

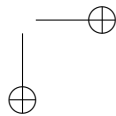
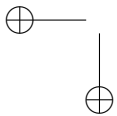
UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

REVISTA Ingeniería

Volumen 22 • Número 3 • ISSN 0121-750X • E-ISSN 23448393

REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL

2018



REVISTA Ingeniería

Volumen 23 · Número 3 · Año 2018 · ISSN 0121-750X · E-ISSN 2344-8393

REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Carrera 7 No. 40-53
Edificio Administrativo
Piso 7 - Facultad de Ingeniería
Bogotá, Colombia
Teléfono: + 57 (1) 323 93 00 ext. 2413
Correo revista:
revista_ing@udistrital.edu.co

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving>

POSTURA EDITORIAL Y AUDIENCIA

La Revista INGENIERÍA es una publicación de carácter científico enfocada en la gran área de conocimiento de Ingeniería y Tecnología, de acuerdo a la clasificación de la OCDE, con una periodicidad cuatrimestral editada por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La Revista está dirigida a la comunidad académica, investigadores, egresados, sectores productivos y en general al público interesado en los temas del campo de la Ingeniería y la Tecnología. Su principal objetivo es difundir y debatir avances en investigación y desarrollo en las diferentes áreas de la Ingeniería y la Tecnología a través de la publicación de artículos originales e inéditos, con pertinencia local o internacional.

EDITOR

Nelson L. Díaz, PhD.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

COMITÉ EDITORIAL

Sarah Greenfield, PhD.
Faculty of Technology of
Monfort University,
Reino Unido

Alonso Salvador Sanchez, PhD.
Universidad de Alcalá,
España

Jose Marcio Luna, PhD.
Perelman School of Medicine,
University of Pennsylvania, Estados Unidos

José Luis Villa, PhD.
Universidad Tecnológica de
Bolívar, Colombia

César Leonardo Trujillo Rodríguez, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Josep M. Guerrero, PhD.
Aalborg University, Dinamarca

Carlos Andrés Peña, PhD.
Institute for Information and Commu-
nication Technologies - Haute Ecole
d'Ingénierie et de Gestion du Canton
de Vaud, Suiza

Iván Santelices Malfanti, PhD.
Universidad del Bío-Bío,
Chile

Carlos Eduardo Moreno, PhD.
Universidad Nacional de
Colombia

Víctor Hugo Grisales, PhD.
Universidad Nacional de
Colombia

Juan Carlos Figueroa, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

COMITÉ CIENTÍFICO

Germán Jairo Hernández, PhD.
Universidad Nacional
de Colombia

Paulo Gaona García, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Gustavo Puerto Leguizamón, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Elvis Eduardo Gaona García, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Germán Méndez Giraldo, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Francisco Santamaría Piedrahita, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Diego Rodríguez Patarroyo, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

DIRECTIVAS

Ricardo García Duarte
Rector

Nelson Libardo Forero Chacón, PhD.
Director Centro de Investigación
y Desarrollo Científico

Carlos E. Montenegro Marín, PhD.
Decano de la Facultad de Ingeniería

PREPARACIÓN EDITORIAL

Carolina Suárez R., MSc.
Gestora Editorial

Jenny Alexandra Jiménez, MSc.
Corrección de Estilo

Julian Arcila-Forero, MSc.
Diagramación $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$

Imagen Editorial
Impresión

ÁRBITROS EN ESTA EDICIÓN

Carolina Suarez R., MSc.
Universidad Cooperativa de Colombia

Milton Herrera Ramírez, PhD.
Universidad Piloto de Colombia

Edgar Duarte Forero, PhD(c).
Universidad Libre de Colombia

Leila Ramirez Castañeda, PhD(c).
Universidad Libre de Colombia

Luis Díaz Aldana, PhD.
Idaho National Laboratory · Estados Unidos

Jaime Arturo Calvache, MSc.
Fundación Universidad de América, Colombia

Diego Salazar Blandón, MSc.
Universidad de Antioquia, Colombia

Juan Carlos Figueroa, PhD.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Rafael Bello, PhD.
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba

Amilkar Puris Cáceres, PhD.
Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador.

PERMISO DE REPRODUCCIÓN

Open access



Los artículos incluidos en esta edición se encuentran bajo la licencia "Atribución - No Comercial - Compartir igual": esta licencia permite a otros distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir de tu obra de modo no comercial, siempre y cuando te den crédito y licencien sus nuevas creaciones bajo las mismas condiciones.

Atribución - No Comercial - Compartir igual.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/co/>

Ni la Revista INGENIERÍA, Editor, Comité Editorial, Comité Científico, Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital F.J.C., otorgan ninguna garantía, expresa o implícita, a asumen responsabilidad alguna por la exactitud, completitud o utilidad de cualquier información, aparato, producto o proceso divulgado, o que represente que su uso no infrinja derechos privados. La mención o referencia a algún producto, proceso o servicio comercial en específico, por su marca comercial, marca registrada, fabricante o cualquier otra denominación, no implica ni constituye su endoso, recomendación endoso, recomendación o favorecimiento por parte de la Revista INGENIERÍA. Los juicios y opiniones expresadas por los autores en este medio son de su responsabilidad y no establecen, reflejan o comprometen los de la Revista INGENIERÍA.

COSTO DE PROCESAMIENTO DE ARTÍCULOS

La Revista INGENIERÍA no realiza ningún cobro por las postulaciones, evaluación y publicación de los artículos sometidos. La Universidad Distrital Francisco José de Caldas asume los gastos relacionados con el proceso de edición, gestión y publicación. Los Pares Evaluadores realizan su contribución de manera voluntaria y sin retribución económica.

CARÁTULA

INDIZADA EN



La portada está inspirada en un grafo donde los nodos representan las temáticas de los artículos de la presente edición, y las aristas muestran las relaciones que existen entre los diferentes sistemas que son estudiados desde el área de la Ingeniería. Asimismo, el nodo del centro refleja como los seres humanos unen esfuerzos en pro del desarrollo y bienestar de la sociedad, en la que aplican técnicas de optimización que permitan mejorar la toma de decisiones de los recursos, que cada vez son más limitados.

Idea creativa y Diseño Gráfico:

Carolina Suárez R. y Liliانا Valencia Leal

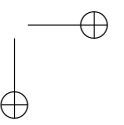
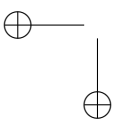
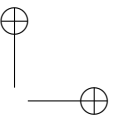
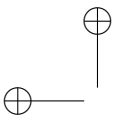


TABLE OF CONTENTS

Editorial

- Perspectives for Researching on Engineering in the UD** 213
Mejores Perspectivas en Investigación para la Ingeniería UD
Nelson Libardo Diaz A.

Industrial Engineering

- A Management Model for a Prepaid Medicine Company Using Dynamics of Systems** 215
Un Modelo de Gestión Para una Empresa de Medicina Prepagada Utilizando Dinámica de Sistemas
Hernán Samaniego Guevara
- Evaluation and Selection of Providers Procedure Based on the Hierarchical Analysis Process and a Mixed Integer/Linear Programming** 230
Procedimiento de Evaluación y Selección de Proveedores Basado en el Proceso de Análisis Jerárquico y en un Modelo de Programación Lineal Entera Mixta
Luis Alfonso Peña Florez · Yuber Liliana Rodríguez-Rojas

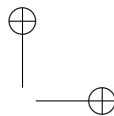
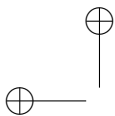
Environmental Engineering

- Cadmium, Copper and Lead Adsorption on Natural and Modified Bentonite, Kaolin and Zeolite: A Review of Process Parameters, Isotherms and Kinetics** 252
Adsorción de Cadmio, Cobre y Plomo en Bentonita, Caolín y Zeolita Naturales y Modificadas: Una Revisión de los Parámetros de Operación, Isotermas y Cinética
Dalia Carbonel Ramos

Computational Intelligence

- A Meta-Optimization Approach to Solve the Set Covering Problem** 274
Un enfoque de Meta-Optimización para Resolver el Problema de Cobertura de Conjunto
Broderick Crawford · Ricardo Soto · Eric Monfroy · Gino Astorga · José García · Enrique Cortes

- Instructions for Authors** 289



Mejores Perspectivas en Investigación para la Ingeniería UD

REVISTA Ingeniería

Recientemente se ha dado a conocer la aprobación por parte del Consejo Superior de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, del Instituto de Investigaciones en Ingeniería [1]. Celebramos desde la *Revista Ingeniería* esta iniciativa que surge de la misma base de investigadores de la Facultad de Ingeniería, buscando fortalecer los diferentes procesos que involucran la dinámica de investigación, tales como la formación de potenciales investigadores, la transferencia al sector productivo y principalmente la pertinencia en el contexto y entorno social, cultural y tecnológico.

El instituto estará soportado por grupos de investigación en Ingeniería de la Universidad, los cuales cuentan con una base de capital humano técnicamente bien capacitado y con experiencia en procesos investigativos; los cuales han demostrado que se puede desarrollar investigación de alto impacto a pesar de las limitaciones de recursos y la dificultad que imponen los procesos administrativos de la Universidad. Prueba de ellos es que de los 29 grupos reconocidos ante Colciencias, diez de ellos cuentan con las máximas clasificaciones A y A1.

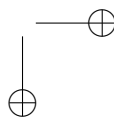
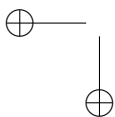
Una de las principales fortalezas del Instituto es la posibilidad de facilitar el proceso de vinculación de sectores empresariales y demás sectores interesados en apoyar el desarrollo de proyectos de investigación de una forma directa. Pero, es aún más atractiva la posibilidad de contar con un instituto que sea efectivo en promover el desarrollo investigativo de la Facultad y de la Universidad, ante la poca capacidad operativa del Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico (CIDC).

