recomendaciones

1. Considerar el uso de indicadores estadísticos ponderados para las estimaciones, así como el uso de otros modelos de pronósticos, como regresiones simples, múltiples y logarítmicas.
2. Adaptar el cuestionario a las particularidades de cada actividad económica, así como del refinamiento del marco muestral respectivo. Esto permitirá especificar de mejor manera los resultados esperados por actividad.

Referencias bibliográficas

Clavería, O. y Pons, E. (2001). *Una estimación de las expectativas sobre precios industriales en Cataluña a partir de las encuestas de opinión*. Universidad de Barcelona, España.

Estrada, Á. y Urtasun, A. (1998). *Cuantificación de Expectativas a partir de las Encuestas de Opinión. Documento de trabajo No. 9803.* Banco de España. ISSN: 0213-2710. España.

Gallardo, M. y Pedersen, M. (2008). *Encuestas de opinión empresarial del sector industrial en América Latina*. Comisión Económica Para América Latina y el Caribe CEPAL. Santiago de Chile, Chile.

Gujarati D. y Porter D. (2010). *Econometría.* McGraw – Hill / Interamericana Editores, S.A. de C.V. 5ª edición. México, D. F. P.946 ISBN: 978-607-15-0294-0

Samuelson, P. y Nordhaus, W. (2010). *Macroeconomía. Con aplicaciones a Latinoamérica.* McGraw - Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V. 19ª edición. México, D. F.

Información del autor

Licenciado en Economía (2014); Licenciado en Administración de Empresas (2015), graduado de la Facultad de Ciencias Económicas; Maestría en Administración Financiera (2017) graduado de la Escuela de Estudio de Postgrado, Facultad de Ciencias Económicas; y Maestría en Estadística Aplicada (2018), graduado de la Escuela de Estudio de Postgrado, Facultad de Ingeniería. Títulos otorgados por la Universidad de San Carlos de Guatemala.

ÁREA DE DESARROLLO SOCIO AMBIENTAL Y ENERGÉTICO

ENERGÍA Y AMBIENTE

Revista de la Escuela de Estudios de Postgrado, Vol. 10 No. 1, año 2019.
ISSN 2518-4725.

AHORRO ENERGÉTICO MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DEL USO DE VARIADORES DE FRECUENCIA, EN EL TRATAMIENTO DE JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR, INGENIO LA UNIÓN

Energy saving through the application of the use of frequency variators, in the treatment of sugar juice, Ingenio la Unión

Luis Enrique González Pivaral
Mtro. en Energía y Ambiente
Correspondencia al autor: luisenriquepivaral@gmail.com

Recibido: 01 de agosto 2019 | Revisado: 14 de octubre 2019 | Aprobado: 26 de octubre 2019

Asesorado por: Mtro. en Energía y Ambiente
Byron de Jesús López Maldonado bjim1972@hotmail.com

Resumen

La empresa se dedica a la producción de azúcar, lo que conlleva varios procesos que pasan la materia prima y donde se utiliza gran cantidad de energía. La energía la consumen principalmente los motores eléctricos y sin embargo no existe un estudio que permita conocer cuál es el consumo que estos representan. Este consumo se debe a que los motores trabajan al 100 % de su capacidad aun cuando no es necesario. Para mejorar este consumo, es necesario implementar variadores de velocidad y así utilizar únicamente la energía necesaria, según demanden los procesos. Para determinar el consumo, se realizan pruebas en motores con y sin variador para comparar los datos obtenidos. Los resultados demuestran un ahorro del 43 % de energía al utilizar variador, lo que representa un ahorro de $ 21,168.00 por zafra. Los datos demuestran que esta tecnología es una buena estrategia para disminuir el consumo de energía del área, aumentando la eficiencia de la fábrica y disminuyendo el impacto ambiental.

Palabras clave

Variador de frecuencia, motor, ahorro de energía, potencia eléctrica.

Abstract

The company is dedicated to the production of sugar, which entails several processes where the raw material passes and uses a lot of energy. Energy is mainly consumed by electric motors, nevertheless there's not study that allows knowing what is the consumption that these represent. This consumption is due to the engines work at 100 % of its capacity even when is not necessary. To improve this consumption, is necessary implement variable frequency drive and use only the energy required according to the demands of the processes. To determine the consumption, tests were carried out on motors with and without variable frequency drive, to compare the data obtained. The results show a saving of 43 % of energy using variable frequency drive. This represents a saving of $ 21,168.00 by zafra. The data show that this technology is a good strategy to reduce the energy consumption in the area, increasing the efficiency of the factory and reducing the environmental impact.

Keywords

Frequency drive, motor, energy saving, electric power.

ISSN 2518-4725.

Introducción

Las industrias azucareras cuentan con procesos que consumen gran cantidad de energía eléctrica. Los motores son de los equipos que más energía consumen. El gasto que representan y que se desconoce, genera un impacto en la producción de energía y baja eficiencia energética del proceso.

Para reducir el consumo de los motores, se presentan los variadores de velocidad como una solución a dicho problema. Estos equipos permiten optimizar procesos y reducir el consumo de energía. En el estudio se realizan pruebas en motores con y sin variador, para determinar el consumo de energía que estos representan. Los datos que se obtienen permiten determinar el ahorro e inversión que representan la utilización de variadores. En la investigación se mencionan los principios básicos de funcionamiento de motores de inducción y variadores de frecuencia y se propone a estos últimos como la solución respecto al ahorro energético y mejora en el control de proceso, aspectos que son fundamentales en las industrias azucareras que cogeneran energía.