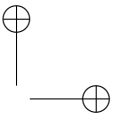
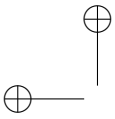
Esta afirmación se sustenta en que en lo corrido del año 2018 el CIDC no ha generado ni una sola convocatoria de apoyo a proyectos de investigaciones; además, en el año 2017 de las dos convocatorias planeadas solamente se lanzó una afectando los planes de los diferentes grupos de investigación. Podríamos suponer, que el hecho de que a la fecha no se conozca el informe de gestión por parte del CIDC del año 2017 será la principal evidencia de su falta de gestión [2]. También brillan por su ausencia los eventos institucionales de socialización de resultados de investigación. La participación en estos eventos hace parte de los compromisos adquiridos por los diferentes proyectos de investigación beneficiados de la última convocatoria (#01- 2017).

Open access



Citación: N. Díaz, "Mejores Perspectivas en Investigación para la Ingeniería UD.", *Ingeniería*, vol. 23, no. 3, pp. 213-214, Sep-Dic 2018.
© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.13881>





No solo la investigación se ha visto afectada por la inoperancia del CIDC bajo su dirección actual, también la continuidad del proceso editorial de las revistas científicas de la Universidad se ha visto comprometida por la falta de planeación de CIDC en garantizar la continuidad del equipo profesional necesario.

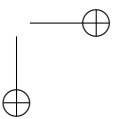
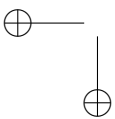
En este contexto, es más que esperanzador el rol que puede entrar a jugar el naciente Instituto de Investigaciones en Ingeniería, dando enfoque diferente y directrices claras que permitan fortalecer los procesos de investigación en la Facultad de Ingeniería. El éxito del Instituto significará un cambio de paradigma en la gestión de la investigación, que esperamos sirva como referente para futuros institutos de Investigación desarrollo en otras áreas. Solo en el momento en el que el Instituto entre en operación sabremos si efectivamente responderá a las necesidades de la comunidad de investigadores de la Universidad, pero de antemano le deseamos los mejores éxitos.

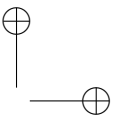
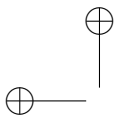
Nelson Leonardo Diaz A., PhD.

Editor Revista *INGENIERÍA*

Referencias

- [1] Instituto de Investigación en Ingeniería, S.f. [En línea]. Disponible en: <https://www.udistrital.edu.co/instituto-investigacion-en-ingenieria> ↑213
- [2] Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico, S.f. [En línea]. Disponible en: <http://cidc.udistrital.edu.co/web/index.php/documentacion/informes-de-gestion> ↑213





Case-study

REVISTA
Ingeniería

A Management Model for a Prepaid Medicine Company Using Dynamics of Systems

Un Modelo de Gestión Para una Empresa de Medicina Prepagada Utilizando Dinámica de Sistemas

Hernán Samaniego Guevara¹

¹Universidad Politécnica Salesiana Ecuador. Facultad de Administración de Empresas. Quito-Ecuador
Correspondence: hsamaniego@ups.edu.ec

Recibido: 20/04/2018. Modificado: 13/07/2018. Aceptado: 05/08/2018.

Abstract

Context: From the Business Management model to potentiate the growth of small and medium-sized enterprises carried out by the author of this article; it was possible to apply the same in function of the specific affiliation, needs of the company object of study, determining for that the specific variables for his turn of business and conserving other variables of general.

Method: The methodology used was the interview technique with the top management of the company, gathering the relevant, reliable and correct information; it was considered that when studying a certain system, it is convenient to analyze its behavior based on representative data of what is expected to be its normal functioning and not with data corresponding to extreme situations. These interviews made it possible to determine the variables necessary for the model made.

Results: Designed the model, it was possible to simulate results depending on the specific requirements of the company, visualizing the impact that these results would have the company under study.

Conclusions: The conjunction of the methodology of systems dynamics, the interviews, the collection of historical data, as well as the involvement of the laws that govern these businesses in Ecuador, made it possible to obtain an applicable and reliable product for the organization

Keywords: Administrative management model, interviews, simulations, validation .

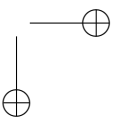
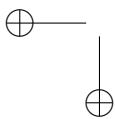
Acknowledgements: To the company that made the study possible.

Language: Spanish

Open access



Cite this paper as: H. Samaniego , "A Management Model for a Prepaid Medicine Company using Dynamics of Systems", Ingeniería, Vol. 23, Num. 3, pp. 215-229, Septiembre– Diciembre 2018.
© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.13194>



Resumen

Contexto: El modelo de gestión empresarial para potencializar el crecimiento de la pequeña y mediana empresa, realizado por el autor de este artículo, sirvió de base para aplicarlo en función de las necesidades específicas de la empresa objeto de estudio (medicina prepagada), determinando para ello las variables específicas para su giro de negocio y conservando otras variables de aplicabilidad general.

Método: Se utilizó la técnica de entrevistas con la alta dirección de la empresa, lo que permitió recopilar la información relevante, confiable y correcta. Se consideró que al estudiar un determinado sistema conviene analizar su comportamiento a partir de datos representativos de lo que se espera que sea su funcionamiento habitual y no con datos correspondientes a situaciones extremas. Las entrevistas permitieron determinar las variables necesarias para el modelo realizado.

Resultados: Una vez que se diseñó el modelo fue posible simular resultados en función de los requerimientos puntuales de la empresa, lo que permitió visualizar el impacto que dichos resultados tendrían en la empresa objeto de estudio.

Conclusiones: La conjunción de la metodología de la dinámica de sistemas, las entrevistas, la recopilación de datos históricos, así como también el involucramiento de las leyes que rigen estos negocios en el Ecuador, permitieron la obtención de un producto aplicable y confiable para la organización.

Palabras clave: Entrevistas, modelo de gestión administrativo, simulaciones, validación.

Agradecimientos: A la empresa que permitió efectuar el estudio.

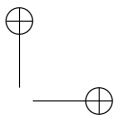
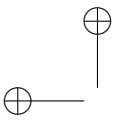
Idioma: Español

1. Introducción

El tema de la salud, en cualquier lugar que se lo considere, acarrea debates porque se busca que el servicio cubra a la mayor cantidad de personas que lo requieran. La asistencia en salud es prestada por hospitales, centros de salud y clínicas públicas o privadas. En el Ecuador, este sistema se conforma de manera similar y es controlado por el Ministerio de Salud Pública (MSP), el Ministerio de Inclusión Económica Social (MIES), los entes municipales, las instituciones de seguridad social como el Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social (IESS), el Instituto de Seguridad Social de las Fuerzas Armadas (ISSFA) e Instituto de Seguridad Social de la Policía Nacional (ISSPOL). Los organismos públicos ofrecen sus servicios a la población en general, mientras que los hospitales y clínicas privadas cuentan con programas y establecimientos de salud en los cuales el público debe pagar cierta cantidad de dinero para acceder a sus prestaciones. La población que tiene acceso a estos servicios alcanza un porcentaje cercano al 3 % y pertenece a diversos estratos sociales, principalmente a aquellos de ingresos económicos medios y altos [1].

Lo expuesto es positivo por su relación directa con el porcentaje de crecimiento del sector, el cual, en Latinoamérica, fue superior al 10 % del PIB (producto interno bruto) de la región en 2011 [2].

Sin embargo, las empresas de medicina prepagada aún poseen un porcentaje bajo en clientes, a pesar de haber intentado de diversas maneras captar una mayor cantidad de socios, así, por ejemplo, a través de contratos corporativos firmados con instituciones y organizaciones que permiten a sus empleados acceder a este tipo de atención médica a costos más bajos que los que tendrían si lo hicieran individualmente. En el presente estudio se aborda la problemática actual que enfrentan las empresas de medicina prepagada en el Ecuador, las mismas que a partir de la implementación de nuevas leyes vieron afectado directamente su giro de negocio.



Por lo tanto, el diseño y la puesta en marcha de un modelo utilizando la metodología de dinámica de sistemas, permite abordar los problemas sociales, económicos y otros que les afectan, realizando para ello modelos de gestión empresarial que pueden ser aplicados y visualizados con la ayuda de programas informáticos. En tal virtud, para la empresa objeto de estudio se ha diseñado un modelo que facilite realizar simulaciones, buscando estrategias enfocadas en el cumplimiento de la ley y en la obtención de mejores réditos económicos, lo cual posibilite que la organización pueda seguir prestando sus servicios en este importante nicho de mercado.

La metodología utilizada, con la obtención de un modelo basado en dinámica de sistemas, permite realizar diagramas causales que muestran la relación e interacción entre las variables que lo conforman, utilizando para ello un *software* que posibilita su diagramación. Para este caso puntual y específico se utilizó el sistema informático VENSIM, cuya característica principal faculta mostrar la interrelación de las variables en diagramas causales o en un diagrama de flujos, conocido también como diagrama de Forrester.

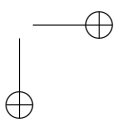
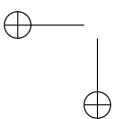
Posterior al desarrollo del modelo computacional, se validan y se ejecutan simulaciones, las cuales muestran los posibles resultados que la empresa objeto de estudio podría obtener al aplicar estrategias específicas en su campo de negocios.

2. Sistema de medicina prepagada en el Ecuador

Los primeros sistemas de medicina prepagada son conocidos desde hace 4000 años. Inicialmente las culturas que adoptaron estos sistemas fueron la Asiria y Babilonia, posteriormente, en Egipto, Roma y China se desarrollaron en mayor proporción los primeros conceptos y prestación de servicios de este tipo de cobertura médica. En el siglo XIX, las primeras organizaciones que ofrecían servicios de salud, a manera de seguros, operaban en Europa, por ejemplo la empresa *Reilwei Passengers Assurance Company of London*, la cual emitía beneficios (pólizas) por muertes accidentales o accidentes laborales; otra empresa que continuó con este tipo de servicios fue fundada en Alemania en el año 1883, cuando la cancillería de dicho país, a través de Otto Von Bismarck, impulsó la Ley del Seguro de Enfermedad. Así pues:

En América, específicamente, en los Estados Unidos, el negocio de salud comenzó a propagarse y comercializarse a partir de la promulgación de la ley denominada Social Security Act., de 1935; no sin antes especificar que en Norteamérica a principios del siglo XX, se desarrollaron los primeros planes de seguros de hospitalización e incapacidad. Para el año 1910 se crean los planes por tratamientos médicos y en 1916 los beneficios por cuidado de pacientes en clínicas y hospitales privados [3].