Desarrollo del estudio

La investigación es de tipo cuantitativo descriptivo. Para el desarrollo se toman mediciones de las variables importantes y luego se comparan. Se establece la factibilidad de implementar variadores de frecuencia, así como las pérdidas y ganancias que esto implica, con el fin de incrementar el ahorro energético de la empresa.

Primeramente, se revisa la base de datos de los motores eléctricos declarados por el taller de electricidad y se listan los parámetros y características de los mismos.

Se revisan los registros del consumo de energía eléctrica y de la producción de energía durante la zafra para así tener una base de comparación con los resultados obtenidos. En las pruebas se toman en cuenta motores que están instalados dentro de un lazo de control, con y sin variador.

Se utiliza la base de datos para determinar el consumo energético de cada motor sin variador. Posteriormente, se seleccionan los equipos con variador y sin variador más convenientes para realizar las mediciones. En este caso, que fueran de una potencia elevada y con características similares.

Las variables medidas son: voltaje, corriente y consumo de energía. Las dos primeras son monitoreadas con amperímetros y voltímetros marca Fluke. El consumo de energía del área de clarificación, se determina por medio de ION 6200 CT´s 1000/5 AMP.

Con los resultados obtenidos se calcula la energía consumida por cada motor. Se comparan los motores según su comportamiento. Se determina la relación existente entre el consumo de motores sin variador y con variador. Se estima el consumo que tendría el área si todos los motores utilizaran variadores de velocidad, así como el consumo que representan los motores (con y sin variador) con respecto a la energía consumida por la fábrica.

Por último, se determina la viabilidad técnica de los motores instalados, considerando la implementación de filtros para evitar picos de voltajes, ventilación forzada y cable especial para minimizar los efectos de onda reflejada e inducción de corrientes en la alimentación al motor. Además, se obtiene el valor económico que representa utilizar variadores de frecuencia en los motores de prueba durante el tiempo que dura la zafra. Con este dato e información de los proveedores, se calcula el período de amortización de dicha inversión. Además, se determina el ahorro si se implementan variadores de frecuencia en el resto de los motores del área.

Resultados obtenidos

Basados en los datos de los motores, se determina que el 85 % de los mismos tienen una capacidad por debajo de los 50 HP, con un 60 % de motores que utilizan variador de velocidad y un 40 % que no utiliza.

Los resultados de las pruebas muestran una disminución de consumo de energía eléctrica al utilizar variadores de frecuencia. Teniendo un consumo de energía trabajando al 100 % de 146 KWH, mientras que al utilizar variador de frecuencia, el consumo promedio es de 83 KWH.

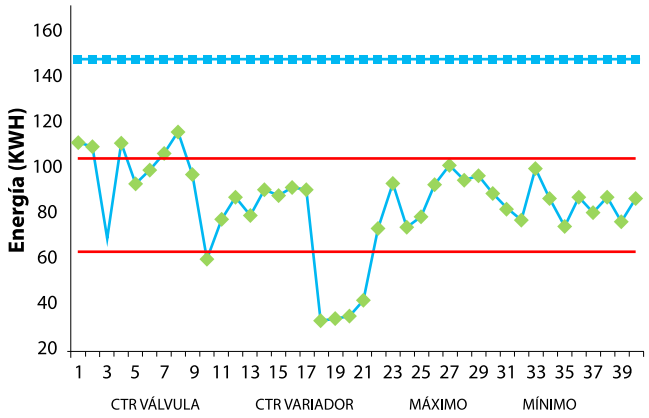


Figura 1. Consumo de energía eléctrica.

Las variaciones en el consumo de los motores eléctricos con variador, se deben al lazo de control, ya que el variador es el que realiza la regulación.

De los datos obtenidos, se determina que existe una disminución en el consumo de energía de un 43 %. Al considerar este porcentaje como un ahorro fijo al utilizar variadores de frecuencia. Se determina el consumo de energía que se tendría si todos los motores listados utilizan variador de velocidad, con base a sus datos de placa (Figura 2).

El resultado de utilizar variadores en el resto de los motores genera un ahorro de energía de 218.7 KWH, comparado con el consumo actual de 836.7 KWH.

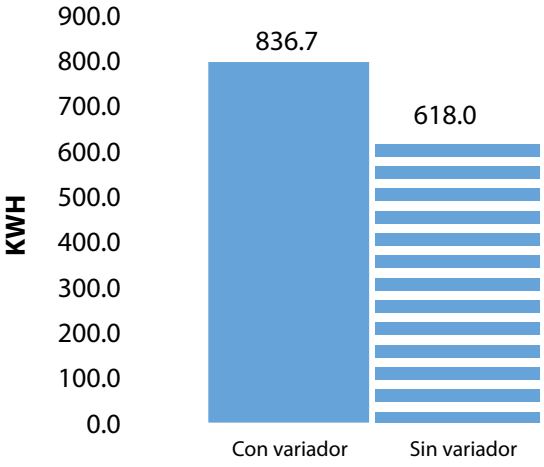


Figura 2. Consumo de energía con y sin variador.

Ahora bien, implementar variadores a los motores instalados que en su mayoría son estándar. Requiere que se considere la instalación de filtros, ventilación forzada y utilizar cable blindado. Estos elementos son externos al propio motor, lo que lo hace técnicamente viable para utilizar variador de velocidad, siempre y cuando se consideren los elementos anteriores.

Tomando los promedios de consumo para ambos casos y considerando el costo de energía de $0.08 por KWH de consumo, se obtiene un ahorro de $21,168.00 por zafra para el motor de la prueba.

Tabla 1
Costo/ahorro de energía

Consumos de energía	Costo de energía a 100 % de la velocidad	Costo de energía a velocidad variable	Ahorro de energía en el periodo de zafra
Cosumo pruebas	$ 49,056	$ 27,888	$ 21,168
Consumo placa	$ 62,496	$ 37,968	$ 24,528

Fuente: elaboración propia.

ISSN 2518-4725.

Discusión de resultados

Los resultados confirman la reducción de consumo de energía al utilizar variadores de frecuencia. Tiene para estas pruebas un consumo únicamente de 83 KWH en el motor con variador, esto representa un ahorro del 43 % menos de consumo de energía con respecto al motor que no utiliza variador. Esta diferencia de consumo se debe a que el motor con variador trabaja al 100 % de su capacidad solo por momentos y no constantemente. Además del ahorro energético, se tiene uno económico, ya que al considerar el precio actual de la energía como $ 0.08 por KWH consumido, se obtiene que el ahorro existente entre utilizar y no utilizar variador de velocidad es de $ 5.04. Lo que al final del período de zafra (175 días) equivale a $ 21,168.00. Luego de considerar el dato de ahorro por zafra, invertir en un sistema con variador de velocidad para un motor de 250 HP resulta viable, debido a que el precio de inversión está alrededor de $22,986.20. Por lo tanto, implementarlo significaría que se recupera la inversión en menos de un año (7 a 8 meses).

Conclusiones

1. Se determina que existe una disminución de 43 % en el consumo de energía, al utilizar variadores de velocidad en los motores del área de tratamiento de jugo.
2. Se determina que el consumo de energía de los motores listados en el estudio. Representa cerca de 0.9 MWH incluyendo motores con variadores y sin variador.
3. El ahorro económico al implementar variadores de velocidad para el caso de estudio es de $21,168.00 por zafra.

Recomendaciones

1. Revisar los lazos de control de los procesos para la implementación de variadores. Verificar las características del motor a utilizar, para determinar los elementos que mejor se adecuen al equipo.
2. Implementar por fases variadores de velocidad en el resto de las áreas de la fábrica.
3. Considerar un plan de ahorro energético para la fábrica, aprovechando la generación de energía con biomasa.

Referencias

Agencia Andaluza de la Energía. (2011). *Metodología para la elaboración de auditorías energéticas en la industria.* Sevilla: Servigraf Artes Gráficas.

Álvarez, M. (2000). *Convertidores de frecuencia, controladores de motores y SSR*. España. Marcombo Boixareu Editores. ISBN: 84-267-1268-1.

Castellanos, J., Mahecha, D., & Nuñes, E. (2012). *Variadores de frecuencia eléctrica en el control de bombeo de hidrocarburos para reducción de costos energéticos.* Revista Colombiana de Tecnologías Avanzadas.

Quispe, E., & Mantilla, F. (2004). *Motores eléctricos de alta eficiencia.* Energía y computación, 12(1), 11.

WEG. (2016). Guía técnica - *Motores de inducción alimentados por convertidores de frecuencia PWM.* Recuperado de http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motores-de-induccion-alimentados-por-convertidores-de-frecuencia-pwm-50029372-articulo-tecnico-espanol.pdf

Wildi, T. (2007). *Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia.* México: Pearson Educación.

Información del autor

Ingeniero Electrónico, Luis Enrique González Pivaral, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2013.

Graduado de la Escuela de Estudios de Postgrado FIUSAC en el año 2018.

Afiliación laboral; Ingenio La Unión.

Revista de la Escuela de Estudios de Postgrado, Vol. 10 No. 1, año 2019.
ISSN 2518-4725.

ESTUDIO ENERGÉTICO PARA EL CUMPLIMIENTO DE PARÁMETROS DE LA NORMA ISO 50001 EN UNA REFINERÍA DE AZÚCAR

Energy study for compliance with parameters of ISO 50001 in one sugar refinery

Edy René Aguilar Chic
Mtro. en Energía y Ambiente
Correspondencia al autor: aguilaredy.r@gmail.com

Asesorado por: Mtro. en Energía y Ambiente
Byron de Jesús López Maldonado bjlm1972@hotmail.com

Recibido: 01 de agosto 2019 | Revisado: 10 de septiembre 2019 | Aprobado: 16 de octubre 2019

Resumen

El ingenio La Unión S.A., consume de 10 a 18 MWH de energía según la operación. Desde la perspectiva de eficiencia energética en la refinería es necesario realizar estudios adicionales y aportes que contribuyan a obtener un área eficiente y competitiva en el manejo de energía. Es necesario determinar qué lineamientos y bases, según la norma ISO 50001 permiten obtener un ahorro energético en el área. Se determina el consumo promedio y su desviación estándar, y se utilizan metodologías propuestas por la norma ISO 50001, para obtener ahorros y optimización de energía, se propone la implementación de variadores de velocidad a los motores eléctricos y obtener ahorros tangibles de 40 % del consumo, además se propone la revisión de luminarias en el área y actualización a tecnología led, se determina que el retorno de inversión es de aproximadamente 1 año. A partir del segundo año se ven reflejados los ahorros.

Palabras clave

Eficiencia energética, ISO 50001, variador eléctrico.