En el Ecuador, el sistema de medicina prepagada inicia en el año 1979 con la conformación de la empresa Ecuasanitas S.A., pionera de este tipo de servicios en América Latina. A partir de ese año, las empresas de medicina prepagada comenzaron sus labores en el país, centrandose en prestar servicios complementarios de salud, de acuerdo con la contratación que realicen las personas o empresas que brindan este beneficio a sus trabajadores o empleados. Inicialmente, estas empresas buscaban suplir las falencias que las instituciones públicas evidencian en la prestación de los servicios médicos; sin embargo, a partir del 2013, el Ecuador presentó una desaceleración



significativa en este tipo de negocios por diversas causas, como el control de las importaciones, lo que ocasiona enfrentar difíciles escenarios principalmente por la salida de divisas. La situación se complicó por la generación y entrada en vigor de la nueva ley aplicada a este tipo de empresas a partir del 2016. Estas y otras razones ocasionaron disminuciones significativas de los ingresos para las empresas de medicina prepagada, que, a su vez, llevaron a la disminución de su participación en el mercado de la salud [4].

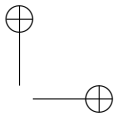
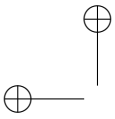
Sin embargo, a pesar de los inconvenientes presentados, estas empresas han podido establecer nichos de mercado en seguros y asistencia médica que, anualmente, representan un crecimiento del 27 %, el cual no ha sido completamente satisfactorio, por cuanto a partir del 2016 estas compañías disminuyeron sus ingresos en un porcentaje del 15 %; enfocándose en mayor proporción en las ramas de los seguros generales y de vida [5].

Como complemento a los datos especificados y, conforme a lo emitido por el Banco Central del Ecuador:

Los activos de las empresas de medicina prepagada en el año 2013 representaron el 1,8 % del PIB ecuatoriano, mientras que en el año 2012 correspondió al 1,9 %. Durante el mes de Noviembre de 2013, los seguros privados aumentaron 21,3 % en relación al año 2012. No obstante, al comparar este crecimiento con el periodo anterior 2011-2012 representó el 29,7 %, el cual es menor porque disminuyó en un 8,4 % [6].

Para el 2014 se generaron 44,37 millones de dólares con las actividades de sociedades de cartera, en otras palabras, unidades tenedoras de activos de un grupo de empresas filiales, logrando una participación del 12,88 %, en tanto que las pequeñas y medianas empresas (PYMES) presentaron 300,10 millones de dólares con una participación del 87,12 %. Para el 2015 las empresas de medicina prepagada registraron 7084 personas empleadas, reportando 4000 fuentes de trabajo por parte de las grandes empresas y 3084 fuentes de empleo, mientras que las PYMES representa el 56.47 % y el 43.53 % respectivamente en la cantidad de empleo generado dentro del sector. Finalmente, a partir del 2016, la Superintendencia de Compañías, Valores y Seguros del Ecuador, especificó que los afiliados a este tipo de empresas llegan alrededor de las 800 000 personas, con una cuota promedio de aporte entre 40 y 60 dólares, recibiendo a cambio atención médica en clínicas y hospitales de primera [3].

En conclusión, con los datos presentados por los diferentes organismos de control, se puede observar que los cambios a la nueva ley de medicina prepagada (2016), cuyo reglamento fue expedido en mayo del 2017, favorece a los clientes, pero no se realizó nada en función de la sobreregulación; por lo tanto, al existir demasiados controles para este tipo de empresas, los planes de medicina prepagada que ofertan resultan costosos, lo que aleja a los clientes, disminuyendo las contrataciones para este tipo de planes [7]. Finalmente, es importante describir que actualmente este sector de negocios está conformado por dieciocho empresas, pero solo cinco de estas ocupan más del 90 % del total del mercado [5].



3. Modelo de gestión basado en dinámica de sistemas

3.1. Antecedentes

Existen diversas metodologías para analizar las estrategias que las organizaciones basadas en simulación pueden adoptar, por ejemplo, la dinámica de las estrategias de Kim Warren, quien basa su principio en una metodología para llegar a la raíz del tema estratégico y consiste en un enfoque gráfico que permite desarrollar soluciones, aplicando simulaciones dinámicas de negocios denominadas micromundos, basados en principios subyacentes no tan complejos, pero potentes para encontrar soluciones. Los principios fundamentales de dicha metodología son: el desempeño depende de los recursos, los recursos se aumentan y drenan y los flujos dependen a su vez de los recursos existentes [8].

Carmine Bianchi, en cambio, explora el mundo de la dinámica de sistemas, en su trabajo titulado *Dinamyc Performance Management*, explica el diseño del rendimiento dinámico y su vinculación a la planificación estratégica, utilizando un enfoque de gestión que permite mejorar la capacidad de una organización para comprender y gestionar las fuerzas que impulsan el rendimiento a lo largo del tiempo, así como el establecimiento de metas y objetivos que permitan medir los resultados de forma adecuada y coordinarlos con las áreas de responsabilidad, clave en el proceso de planificación [9].

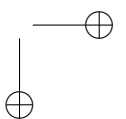
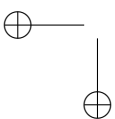
Por lo expuesto se puede señalar que:

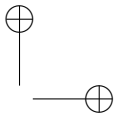
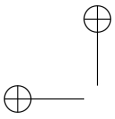
Un modelo de simulación es la representación conceptual, numérica o gráfica de un objeto, sistema, proceso, actividad o pensamiento; destaca las características que el modelador considera más importantes del fenómeno en cuestión, por lo que se lo emplea para analizar exhaustivamente cada una de sus relaciones e interacciones, y con base en su análisis, predecir posibles escenarios futuros para dicho fenómeno [10].

Lo anterior facilita abordar cuestiones teóricas, orientadas a ofrecer respuestas concretas, representando diversas alternativas que un modelo basado en dinámica de sistemas puede presentar.

Un modelo de simulación basado en esta metodología puede ser analizado y diseñado para cualquier tipo de empresas, así, por ejemplo, el estudio efectuado en relación con la “evaluación de políticas de protección en el sector papicultor mediante sistemas dinámicos”; en dicho estudio se evalúa el impacto de las políticas de protección al sector papicultor del municipio de Villapinzón, Cundinamarca, Colombia, a través de la elaboración de un análisis estructurado y utilizando el enfoque de sistemas dinámicos para contribuir mediante su estudio a la mejora de los resultados que los agricultores de la región pueden alcanzar [11].

Otro tipo de estudio que usa esta metodología es la investigación efectuada a la “evaluación de escenarios de descongestión vehicular en Bogotá-Colombia, utilizando la dinámica de sistemas”. Este trabajo desarrolla un modelo en el sistema informático Stella, mediante el cual se conjugan las diferentes variables que intervienen en el sistema de transporte de dicha ciudad, las mismas que son analizadas desde diversos escenarios, presentando al lector las alternativas encontradas al aplicar estas variables en dicho modelo [12]. Con lo expuesto hasta el momento se denota que es factible elaborar modelos de gestión utilizando dinámica de sistemas.





De la misma manera que se han realizado estudios para todo tipo de empresas, también se han ejecutado modelos para empresas similares al caso de estudio, por ejemplo, el análisis denominado “un modelo de gestión de la cartera para empresas de medicina prepagada”, en el cual ejecutan simulaciones utilizando el programa informático Excel y comprueban la eficacia del modelo conforme a la metodología de Markowitz [13].

Otro estudio, denominado “modelo de predicción de costos en servicios de salud”, que es soportado por simulación discreta, se realizó con la finalidad de evaluar diferentes escenarios de prestación de estos servicios. El modelo se aplicó para una empresa prestadora de servicios de salud típica, en la que “se estudia el costo de prestación de servicios por un año, a partir de indicadores estadísticos que afectan al campo de la salud, cuyos valores se ajustan al comportamiento especificado para este tipo de empresas” [14].

De igual forma, se puede señalar “el diseño de un modelo de simulación prospectiva del comportamiento de las variables relacionadas con la demanda de servicios de salud para el tratamiento de enfermedades de alto costo”, modelo que se realizó para predecir la demanda de este tipo de prestaciones, posibilitando que la planificación, el presupuesto y la organización se enfoquen en la eficiencia [15]. Por último, es importante señalar la investigación en la que se ejecuta un estudio actuarial a un plan de medicina prepagada para personas mayores de 50 años, “mediante el análisis del comportamiento de la población asegurada y siniestrada, con el objetivo de utilizar un modelo actuarial teórico de tarificación” [16].

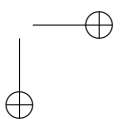
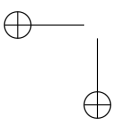
De acuerdo con los estudios referidos, la empresa de medicina prepagada objeto de estudio busca diseñar e implementar un modelo de negocios basado en dinámica de sistemas, que le permita mejorar su gestión empresarial con la consecuente obtención de resultados operativos favorables y, a la vez, comprender y entender la relación de sus variables, así como las interacciones que estas presentan en el mercado en el cual compiten.

3.2. Metodología

El presente trabajo utiliza la metodología denominada caso de estudio, esta se aplica a una empresa de medicina prepagada, para lo cual se determinan las variables que dicho modelo necesita a partir de la realización de entrevistas no estructuradas al *staff* gerencial de la empresa, empleando como insumo el modelo diseñado y generado que se realizó para potencializar la pequeña y mediana empresa en Quito [17], adaptándolo de acuerdo con los requerimientos encontrados a partir de las entrevistas y necesidades de dicha organización.