Abstract

The sugar mill La Unión S.A. consumes 10 to 18 MWH of energy according to the operation. However, from the perspective of energy efficiency in the refinery, it is necessary to carry out additional studies and contributions that lead to achieving an efficient and competitive area in energy management. It is necessary to determine which guidelines and bases according to the norm ISO 50001 allow to obtain a saving and energy consumption in the area. The average consumption and its standard deviation are determined, and following methodologies proposed by ISO 50001, in order to obtain savings and optimization of energy, it is proposed the implementation of variable speed drives to electric motors in order to optimize consumption and have savings tangible of 40 % of the consumption, in addition it is proposed the revision of lighting in the area and update to led technology, it is determined that the return of investment is approximately 1 year. The savings Will start from the second year.

Keywords

Energy efficiency, ISO 50001, vfd.

ISSN 2518-4725.

Introducción

Al realizar el estudio energético, se obtienen las líneas base de consumo y los indicadores de medición apropiados, así mismo se establecen cuáles metodologías y requerimientos son necesarios para crear una política y planificación energética. El cumplimiento de parámetros para mejorar el uso y eficiencia, tanto de la política como de la planificación energética, permite obtener grandes beneficios a la empresa; se realizan análisis estadísticos de promedios y desviación estándar de consumos energéticos, diagrama de máximos y mínimos de consumos de potencia en las áreas y diagramas de dispersión de consumos de energía en el tiempo, de acuerdo con Escobar (2010).

Se a establecen indicadores y líneas base de consumo para el área de refinería de azúcar, en función del comportamiento de los consumos energéticos. Michel de Laire, (2013). Al implementarse medidas, según la norma ISO 50001, que indiquen los requerimientos necesarios para adquirir equipos de alta eficiencia, uso de luminarias de alta calidad y consumo moderado, el resultado se refleja en un ahorro energético. (Álvarez, 2009).

El monitoreo y control de eficiencia en procesos, se establece realizando un comparativo entre las líneas base de consumo y las mejoras e indicadores propuestos, para optimizar la energía. (Agencia Andaluza de la Energía, 2011).

Desarrollo del estudio

La investigación es de tipo cuantitativo descriptivo, ya que busca determinar por medio de un estudio energético en una refinería de azúcar, cuáles son las líneas base de consumo de energía y determinar qué parámetros e indicadores son necesarios cumplir, para obtener el mejor aprovechamiento y uso de la energía eléctrica, según la normativa ISO 50001. (ISO, 2016)

El estudio se limita a la parte eléctrica en consumos de energía y no se realiza estudio sobre transferencia de calor y/o vapor dado que no se cuenta con los equipos necesarios para el análisis en refinería.

Una vez establecidos los tipos de equipos y cantidades instaladas en refinería se verifican los usos y consumos energéticos en el área. Para la medición de las variables descritas anteriormente se utilizan amperímetros (Fluke 373), multímetros (Fluke 187), y un medidor de energía (Schneider ION 6200).

Resultados obtenidos

En condiciones normales de operación en la refinería de azúcar (02/12/2015 al 28/02/2016) se obtiene la figura 1, en donde se muestra que el consumo promedio de producción de azúcar refino es de 20257.07 KWH/día, con una desviación media de 1339.63 KWH.

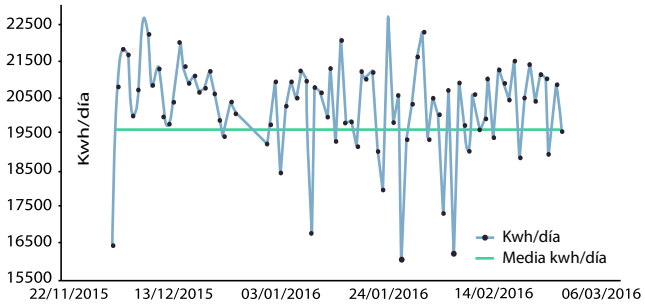


Figura 1. Consumo de energía en refinería operación normal.

En la tabla 1, se detalla la cantidad de luminarias instaladas en cada uno de los niveles del área de refinería de azúcar.

Tabla 1

Luminaria instalada en refinería

Nivel	Ubicación de lámparas instaladas	Potencia de Consumo (Watts)		
	Descripción de niveles	4x40W	2x40W	20W
1	Bombas y motores, sanitarios, pasillos	20	5	10
2	Centrífugas de refinería,	25	5	10
3	Filtros, tanques, motores, pasillos	20	0	0
4	Clarifiación, desendulce y agistaddores	20	5	0
5	Área de tachos, pasillos, cuarto de control	25	10	10

Fuente: elaboración propia.

Se determina que al realizar la sustitución del tipo de luminaria fluorescente por tecnología led, se puede obtener un ahorro significativo del 70.9 %, es decir, con tecnología led el consumo total por luminarias para abarcar los 5 niveles de refinería es de 70.56 KWH/día.

El costo del consumo anual de energía por luminarias led utilizada es de USD $4,378.25 comparado con el costo de luminarias fluorescentes de USD $15,040.92 representa una diferencia y ahorro de USD $10,662.67. Considerando que el costo de sustitución completa a tecnología led es de USD $12,250.00 el retorno de inversión al implementar la tecnología led es de aproximadamente 1 año y 2 meses.

Con la implementación de 4 variadores a 4 motores eléctricos en el nivel "0" de la refinería de azúcar, se puede obtener un ahorro de 358.08 KWH/día, de la diferencia del consumo total de potencia de un motor con un arrancador de 895.2 KWH/día y el consumo utilizando variador de frecuencia de 537.12 KWH/día.

Discusión de resultados

El consumo promedio de energía en refinería, según los datos muestreados, es de 20257.07 KWH/día, con una desviación estándar de 1339.63 KWH y un coeficiente de variación de 6.61 %, lo cual indica que existe una pequeña dispersión de los datos. La producción promedio de azúcar refino para el mismo período es de 875,771 kilogramos al día.