Las entrevistas no estructuradas se realizaron a manera de conversatorio, caracterizándose por su flexibilidad, debido a que así, el entrevistador define la profundidad del contenido, buscando recopilar información que arroje factores determinantes que intervendrán en el modelo a diseñarse e implementarse.

El *staff* gerencial de la empresa estuvo conformado por quince personas, incluyendo a quienes ocupaban los cargos de presidencia y gerencia general, así como también a los gerentes departamentales. Al realizar dichas entrevistas se encontraron las variables que afectan a este tipo de

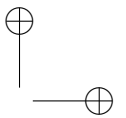
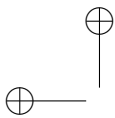


organización; posteriormente, las variables pasaron por un proceso de depuración, mediante un análisis de validación con la colaboración de siete expertos, quienes las calificaron en función de su claridad, pertinencia e importancia. Por último, conforme a la validación realizada por los expertos, y mediante un análisis de correlaciones efectuado en el sistema informático SPSS, se determinaron las variables específicas que forman parte del modelo de gestión que se presenta en la sección de resultados (Tabla I).

Tabla I. Variables que conforman el modelo de gestión.

No.	Variable	Función
1	Crecimiento o decrecimiento de la economía	Variable auxiliar
2	Nuevos clientes potenciales	Flujo
3	Impacto en publicidad	Variable auxiliar
4	Nuevos clientes individuales	Flujo
5	Clientes potenciales	Nivel
6	Nuevos clientes corporativos	Flujo
7	Clientes individuales	Nivel
8	Clientes individuales no vinculados	Variable auxiliar
9	Tasa de vinculación	Flujo
10	Vinculación	Flujo
11	Cuota de mercado	Variable auxiliar
12	Clientes Corporativos	Nivel
13	Baja de clientes corporativos	Flujo
14	Calidad de servicio	Variable auxiliar
15	Gasto en publicidad	Variable auxiliar
16	Numero de pólizas vigentes	Variable auxiliar
17	Precio promedio póliza	Variable auxiliar
18	Precio promedio de competidores	Variable auxiliar
19	Precio relativo	Variable auxiliar
20	Necesidades de personal	Variable auxiliar
21	Recursos disponibles	Variable auxiliar
22	Capacidad de atender a clientes	Variable auxiliar
23	Personal administrativo	Variable auxiliar
24	Personal de ventas	Variable auxiliar
25	Utilidades de la empresa	Variable auxiliar
26	Tasa de recisión de pólizas	Variable auxiliar
27	Pólizas no renovadas	Variable auxiliar
28	Ingresos no obtenidos por recisión de pólizas	Variable auxiliar
29	Costos totales	Variable auxiliar
30	Costo total de siniestros	Variable auxiliar
31	Número de siniestros	Variable auxiliar
32	Costo promedio de siniestros	Variable auxiliar
33	Ingresos	Variable auxiliar
34	Impacto de calidad en clientes corporativos	Variable auxiliar

Fuente: elaboración propia



El análisis de correlaciones, adicionalmente, tuvo la finalidad de especificar y definir las variables que actúan como niveles, flujos y auxiliares. Las variables se aplicaron, considerando como insumo el modelo diseñado y generado a partir del estudio efectuado para potencializar la pequeña y mediana empresa en Quito [18].

Además, el análisis de correlación estadística en el sistema informático SPSS, permitió asegurar que las variables encontradas se relacionan entre sí. Este análisis arrojó resultados que permiten determinar que las variables cumplen con los valores requeridos para ser consideradas como parte del modelo; así por ejemplo la relación existente entre la tasa de vinculación y los clientes potenciales (Relación de Pearson= 0,158 y un valor $p = 0,000 < 0,01$). Las variables cuota de mercado y clientes corporativos (Relación de Pearson= 0,137 y un valor $p = 0,013 < 0,05$), confirmando que estas variables están correlacionadas entre sí, lo que ratifica que las mismas fueron correctamente depuradas y seleccionadas para formar parte del modelo a ser aplicado en la empresa objeto de estudio.

Es importante especificar que la información inicial para la validación y ejecución de las simulaciones se obtuvo mediante la revisión de los estados financieros, balances contables, estadísticos de siniestralidad, así como también los datos históricos relacionados con el ingreso y salida de clientes. Por lo tanto, en el apartado de resultados, se pueden visualizar los diagramas causales generados, así como su formulación matemática. Por último, en la Figura 4 se presenta el diagrama de Forrester.

4. Resultados

El modelo diseñado se origina a partir de la configuración de diagramas causales, los cuales constituyen el origen del diagrama de flujos. Los bucles especifican las relaciones y retroalimentaciones existentes entre dichas variables. En la Figura 1 se aprecia el diagrama causal que afecta a la variable clientes, en el cual el crecimiento de la economía es positivo y la mayoría de variables se mantienen en este nivel; por otro lado, la variable de clientes individuales no vinculados y bajas de clientes corporativos son negativas, lo que permite lograr una estabilidad en el bucle generado.

El sistema representado en la Figura 1 busca el acumulación de clientes que se producirá conforme al crecimiento o decrecimiento de la economía, con lo cual la variable nuevos clientes que actúa como variable auxiliar es considerada como la razón de este sistema; en este sentido, la expresión utilizada para calcular la tasa de crecimiento de las conductas incluidas y del tiempo promedio en su crecimiento se encuentra en la ecuación (1):

$$A = \frac{Qf^{[\frac{1}{T-i}]}}{Qi} - 1 \quad (1)$$

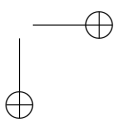
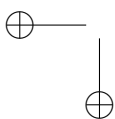
Dónde:

A = tasa de crecimiento o acumulación de clientes.

Qf = cantidad en el periodo final, f .

Qi = cantidad en el periodo inicial, i .

Con la ecuación (1) es posible identificar la tasa de crecimiento de cada una de las variables que



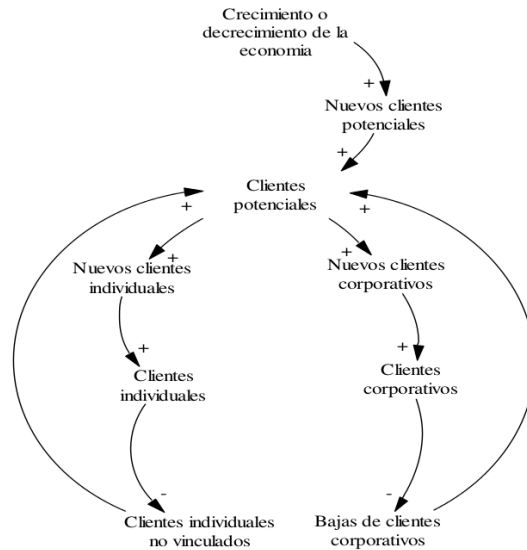


Figura 1. Diagrama causal clientes. Fuente: elaboración propia.

conforman el bucle o el sistema en los diferentes periodos, por cuanto la cantidad y calidad de información disponible en cada una de las variables es diferente.

En la Figura 2 se muestra el diagrama causal en referencia al número de pólizas, este bucle diagramado es estable, lo que permite introducir una hipótesis dinámica por cuanto el sistema representa una acumulación de acciones, posibilitando asumir que la relación entre el estado ingreso — la cual se denomina X para efectos de ecuación— y la acción utilidades —la cual se denomina Y para efectos de ecuación— viene dado por la ecuación (2).

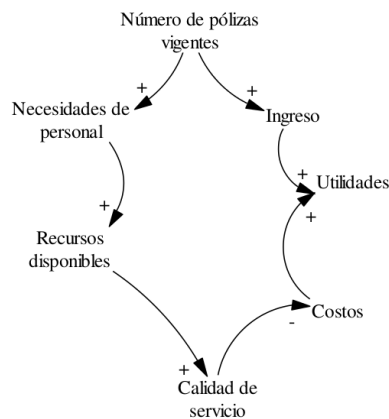


Figura 2. Diagrama causal número de pólizas. Fuente: elaboración propia

$$\frac{dx}{dt} = Y \tag{2}$$

Al considerar que el estado o bucle es un estado de acumulación, es factible escribir la ecuación (3).

$$X = \int_0^t Y dt \tag{3}$$

Los restantes elementos del bucle que son positivos vienen dados por la ecuación (4) y la ecuación (5).

$$Y = KZ \tag{4}$$

$$Z = Xd - X \tag{5}$$

Dónde:

Z = la variable de costos (discrepancia).

Xd = la variable o el objetivo deseado, en este caso la variable calidad de servicio.

De las dos últimas ecuaciones se obtiene la ecuación (6).

$$Y = K(Xd - X) \tag{6}$$

Sustituyendo la ecuación (6), en la ecuación (2), se obtendría la ecuación (7).

$$X(t) = Xd + [X(0) - Xd] \cdot e^{-kt} \tag{7}$$

Esta ecuación representa la evolución temporal de las variables del sistema o bucle de acuerdo con los requerimientos que el sistema desearía encontrar.

Por último, la Figura 3 representa el diagrama causal de utilidades, el mismo que se gobierna de igual manera con las ecuaciones anteriormente descritas, refleja que el bucle es estable, lo que posibilitará realizar trabajos de simulación posteriores de acuerdo con los requerimientos de la empresa.

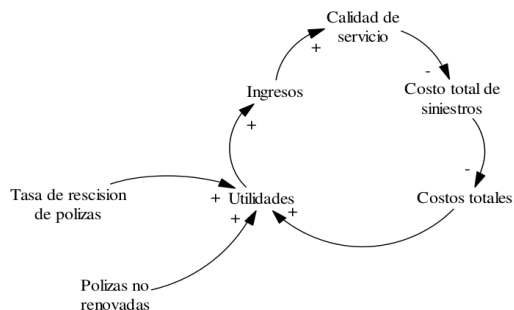


Figura 3. Diagrama causal utilidades. Fuente: elaboración propia.

Los diagramas causales presentados son insumos para la generación del diagrama de flujos y niveles que permiten ejecutar simulaciones, análisis de resultados y otros.