Se determina que el parámetro más significativo para un ahorro energético, según la norma ISO 50001, es el cambio de tecnología en luminarias, ya que se optimiza el consumo de energía y se obtiene el 70.9 % de ahorro. El costo del cambio de luminarias led tiene un retorno de inversión de aproximadamente 1 año y 2 meses.

Otro parámetro es el uso de variadores de velocidad para ahorrar energía en motores eléctricos, se muestran los consumos de potencia con la implementación de un variador (VFD) de 50 hp, operando a la potencia nominal 100 % y operando a 85 % de su velocidad.

Tabla 2

Comparativo de potencia con y sin variador

Descripción	Valores
Potencia nominal de motor	37.3 KW
Velocidad motor % con VFD	85%
Potencia consumida a 85% de velocidad con VFD	62%
Potencia consumida a 85% de velocidad con VFD	23.18 KW

Fuente: elaboración propia.

El consumo de energía a 85 % de velocidad es de 23.18 KW que comparado con el consumo de energía al 100 % (37.3KW) representa un ahorro del 38 %. Considerando dicho ahorro para un período de operación y producción de 180 días (4320 horas), el ahorro de energía es de 61,231.68 KWH que equivale a USD $4,286 (costo por 1KWH de USD $0.07).

Con la implementación de 12 variadores de velocidad a motores eléctricos se disminuye la línea base de consumo en refinería y se obtiene un ahorro de 1,074.84 KWH/día equivalente a USD $13,542.98 por 180 días de operación. El retorno de inversión para un variador de 37.30KW en marca ABB considerando un precio en el mercado de $5000, es de aproximadamente 7 meses (operando 24H/día).

Conclusiones

1. El consumo energético promedio del edificio de refinería de azúcar, es de 20257 KWH/día, con una desviación estándar de 1339.63 KWH/día y coeficiente de variación de 6.61 %.

ISSN 2518-4725.

2. Los lineamientos propuestos para optimizar el consumo energético y obtener ahorros en refinería comprenden la sustitución de tecnologías en luminarias de todo el edificio, la implementación de variadores para optimizar el consumo de potencia en motores.

3. Los indicadores de desempeño energético analizados son el sistema de iluminación y control de motores eléctricos con variadores de velocidad. Se obtiene un ahorro energético de 1246.68 KWH/día que representa una disminución en la línea base de consumo general de refinería y equivale a una reducción aproximada del 6.1 % del consumo base en refinería.

4. Los parámetros que permiten conducir al área de refinería sobre un SGE orientado al ahorro y uso eficiente de la energía son: identificación del área y de equipos eléctricos instalados, establecimiento del uso y consumo de energía eléctrica, monitoreo constante de los consumos energéticos en el área, elaboración y control de registros, evaluación de indicadores de desempeño energético e identificación de oportunidades de mejora.

Recomendaciones

1. Instalar seis medidores de energía para monitorear el consumo de energía en los tableros eléctricos de refinería, para analizar de manera sectorizada las líneas base de consumo.

2. Invertir en motores eléctricos de alta eficiencia de 93 %, que comparados con los motores de eficiencia estándar de 89 %, pueden garantizar el mayor aprovechamiento en las futuras compras de motores eléctricos para el área.

3. Implementación de 12 variadores de frecuencia a motores eléctricos en el área, para garantizar una mayor optimización y ahorro.

Referencias bibliográficas

Agencia Andaluza de la Energía, c. d. (2011). *Metodología para la elaboración de auditorías energéticas en la industria*. Sevilla: Servigraf artes gráficas.

Escobar, O.(2010) *Administración de la Energía indispensable en empresas cogeneradoras*, Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla: Reporte interno Ingenio La Unión.

Álvarez, C. (2009). Planificación energética. Guatemala: Asistencia Técnica.

ISO (2016). Recuperado de Normas ISO: http://www.iso.org/iso/home/standards.htm

Michel de Laire, A. (2013). *Guía de implementación de sistema de gestión de la energía basada en ISO 50001*. Chile; Agencia Chilena de eficiencia energética, Tercera edición.

Información del autor

Ingeniero Electrónico, Edy René Aguilar Chic, Facultad de ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2013.

Maestría en Energía y Ambiente, Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2018.

Afiliación laboral; Ingenio La Unión.

ÁREA DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

TECNOLOGÍA DE LA INFORMACIÓN
Y LA COMUNICACIÓN

Revista de la Escuela de Estudios de Postgrado, Vol. 10 No. 1, año 2019.
ISSN 2518-4725.

PROTOTIPO DE UNA ARQUITECTURA MULTISERVIDOR BASADA EN EL MODELO UTILIZADO EN LOS JUEGOS EN LÍNEA TIPO MMO (MASSIVELY MULTIPLAYER ONLINE)

Prototype of a multiserver architecture based on the model used in online games like MMO (Massively Multiplayer Online)

Marco Antonio Ramírez Molina
Mtro. de Tecnologías de la Información y la Comunicación
Correspondencia al autor:
ramirezmolina.marco@gmail.com

Recibido: 01 de agosto 2019 | Revisado: 21 de agosto 2019 | Aprobado: 28 de septiembre 2019

Asesorado por: Mtro. Tecnologías de la Información y la Comunicación **Héctor Alberto Heber Mendía Arriola**
hector.mendia@gmail.com

Resumen

El uso de la tecnología como medio de aprendizaje se incrementa en la actualidad de manera rápida y variada a tal punto que el uso de dispositivos móviles es una tendencia marcada en los años recientes, lo cual puede representar una nueva modalidad en el proceso de enseñanza y aprendizaje. En este estudio se detalla un prototipo de arquitectura, que usa como base el modelo de los juegos masivos multijugador en línea MMO, toma en cuenta parte de sus componentes para lograr que funcione y sobre esta arquitectura, se implementa una plataforma educativa para otorgar servicios a miles de usuarios concurrentes.