El modelo diseñado se visualiza en la Figura 4, el cual está conformado por dos secciones fácilmente identificables. En la primera parte o superior se aprecian las variables que conforman los niveles y flujos respectivos, así como también variables que corresponden a la calidad del servicio y al crecimiento o decrecimiento de la economía, el valor que adopte esta variable dependerá del momento económico que viva el Ecuador; puede hablarse de una segunda parte en la cual resaltan las variables que corresponden al giro de negocio de la empresa (pólizas), variables de siniestros, costos, utilidades, personal, precios, etc.

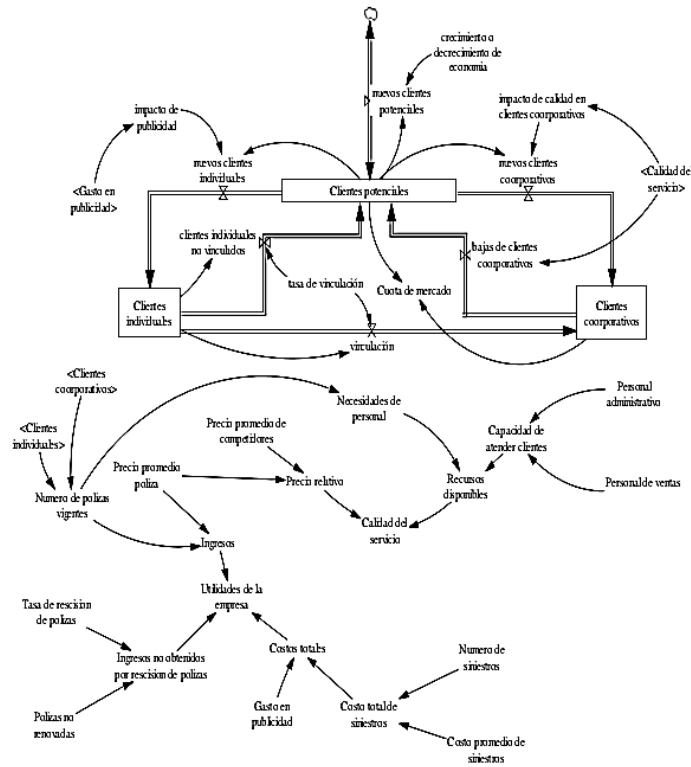


Figura 4. Diagrama de flujos y niveles Fuente: elaboración propia.

4.1. Validación del modelo

El diseño y la implementación de modelos de simulación se presenta, en la mayoría de los casos, como una actividad cognitiva, por cuanto facilita conocer sistemas del mundo prácticos, así como entender su sistema analítico, lo que conlleva al modelador a enfrentar inconvenientes episte-

mológicos y computacionales, pues, en muchos casos, los sistemas carecen de teorías científicas que los sustenten [19].

El modelo desarrollado corresponde a la recopilación de información y modelos mentales de los actores relevantes. En la dinámica de sistemas, de la misma manera que en cualquier campo, ningún modelo podrá reflejar en su totalidad los comportamientos reales. El modelo construido en el presente estudio fue sometido a una de las pruebas sugeridas por Sterman [20], la misma que especifica que el arte de construir modelos es la descripción causal, que indica cómo opera realmente el sistema en algunos aspectos y aseguran la efectividad de políticas alternativas o de las estrategias diseñadas para mejorar el comportamiento de dicho sistema; lo anterior permite entender la complejidad de este para poder generar políticas y escenarios que mejoren la toma de decisiones de los actores involucrados.

La Figura 5 muestra el comportamiento de la variable nuevos clientes potenciales durante un lapso de tiempo equivalente a veinticuatro meses, dicha variable fue analizada al considerar que la misma es la principal fuente para que la empresa logre captar nuevos clientes y no estancarse en su mercado. Se analiza el comportamiento de esta variable y se observa que su incremento o disminución es acorde al comportamiento que muestra en la realidad, lo cual refleja que el modelo es válido.

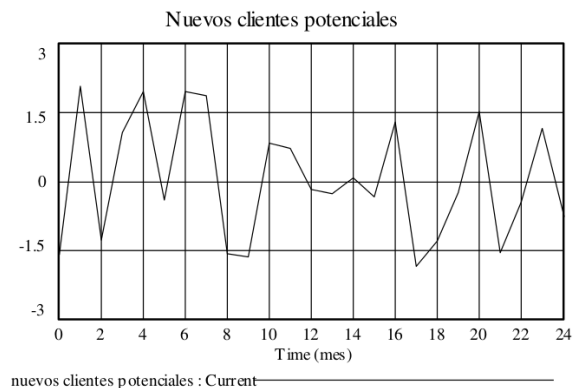


Figura 5. Validación, comportamiento variable nuevos clientes potenciales Fuente: elaboración propia.

4.2. Análisis y resultados

El modelo realizado de acuerdo con la dinámica de sistemas se simuló por un lapso de 120 meses, tiempo prudencial que la empresa consideró necesario, buscando minimizar los impactos por pérdidas de clientes e incremento en costos; por lo tanto, en la simulación de la Figura 6 se puede observar cómo al inicio de la implementación de las estrategias, las variables utilidades e ingresos inician una etapa de recuperación en detrimento de la calidad del servicio, la cual disminuye, no en una proporción considerable, pero sí en un valor imperceptible que no impacta a los clientes; así, la empresa debe mantener los niveles que muestra la simulación en cuanto a calidad con el fin de

que los clientes no abandonen sus servicios.

En la misma Figura 6, es posible observar que los ingresos no percibidos por rescisión de pólizas tienen un incremento en sus valores económicos, se estabiliza en un momento del tiempo posibilitando a la empresa adoptar las acciones o precauciones necesarias para que la organización no sea impactada por los resultados que podría alcanzar dicha variable.

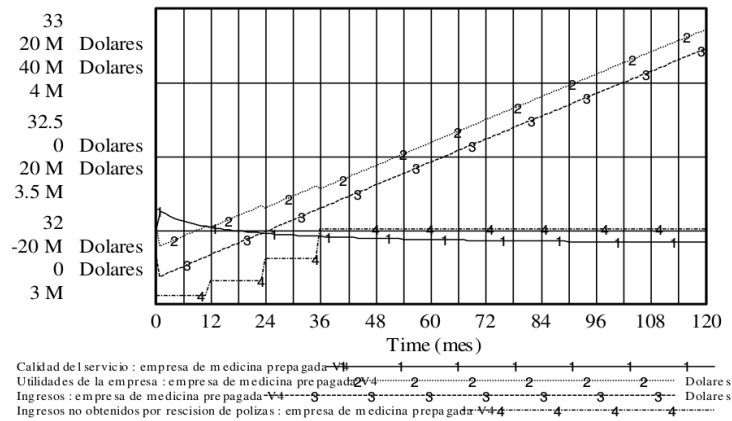


Figura 6. Simulación: calidad de servicio, utilidades, ingresos e ingresos no obtenidos por rescisión de pólizas. Fuente: elaboración propia

Al observar los resultados de la Figura 7, se puede establecer que la empresa debe concentrar sus esfuerzos en los clientes corporativos, por cuanto es un mercado que le conviene explotar conforme lo muestra la simulación encontrada. Se visualiza lo contrario en el mercado de clientes individuales para quienes, al pagar mayores valores en la contratación de pólizas de asistencia médica, los costos resultan onerosos en comparación con los planes corporativos, lo que les obliga, en un momento determinado, a rescindir de las pólizas contratadas.

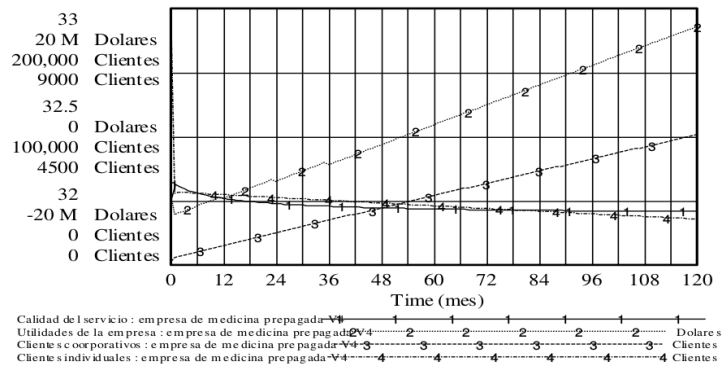
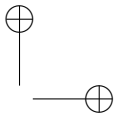
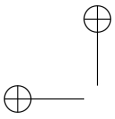


Figura 7. Simulación: calidad de servicio, utilidades, ingresos e ingresos no obtenidos por rescisión de pólizas. Fuente: elaboración propia



5. Conclusiones

El trabajo realizado representa una herramienta básica y útil para ser utilizada por la empresa objeto de estudio, principalmente por la visión de resultados que les podría presentar, conforme a las estrategias que adopten para el negocio. La naturaleza dinámica del proceso de modelado en la posible captación de clientes con sus correspondientes ingresos económicos permite a la empresa analizar los vínculos causales entre los componentes del sistema y su realimentación, posibilitando encontrar resultados de las diferentes situaciones propias del sistema y reaccionar de forma anticipada ante las condiciones cambiantes que se pueden presentar.

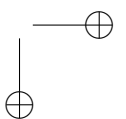
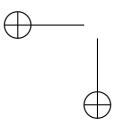
En tal virtud, el modelo diseñado promueve el desarrollo en relación con diferentes aspectos como la capacidad organizacional, la calidad del servicio y la mitigación que es posible enfocar de acuerdo con los costos realizados por la empresa de medicina prepagada; además, el trabajo ejecutado demuestra la aplicabilidad de la dinámica de sistemas en cualquier campo, permitiendo encontrar variables que intervienen específicamente en este tipo de negocio, logrando así la conjugación práctica entre la administración empresarial y lo cuantitativo del negocio.

La investigación realizada a través del diseño y desarrollo del modelo de gestión facilita la planeación organizacional examinando la variabilidad de los clientes potenciales, de los ingresos, de los costos, conjugando todo con el entorno en el que se desenvuelve, permitiendo planificar la disponibilidad de recursos existentes y faltantes para lograr los objetivos previstos. La metodología de la dinámica de sistemas facilita obtener una visión holística de las situaciones empresariales, por ello, en un momento determinado, ayuda en la toma de decisiones para alcanzar en el futuro un balance entre las variables del modelo diseñado.

Finalmente, se puede puntualizar que el trabajo efectuado permitirá generar estudios posteriores en función del entorno de negocio, pues es posible analizar el comportamiento dinámico del sistema incorporando variables que fortalezcan las operaciones empresariales de esta institución, como podrían ser las depreciaciones y amortizaciones de su infraestructura y el conocimiento propio, lo que permitiría obtener un modelo de negocios robusto en el sentido de abarcar variables que en esta primera labor no se consideró. Al terminar se espera que el presente estudio sirva como consulta para empresarios, docentes, estudiantes y personas en general que trabajen con la metodología de la dinámica de sistemas.

Referencias

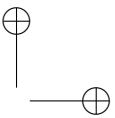
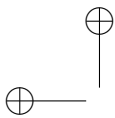
- [1] R. Lucio, N. Villacrés, R. Henríquez, "Sistema de salud de Ecuador", *Salud Pública de México*, vol. 53, no. 2, pp. 177-187, 2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/spm/v53s2/13.pdf> ↑216
- [2] Fondo Monetario Internacional, *Perspectivas económicas las Américas*, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.imf.org/external/spanish/> ↑216
- [3] EKOS Negocios, Medicina prepagada y seguros de salud, 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.ekosnegocios.com/NEGOCIOS/verArticuloContenido.aspx?idArt=9273> ↑217, 218
- [4] E. De la Pared, *Análisis del desarrollo de la estrategia en una organización de servicios, estudio de caso de empresa de medicina prepagada*, Tesis de maestría, Departamento de Ciencias Administrativas y Contables, Universidad Católica del Ecuador, 2017. ↑218



- [5] Superintendencia de Bancos y Seguros del Ecuador, Estadísticas y estudios, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.superbancos.gob.ec/bancos/> ↑218
- [6] J. Macuy-Calle, P. García, J. Behr, M. Garcés y K. Feijoo, “Análisis de la siniestralidad del sector asegurador de Guayaquil y Quito”. *Revista científica Yachana*, vol. 4, no. 1, pp. 63-74, 2015. ↑218
- [7] Registro Oficial, *Ley orgánica que regula a las compañías que financien servicios de atención integral de salud prepagada y a las de seguros que oferten cobertura de seguros de asistencia médica*, octubre 2016. [En línea]. Disponible en <https://www.registroficial.gob.ec/index.php/publicaciones/monthlyarchive/10/2016/limit,50.html> ↑218
- [8] K. Warren. *Competitive Strategy Dynamics*, New York: John Wiley and Sons, 2002. ↑219
- [9] C. Bianchi, *Dynamic Performance Management*, Springer International Publishing Switzerland, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-31845-5> ↑219
- [10] O. Bernardino, F. Gallardo, A. Ponciano y L. Vargas. “Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura, una revisión”, *Revista Tropical and Subtropical Agroecosystems*, vol. 14, no. 3, pp. 999-1010, 2011. ↑219
- [11] N. Farfán y G. Peña. “Evaluación de políticas de protección en el sector papicultor mediante sistemas dinámicos: caso Villapinzón (Cundinamarca)”, *Revista de Ingeniería*, vol. 20, no. 1, pp. 139-157, 2015. ↑219
- [12] C. Franco, G. Méndez y J. Espitia. “Evaluación de escenarios de descongestión vehicular en Bogotá D.C. mediante dinámica de sistemas”. *Revista de Ingeniería*, vol. 20, no. 2, pp. 209-231, 2015. ↑219
- [13] Luis Sandoval. “Modelo de gestión de la cartera para empresas de medicina prepagada”. Disertación para maestría, Departamento de Ciencias Administrativas, Escuela Politécnica Nacional de Quito, 2017 ↑220
- [14] J. Vargas y J. Giraldo. “Modelo de Predicción de Costos en Servicios de Salud Soportado en Simulación Discreta”. *Revista Información Tecnológica*, vol. 25, no. 4, pp. 175-184, 2014. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000400019> ↑220
- [15] W. Toro, *Modelo de simulación prospectiva de la demanda de servicios de salud para enfermedades de alto costo: aplicación para una entidad promotora de salud colombiana*, Tesis doctoral, Departamento de Economía y Ciencias Sociales, Universidad Politécnica de Valencia, 2008. [En línea]. Disponible en <http://www.eumed.net/tesis-doctorales/wrtj/> ↑220
- [16] L. Terán y F. Sandoya, *Diseño y evaluación actuarial de un plan de medicina prepagada para personas mayores de 50 años en el Ecuador*, Tesis de maestría, Departamento de Ciencias Matemáticas, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2009. ↑220
- [17] H. Samaniego, *Desarrollo de un modelo de Gestión Empresarial para potencializar el crecimiento de la pequeña y mediana empresa (PYMES) en la región centro norte de Quito, Ecuador*, Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería, Universidad Internacional Iberoamericana, 2017. ↑220
- [18] H. Samaniego and A. Pascual. “A business management model based on systems dynamics for small and medium enterprise”, *DYNA Management*, vol. 5, no. 1, pp. 1-10, 2017. ↑222
- [19] L. Godoy y C. Bartó. “Validación y valoración de modelos en la dinámica de sistemas”. *Revista Argentina de Enseñanza de la Ingeniería*, vol. 3, número 5, pp. 31-47, 2002. [En línea]. ↑226
- [20] J. Sterman, *Business Dynamics*. McGraw-Hill Higher Education, 2000. ↑226

Hernán Samaniego Guevara

Nació en Riobamba, Ecuador. Ingeniero en Procesos Industriales de la Escuela Superior Politécnica Nacional de Quito-Ecuador. Logró su título de Maestría en Administración de Empresas en la Escuela Superior Politécnica del Ejército en Quito- Ecuador. Alcanzó su doctorado en la Universidad Internacional Iberoamericana de México. Posee certificaciones avaladas por la Universidad de California, Universidad Politécnica de Catalunya, Tecnológico de Monterrey; en áreas de estudio referentes a Dirección de Operaciones, Dinámica de Sistemas, Gestión de Proyectos, Seis Sigma entre otros. Actualmente posee una pequeña empresa de Asesoría y Capacitación en temas de Administración de Operaciones. Adicionalmente, se desempeña como profesor en el área de Investigación de Operaciones y Calidad en la Universidad Politécnica Salesiana, Quito-Ecuador.
Correo electrónico: hsamaniego@ups.edu.ec



Evaluation and Selection of Providers Procedure Based on the Hierarchical Analysis Process and a Mixed Integer/Linear Programming

Procedimiento de Evaluación y Selección de Proveedores Basado en el Proceso de Análisis Jerárquico y en un Modelo de Programación Lineal Entera Mixta

Luis Alfonso Peña Florez¹ Yuber Liliana Rodríguez-Rojas²

¹Universitaria Agustiniiana. Bogotá - Colombia., ²Universidad Santo Tomás. Bogotá - Colombia.
Correspondence: luis.flores@uniagustiniana.edu.co, yuberrodriguez@usantotomas.edu.co

Recibido: 21/05/2018. Modificado: 07/08/2018. Aceptado: 05/10/2018.

Abstract

Context: Organizations today must select suppliers effectively to provide a timely response to the needs of their customers and thus ensure their competitiveness. The objective of this study was to establish a systematic procedure for the selection of suppliers linking the hierarchical analysis process (AHP) and a mixed integer/linear programming (MILP).

Method: A literature review was carried out in the Science Direct, Engineering Information, ProQuest and Scopus databases, which allowed identifying the most used techniques by academics, businessperson and researchers, for the selection of suppliers. The mathematical models for the AHP and the MILP were selected. The AHP was performed by means of simulation with the Montecarlo method and the MILP was validated through sensitivity analysis. In the MILP the parameters provided by Ruiz, Mendoza and Ablanado were used, from which it was modified for different lots quantities.

Results: The parameters that feed the MILP model were changed by the simulations when performing the AHP, the changes made to the parameters showed that the mathematical model is valid. It was possible to propose a procedure for the selection of suppliers that improves the effectiveness in decision making.

Conclusions: The selection of suppliers is an essential aspect to guarantee the quality of the products and services provided by the organizations, therefore, the proposed procedure provides criteria for the decision of the suppliers considering units, capacities, costs and lot number.

Keywords: Mixed integer/linear programming, multicriteria optimization, operations and logistics management, suppliers, supply chain management.

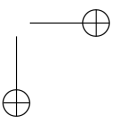
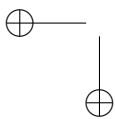
Language: Spanish

Open access



Cite this paper as: L. A. Peña, Y. L. Rodríguez. "Evaluation and Selection of Providers Procedure Based on the Hierarchical Analysis Process and a Mixed Integer/Linear Programming", Ingeniería, Vol. 23, Num. 3, pp. 230-251, Septiembre-Diciembre 2018.

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.13316>



Resumen

Contexto: Las organizaciones en la actualidad deben seleccionar proveedores de forma eficaz para dar una respuesta oportuna a las necesidades de sus clientes y, de esta manera, garantizar su competitividad. El objetivo de este estudio fue establecer un procedimiento para la selección de proveedores vinculando el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) y un modelo de Programación Lineal Entera Mixta (MILP, por sus siglas en inglés).

Método: Se efectuó una revisión de literatura en las bases de datos Science Direct, Engineering Information, ProQuest y Scopus, la cual permitió identificar las técnicas más utilizadas por los académicos, empresarios e investigadores para la selección de proveedores. Se seleccionaron los modelos matemáticos para el AHP y el MILP. El AHP se realizó por medio de simulación con el método de Montecarlo y el MILP se validó a través de análisis de sensibilidad. En el MILP se usaron los parámetros proporcionados por Ruiz, Mendoza y Ablanedo, el cual se modificó para diferentes cantidades de lotes.