La investigación es de alcance descriptivo, y pretende demostrar la experiencia del usuario a través de las subvariables cantidad en milisegundos para la carga de la aplicación, usuarios concurrentes y número de partidas efectuadas. Cómo resultado de lo anterior, se identifica que la arquitectura evaluada responde de manera adecuada, en tiempo de respuesta y la cobertura en cantidad de usuarios, concluyendo así que la arquitectura ofrece eficiencia, disponibilidad y escalabilidad.

Palabras clave

Arquitectura, cluster, multiservidor, balanceo de carga.

Abstract

The use of technology as a means of learning is currently increasing in a fast and varied manner, such as the use of mobile devices a trend that has been marked in recent years, which may represent a new modality in the Teaching and learning process.

In this work a prototype of architecture is detailed, that uses as a base the model of massive multiplayer games in line MMO, takes into account part of its components to achieve and on this architecture, an educational platform is implemented to grant services to thousands of concurrent users.

The investigation of descriptive scope and pretends to demonstrate the user experience through the subvariables amount in milliseconds for the loading of the application, concurrent users and number of games made. As a result of the above, it is identified that the evaluated architecture responds adequately, in response time and coverage in number of users, concluding that the architecture offers efficiency, availability and scalability

Keywords

Architecture, Cluster, Multiserver, Load Balancing.

ISSN 2518-4725.

Introducción

Este estudio muestra un prototipo de arquitectura que ha tomado el modelo de los juegos en línea, Massive Multiplayer Online, un estudio de la arquitectura tradicional, cliente – servidor y la comparación de las capacidades con una arquitectura basada en más de un servidor, que tiene como principal componente el uso de tecnología de balanceo de carga, ya que según Ayala y De la Vega (2010) 6.7 millones de estudiantes han tomado cursos en línea.

Desarrollo del estudio

El prototipo de arquitectura tiene como base la estructura utilizada en los juegos en línea masivos multijugador y toma en cuenta lo mínimo de este modelo.

Se combina software de tipo propietario y de código abierto, de los primeros se cuenta con sistema operativo Windows Server Standard 2012 R2, para gestión de bases de datos, SQL Server Standard 2008 R2, así como los servicios de Internet Information Services, 8.5 y para el balanceo de carga, el servicio NLB (Network Load Balancing). Para el caso del software abierto, la plataforma educativa es Moodle 3.2.2 y PHP 5.6.30 y aplicaciones de acceso libre de ANAYA.

La integración conlleva las configuraciones necesarias para lograr que se trabaje de manera adecuada y destaca el acondicionamiento de los archivos php.ini y config.ini ficheros que gobiernan la funcionalidad del servicio PHP y de la plataforma Moodle, respectivamente.

Se definen parámetros base de comparación, que consisten en escenarios de 50, 100, 150 y 250 usuarios concurrentes que deben ingresar a la plataforma en un tiempo no mayor a los 5,000 milisegundos.

Resultados obtenidos

La propuesta se basa en la ejecución de un clúster de servidores gestionados por un servicio de balanceo de carga, para determinar la carga de red en un modelo distribuido en cuatro capas, los elementos son los siguientes: la primera, dispositivos móviles o de escritorio, que acceden vía web a los servicios, la segunda el servicio de balanceo de carga, que distribuye las peticiones en los nodos integrantes de la arquitectura.

Una tercera capa que aloja los servicios de la plataforma educativa a través de dos servidores web que a su vez son el *front end* de la solución y una cuarta que es el servidor de base de datos.

En la figura 1 se observa cómo se distribuye la arquitectura tomando en cuenta cada una de las capas mencionadas.

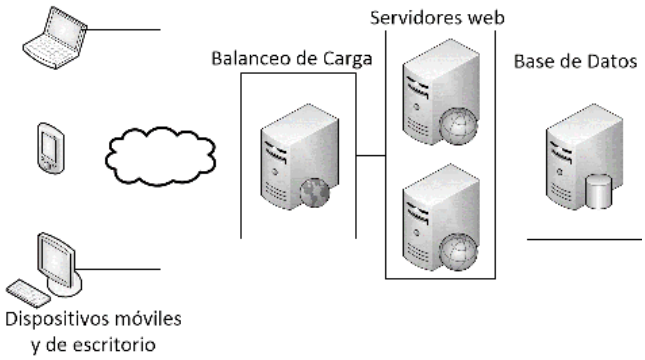


Figura 1.

Diagrama de la arquitectura multiservidor.

La evaluación compara dos arquitecturas: cliente / servidor y cliente / multiservidor, en ambos casos, cuatro grupos de usuarios concurrentes, definidos previamente, para determinar capacidades en el tiempo de respuesta y rendimiento de las arquitecturas evaluadas, el tiempo máximo esperado es de 5,000 milisegundos.

Tabla 1

Resumen de la actividad en cliente – servidor

Usuarios	50	100	150	250
Media (ms)	1,239	1,371	1,736	10,262
CPU (%)	24	41	59	76
RAM (%)	45	49	55	64
Bits	296,914	559,064	812,312	1,056,744

Fuente: elaboración propia.