Resultados: Los parámetros que alimentan el modelo MILP se cambiaron por los simulados al realizar el AHP, los cambios realizados a los parámetros demostraron que el modelo matemático es válido. Se logró proponer un procedimiento para la selección de proveedores que mejore la eficacia en la toma de decisiones.

Conclusiones: La selección de proveedores es un aspecto esencial para garantizar la calidad de los productos y servicios proporcionados por las organizaciones, por lo tanto, el procedimiento propuesto proporciona criterios para la toma de decisión de los proveedores considerando unidades, capacidades, costos y número de lote.

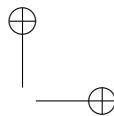
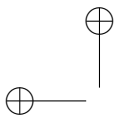
Palabras clave: Gestión de proveedores, gestión logística y operaciones, optimización multicriterio, programación lineal entera mixta, proveedores.

Idioma: Español

1. Introducción

En la actualidad las organizaciones se enfrentan a altos niveles de competitividad, por consiguiente, deben estar preparadas para enfrentarla, para lo cual se requiere satisfacer las necesidades de sus clientes, entre ellas proveer los productos solicitados en las cantidades demandadas, al precio justo y con la calidad específica, con las características deseadas, entre otros; en este sentido, uno de los aspectos que se requiere fortalecer en la gestión de las organizaciones es la selección de los proveedores, quienes tienen un papel prioritario por ser los que proveen de materias primas e insumos.

Las características de los proveedores se ven modificadas de acuerdo con la gestión del cambio que adelante la organización tanto en sus procesos como en sus productos, por ello, es necesario modificar la política de inventarios debido a aspectos relacionados con la cultura organizacional, la capacidad de producción, el costo del producto, el porcentaje de calidad, la velocidad de respuesta, el servicio posventa, el número de unidades que puede suministrar o el tamaño de lote que puede proporcionar. En relación con el tamaño de lote se puede identificar que la cantidad de unidades por lote puede variar, dando oportunidades para que el cliente acceda a promociones, descuentos, rebajas del costo por unidad; por tal razón, se debe evaluar a los proveedores que presentan diferentes tamaños de lotes con el objetivo de acceder a estos descuentos por unidad, se debe identificar qué tamaño de lote se debe solicitar para satisfacer la demanda.



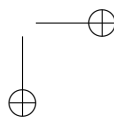
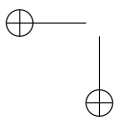
Este artículo presenta un procedimiento para el problema de selección de proveedores, en el cual se relacionan dos técnicas, a saber: Proceso Análisis Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) y Programación Lineal Entera Mixta (MILP, por sus siglas en inglés). Se afronta este problema con dos técnicas, una de aproximación y un modelo de programación entera mixta, la primera como una herramienta de tamizaje con la técnica de optimización multicriterio [1] y la segunda de optimización [2], con las cuales se busca mejorar la eficiencia en la toma de decisiones al momento de elegir un proveedor.

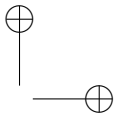
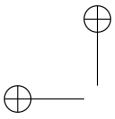
La investigación surgió de la necesidad de dar respuesta a las organizaciones en el SSP, puesto que en la actualidad estas deben adquirir materias primas, componentes, servicios, insumos, entre otros, en el momento preciso, en las mejores condiciones de calidad, precio, disponibilidad, transporte, en fin, una cantidad diversa de criterios por evaluar. Los bienes deben ser obtenidos fuera de la empresa, con el fin de garantizar el aprovisionamiento de los recursos para poder atender los requerimientos de sus clientes [3]; lo anterior garantiza que si se compra bien se vende bien, es por esto que SSP es un problema que se debe optimizar.

En la revisión de la literatura se encontró que algunos autores describen cómo se puede optimizar esta decisión [4]–[10], también afirman que el SSP es problema multicriterio que incluye factores cualitativos y cuantitativos [1], [5], [11]–[13]; se pueden utilizar dos técnicas multicriterio que ayudan a tomar esta decisión: programación matemática y minería de datos. Otros autores, con el fin de seleccionar los mejores proveedores, realizan comparaciones entre factores tangibles e intangibles, algunos de los cuales pueden producir conflicto [11]. Algunas de las técnicas que se identificaron en la solución del problema SSP son minería de datos, técnicas de optimización, técnicas de decisión multicriterio como: Proceso de Análisis en Red (ANP, por sus siglas en inglés), AHP, Análisis Envolvente de Datos (DEA, por sus siglas en inglés), análisis de conglomerados (CA, por sus siglas en inglés), inteligencia artificial (AI, por sus siglas en inglés), modelos de ponderación lineal, simulación de Montecarlo, la teoría de conjuntos difusos, modelos de costo total de propiedad (TCO, por sus siglas en inglés), números difusos, método Electre, método Moora, Modelo Lineal Aditivo (MLA), Topsis, Vikor, Promethee y Análisis de Elección Discreta (DCA, por sus siglas en inglés).

Además de lo anterior, se reconoce que la aplicación de métodos híbridos como es la programación matemática (PM) y DEA permiten generar información que facilita la toma de decisiones frente al problema de selección de proveedores, puesto que se requiere no solo elegir el producto, sino también las unidades de acuerdo con las diferentes cantidades de lotes según cada proveedor; asimismo, se revisaron modelos estadísticos, los cuales se refieren a la incertidumbre de la demanda estocástica, identificando que los modelos estudiados únicamente presentan un solo criterio a través de Redes Bayesianas (BN, por sus siglas en inglés). Por otra parte, se identificaron modelos basados en inteligencia artificial, como Algoritmos Genéticos (AG), Redes Neuronales (NN, por sus siglas en inglés) y sistemas expertos. Dada la complejidad del SSP en el mundo real, la investigación actual tiende a integrar múltiples técnicas de toma de decisiones en el establecimiento de un modelo de decisión en el SSP [14].

Al efectuar la revisión de literatura, se detectaron veintiún artículos relacionados, sin embargo, no se encuentran investigaciones que aborden la selección de proveedores cuando estos ofertan diferentes tamaños de lotes o cuando el comprador exige que le envíen diferentes tamaños de lotes para





acceder a las promociones, descuentos y rebajas de las unidades. En el estudio de Ghaniabadi y Mazinani [15] se identificó que la cantidad de unidades por lote puede variar a diferentes tamaños; por tal razón, se debe evaluar a los proveedores que presentan diversas cantidades de lotes con el objetivo de acceder a estos descuentos por unidad. Es de señalar que, a partir de esta revisión, se detectó AHP y MILP, dos metodologías ampliamente utilizadas para el SSP [2]. El AHP fue introducido por Saaty en 1980, como respuesta a problemas de toma de decisiones en el Departamento de Defensa de los EE.UU.

AHP es un método de selección de alternativas (estrategias, inversiones, proveedores, etc.), que está en función de una serie de criterios, los cuales no se pueden optimizar al mismo tiempo por estar en conflicto, para ello, se debe ponderar tanto los criterios como las alternativas utilizando matrices de comparación pareadas y la escala propuesta por Saaty. El empleo del AHP permite generar el conjunto más apropiado de pesos que representan con precisión la importancia relativa de los criterios y alternativas según la subjetividad del tomador de decisiones, en pro de soluciones más razonables [16].

El MILP es una técnica que se utiliza para optimizar una función sujeta a restricciones, esto con el objetivo de identificar los posibles resultados o combinaciones para la mejor decisión. Investigadores como [11], [17], [18] han utilizado estas técnicas de optimización para solucionar el SSP.

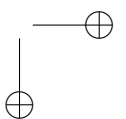
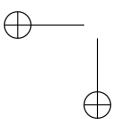
Sin embargo, estas dos metodologías no han sido usadas para elegir proveedores con múltiples tamaños de lotes. Cabe precisar que para una organización es importante saber cuántos lotes diferentes de cada producto requiere y en qué periodo de tiempo debe adquirirlos, es por ello que el objetivo de este artículo es establecer un procedimiento de evaluación y selección de proveedores basado en el proceso de análisis jerárquico y en un modelo de programación lineal entera mixta.

2. Metodología

El alcance de este trabajo es proponer un procedimiento para la selección de proveedores, el cual mejore la eficiencia en la toma de decisiones involucrando estas dos técnicas dentro del proceso. La validación se realizó utilizando la estadística descriptiva e inferencial y el análisis de sensibilidad. En la Figura 1 se presenta el paso a paso que se desarrolla, inicia con la identificación de las técnicas del SSP y de los criterios de selección de proveedores, posteriormente se identificaron los modelos matemáticos y a través de la simulación APH y MILP se efectuó la experimentación; finalmente, se define el procedimiento para la evaluación y selección de proveedores.

Según la revisión de la literatura, se identificaron los modelos matemáticos para el AHP y, al mismo tiempo, para el MILP. El proceso de análisis jerárquico se realizó por medio de simulación con el método de Montecarlo, el cual alimenta al modelo de programación lineal por medio de parámetros también simulados por esta técnica.

La validación de la simulación del AHP se efectuó por medio de estadística tanto descriptiva como inferencial, además, se realizó por medio de simulación con el método de Montecarlo. En el MILP se usaron los parámetros proporcionados por Ruiz, Mendoza y Ablanado [17], del cual se



modificó para diferentes cantidades de lotes y se validó el modelo matemático mediante el análisis de sensibilidad.

Posteriormente, los datos fueron analizados para dar respuesta a la hipótesis: H_0 . El procedimiento de evaluación y selección de proveedores es eficiente en la toma de decisiones cuando se incluye AHP y un MILP.