Para el caso del ambiente cliente / servidor, los resultados se pueden observar en la tabla 1, destaca cómo el tiempo de respuesta, en el escenario de mayor cantidad de usuarios concurrentes, excede en más del 50 % el parámetro definido. En el modelo multiservidor, se obtienen los resultados que se ven en la tabla 2 los cuales corresponden a la actividad de los nodos integrados en la arquitectura, donde W1 y W2 corresponden a los servidores que integran la arquitectura.

En ambos casos, se observa que, en el escenario de 250 usuarios, el resultado está debajo del parámetro definido de 5,000 milisegundos.

Tabla 2
Resumen de la actividad en cliente – multiservidor

Servidor	Media (ms)	CPU	RAM	Bits	Usuarios
W1	1,516	13%	23%	138,424	20
W2	974	11%	24%	191,432	30
W1	1,642	24%	21%	246,112	40
W2	1,103	21%	21%	351,584	60
W1	1,774	41%	24%	402,776	70
W2	1,135	28%	25%	462,648	80
W1	2,835	60%	28%	602,144	110
W2	1,546	48%	31%	771,736	140

Fuente: elaboración propia.

.

Discusión de resultados

La arquitectura cliente / servidor muestra limitaciones en el último de los escenarios de experimentación, esto supone que la arquitectura se ve comprometida y debido al alto consumo de procesador y memoria, existe la posibilidad para que se generen errores que hagan inestable al equipo y de pauta a que los usuarios deban esperar un tiempo mayor al promedio deseado o se generen pérdidas de peticiones. En cuanto a los resultados del prototipo implementado, se observa una mejora en cada uno de los indicadores evaluados.

A partir de estos resultados se distingue cómo el problema de escalabilidad y eficiencia se hace evidente en una arquitectura de un solo servidor, pues como lo indica Vidal Rojas (s.f.) este modelo llega a representar, en ciertos niveles, un cuello de botella para los usuarios. Se suma el aspecto de latencia que se genera por la transmisión masiva de datos en un solo canal, lo que se puede observar en el comportamiento del adaptador de red, véase tabla 1.

Por su parte, los resultados para el modelo cliente / multiservidor, son favorables al objetivo de contar con una arquitectura que otorgue rendimiento y escalabilidad, la disminución de latencias y el mejor rendimiento de los procesadores, lo que permite que la experiencia del usuario, sea positiva debido a la función de compartir las peticiones de trabajo y tráfico que ofrece el sistema de balanceo de carga (Diaz, Ruiz y Sinisterra. 2012).

Se puede establecer cómo las interacciones de los usuarios con la plataforma implementada, tienen ventajas sobre la arquitectura tradicional, lo cual evidencia una mejora en la experiencia del usuario toda vez que se puede generar una percepción positiva del uso del sistema propuesto (Cordoba-Cely, 2013) debido a la selección de los elementos, estrategia de implementación y alcance de los requerimientos funcionales, dos de cinco áreas básicas para lograr un efecto positivo en los usuarios que propone Garret (2011).

Conclusiones

1. Se determinan diferencias de rendimiento. Los tiempos de respuesta en el cliente ascienden a 2,835 milisegundos lo cual implica una reducción de 7,427 milisegundos comparado con el modelo tradicional.
2. El esquema propuesto representa la posibilidad de dar cobertura al menos a 26,214 usuarios y si se toma en cuenta las mayores capacidades de los equipos, el número se estima en 419,430;

se identifica una reducción de los costos, en por lo menos un 29 %.

3. Es favorable el uso de Internet Information Server 8.5, PHP 5.6.30, Moodle 3.2.2 y cursos interactivos de naturaleza libre, de Anaya. Todo lo anterior sobre Windows server 2012 Estándar R2 y SQL server 2008 R2
4. Se implementa un sistema de balanceo de carga con la funcionalidad NLB, lo cual permite demostrar el procesamiento horizontal requerido dentro de la arquitectura propuesta; el sistema de balanceo tiene una capacidad máxima de controlar 32 nodos.
5. Se determina la capacidad de la arquitectura prototipo, con datos para cada uno de los parámetros definidos como indicadores de la variable experiencia del usuario con apoyo de las herramientas Webserver strees tool y monitor de rendimiento.

Recomendaciones

1. Indagar sobre aplicaciones que sean capaces de sincronizar altos volúmenes de datos que sean generados por las transacciones realizadas dentro del clúster.
2. Ampliar la investigación en aspectos de seguridad perimetral, sobre todo para determinar que esto no afecta los tiempos de respuesta en las peticiones de los clientes.
3. Es conveniente la investigación acerca de software de plataformas educativas que permitan una interacción del usuario con funcionalidades más avanzadas en relación con juegos por roles.
4. Investigar la implementación de algoritmos que permitan comprobar el avance y logros obtenidos por los estudiantes y cómo resultado de esto, la aplicación educativa, ofrezca reconocimientos virtuales a los educandos.

Referencias

Aguilar, I. y Ayala, J. (2014). Las propiedades técnicas deseables en las plataformas educativas y herramientas de autor como productoras de contenido estandarizado. Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo. Universidad Autónoma De Estado De México.

Córdoba-Cely, C. (2013). La Experiencia del usuario: de la utilidad al afecto. Revista Iconofacto Vol. 9, No. 12 pp. 56 – 70 Medellin, Colombia.

Díaz, T.; Ruiz, E.; Sinisterra, M. (2012). Clúster de balanceo de carga y alta disponibilidad para servicios web y mail. Informador Técnico (Colombia) Edición 76, Enero - Diciembre 2012, p. 93 – 102.

Garret, J. (2011). The elements of user experience. Berkeley, CA: New Riders. p 24.

Vidal, J. (s.f.). Nuevo modelo de objetos acoplados para interfaces multiusuario. Universidad de Chile.

Información del autor

Licenciado en Administración de Empresas, graduado en la Facultad de Ciencias Económicas de la Universidad San Carlos de Guatemala, 2009.

Maestría en Tecnologías de Información y la Comunicación de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2017.

Revista de la Escuela de Estudios de Postgrado, Vol. 10 No. 1, año 2019.
ISSN 2518-4725.

Instrucciones para Autores

La Revista de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería publica trabajos de investigación de los diferentes campos de la ingeniería y áreas afines. Los artículos enviados para su publicación deberán cumplir con los lineamientos establecidos. Al ser aceptados por el Consejo Editorial, son sometidos a un proceso de revisión y arbitraje por pares externos. Lo que ofrece al lector y autores un alto nivel académico.

Resumen

Extensión máxima de 150 palabras, se sugiere utilizar para ello el contador de palabras disponible en Word. Describir el problema que originó la investigación, la solución ensayada, método de trabajo. Describir los principales resultados obtenidos, así como sus impactos a nivel técnico, económico, social, ambiental u otros.

Abstract

Traducir al idioma inglés, el resumen redactado en la columna de la izquierda de la página.

La traducción debe ser revisada con un profesional con amplios conocimientos del idioma inglés, en caso que el autor no los posea.

Evitar la utilización del traductor de google u otra similar.

Palabras clave

Cinco palabras que servirán para identificar el estudio realizado.

Keywords

Traducción al idioma inglés de las palabras clave.

Introducción

Brindar un panorama general del tema estudiado, su importancia, aspectos relevantes para comprender el contexto en el cual se desarrolló el estudio, bases teóricas o perspectivas adoptadas y otros referentes que sustenten la investigación.

Debe contener un máximo de 150 palabras.

Desarrollo del estudio

Describir la forma en la que se realizó el estudio, por lo que se describe el método y los materiales. Esta sección es muy importante para que el lector se entere de las técnicas de investigación aplicadas y las actividades que se realizaron. Por ejemplo: el tipo de estudio, su alcance y diseño, variables estudiadas y forma de evaluarlas.

Además, describir si se realizaron visitas de campo, encuestas, mediciones, ensayos de laboratorio, análisis de bases de datos u otros.

Es mejor escribir en párrafos cortos.

Agregar citas bibliográficas acorde a normas APA.

Resultados obtenidos

Esta es una sección muy importante, donde deben incluirse los resultados derivados del estudio.

Los subtítulos deben diferenciarse del encabezado de la sección.

En el caso de inclusión de figuras, deben ser nítidas, legibles en blanco y negro. Se denomina figuras a gráficas, esquemas, fotografías u otros elementos gráficos.

Todas las figuras deben ir enumeradas, nombradas y referenciadas, según el formato de normas APA.

En el caso de inclusión de tablas, éstas deben incluirse de acuerdo a normas APA.

Es conveniente describir brevemente el contenido de una tabla, evitando los aspectos obvios.

En el caso de inclusión de fórmulas, éstas deben

ISSN 2518-4725.

elaborarse utilizando el editor de ecuaciones disponible en Word, indicando el significado de cada una de las variables o parámetros que se incluyen. Deben enumerarme entre paréntesis para poder hacer referencia de las mismas.

Discusión de resultados

Esta sección debe contener el análisis e interpretación de los resultados presentados, en cuanto a parámetros técnicos, valores de referencia, avances en la solución del problema que se buscaba resolver.

También debe orientarse la discusión a mostrar evidencia de los conocimientos generados, aportes, logro de los objetivos y si da el caso, posible relación con hipótesis formuladas o líneas de investigación posterior.

Conclusiones

Deben derivar de los resultados presentados en el artículo, mostrando clara evidencia del logro de los objetivos propuestos para el estudio. Deben ser claras y precisas. Enumerarlas sin dejar espacio entre ellas.

Recomendaciones

Indicar a quién o a quiénes van dirigidas, deben derivar del estudio realizado.

Referencias bibliográficas

Citar con Normas APA y orden alfabético.

Mínimo 5 referencias y máximo 7.

Información del autor

Grado académico a nivel de licenciatura, nombre completo, Facultad de la que egresó, Universidad dónde estudió, año en que se graduó.

Grado académico de Maestría y Doctorado (si lo posee).

Lugar donde trabaja.

Aspectos de estilo

Título centrado a 16 pts en Arial con negrilla, con un máximo de 35 caractéres.

Traducción del título al idioma inglés, times new roman a 10 pts en cursiva, centrado

Nombre completo de los autores..

Correo electrónico de los autores.

Márgen superior: 2.7 cm

Márgen inferior: 2.5 cm

Márgen izquierdo: 1 cm

Márgen derecho: 2 cm

Extensión máxima de 4 páginas para tesis o trabajos de graduación de maestría, 6 páginas para otros estudios y 8-10 para tesis de doctorado.

Redactar en tiempo verbal presente.

(+502) 2418 -9142

(+502) 5876-6989

Edificio S-11, Primer Nivel,
Ciudad Universitaria zona 12, Guatemala.

https://postgrado.ingenieria.usac.edu.gt/

informacion_eep@ing.usac.edu.gt

/fiusaceep

@eep_fiusac

ISSN 2518-4725.