Maximizar Eficiencia
 $E = \text{Eficiencia}$
 $\text{MAX. } E = f(\text{procedimiento sistemático})$
 $\text{MAX. } E = f(\text{AHP}; \text{MILP})$

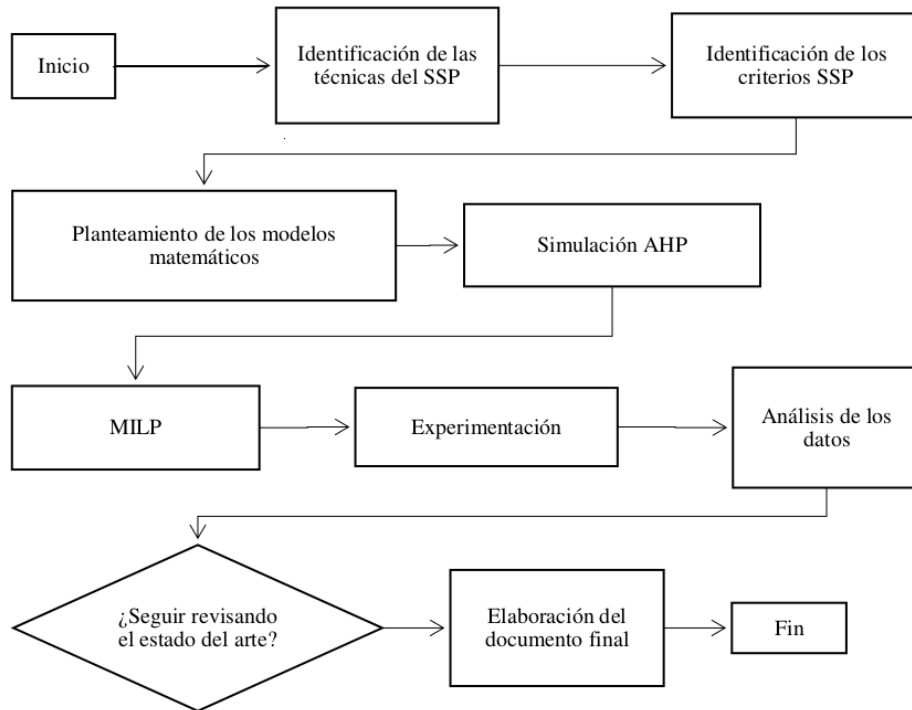
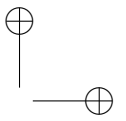
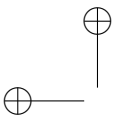


Figura 1. Diagrama de Flujo de la Metodología de Investigación.

3. Resultados

La investigación establece un procedimiento para el SSP usando dos técnicas, una de aproximación y otra de optimización. Este procedimiento se estructura en ocho pasos como se aprecia en la Figura 2. Cabe destacar que el procedimiento propuesto se diferencia de los demás publicados



en esta área del conocimiento en que vincula el AHP y un MILP en las etapas de preselección y asignación de los proveedores. Con la aplicación de estos pasos se mejora la eficiencia en la toma de decisiones al momento de elegir un proveedor, dado que se optimizan los siguientes tipos de costos como es el inventario, órdenes pendientes, adquisición por proveedor y de administración por proveedor; además, este procedimiento constituye un aporte en el conocimiento según literatura revisada, puesto que en las investigaciones reportadas el modelo de programación lineal entera mixta, aunque ha sido utilizado para la selección de proveedores, no ha incluido la condición de diferentes cantidades de lotes; en este sentido, el modelo matemático que soporta el procedimiento propuesto toma como referencia el modelo de Ruiz, Mendoza y Ablanedo [17]. Se identifica que el modelo matemático que se trabaja [17] no cierra los flujos de inventarios al finalizar el horizonte de planeación y no considera los costos de producción de las unidades pendientes por satisfacer (*backorder*); por tal razón, se propone la modificación del modelo matemático, la reproducción del ejemplo numérico expuesto por los autores del artículo en cuestión se presenta con el fin comprobar si funciona para diferentes cantidades de lotes y se complementa dos nuevas restricciones: la eliminación de los inventarios y del *backorder* al final del horizonte de planeación. Los resultados obtenidos son más aceptables y coherentes al satisfacer la demanda en todo el horizonte de planeación.

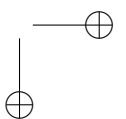
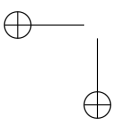
3.1. Procedimiento para la evaluación y selección de proveedores

Se presenta un estudio de caso, en el cual se desea seleccionar a los proveedores idóneos para proveer los recursos que necesita la empresa, esto se realiza utilizando el procedimiento que se propone para la evaluación y selección de proveedores; se inicia con la necesidad de solventar unos requerimientos, los cuales son cuatro productos que se deben satisfacer en un horizonte de planeación de seis meses, en unas cantidades determinadas.

En este caso de estudio se aborda el SSP con la aplicación de un método híbrido, llamado así por la unión de dos métodos, que incluye el AHP y MILP, siguiendo las recomendaciones del estudio de Ho, Xu y Dey [2]. Los autores aluden a la complejidad del proceso en el mundo real y señalan que los resultados tienden a integrar múltiples técnicas de toma de decisiones en el establecimiento de un modelo de decisión en el SSP como AHP, MILP, MP, ANP, entre otros. Según estos mismos autores, el híbrido más beneficioso para el proceso de toma de decisiones es AHP y MILP, por ser el AHP la técnica de aproximación que entrega ponderaciones o la importancia de las alternativas y en la técnica de optimización MILP donde el tomador de decisiones debe tener en consideración las capacidades de los proveedores, el presupuesto del comprador y los productos que el proveedor puede proporcionar.

3.2. Necesidad de contratar un producto o servicio

La persona encargada de seleccionar los proveedores que la organización necesita para satisfacer las necesidades de sus clientes se enfrenta a dos o más alternativas, cuando se habla de estas alternativas se hace referencia a los proveedores de un producto o un servicio.



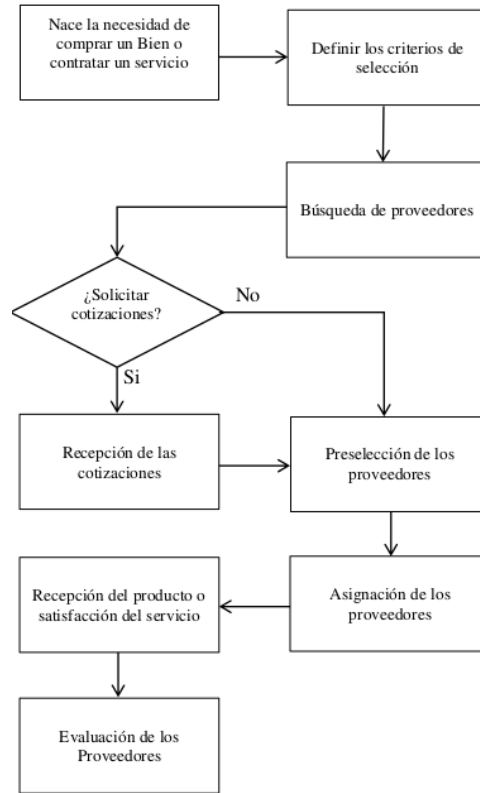


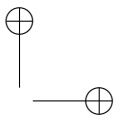
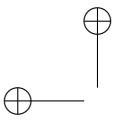
Figura 2. Procedimiento para la evaluación y selección de proveedores.

3.3. Definir los criterios de selección

Es un error seleccionar a un proveedor por solo un criterio, pues en las condiciones de competitividad actuales este único criterio no satisface los requerimientos de los clientes, un ejemplo es el costo; en la actualidad existe variedad de criterios utilizados para resolver el SSP [19]. Estos criterios generalmente se encuentran en conflicto, por ejemplo, un proveedor que presenta el costo más bajo del mercado, pero la calidad no satisface la exigida por el cliente, o cuando la calidad del proveedor se ajusta a los requerimientos del cliente, pero las entregas de este proveedor pueden ser extemporáneas, lo que genera retrasos en los procesos de la organización. A lo cual se debe buscar un equilibrio adecuado entre estas.

3.4. Búsqueda de los proveedores

Se puede realizar con diferentes mecanismos, esta se hace para identificar los posibles proveedores del producto o servicio. Los mecanismos tradicionales para la búsqueda de proveedores son: solicitud de cotizaciones, consulta de base de datos interna y externa, referencias personales, licitaciones, cámaras de comercio, internet, ferias empresariales, exposiciones, asociaciones, etc. En la



actualidad, las TIC han potencializado el espectro de posibilidades para acceder a una gran cantidad de posibles proveedores. Según Keskin, İlhan y Özkan [13], la globalización del comercio y la ampliación del internet han cambiado la preferencia de los clientes, con respecto a muchos factores, por consiguiente, se requiere una mayor y más rápida selección de proveedores, es por ello, que estos mecanismos deben adecuarse a las necesidades de las empresas; lo anterior genera un espacio de mucha competencia en un escenario altamente competitivo, en el cual los proveedores juegan un papel vital en organizaciones exitosas [20].

3.5. Solicitud y recepción de cotizaciones

Para lograr el aprovisionamiento se debe buscar en el mercado quién pueda proveer estos productos, bienes o servicios con calidad, precio justo, con la mayor confiabilidad de entrega, en fin, con un sin número de criterios.

Después de la búsqueda de las empresas proveedoras se debe identificar cuántos proveedores son nuevos y cuántos llevan una trayectoria en la organización; del primer grupo se requiere solicitar información por medio de visitas del representante de ventas, visitas a las empresas de los proveedores y cotizaciones, esto para conocer los aspectos de calidad, de costo, plazos de validez de las ofertas, plazos de entrega, tamaños de lotes, empaques del producto, posibles devoluciones, etc. Del segundo grupo se comprende que dada la trayectoria del proveedor se cuenta con la información necesaria.

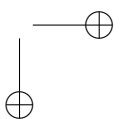
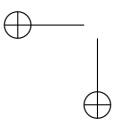
3.6. Preselección de los proveedores

Esta actividad obedece a la identificación de los mejores proveedores que cumplan con todos los criterios preestablecidos por parte de la empresa.

Se utiliza AHP como técnica de aproximación o como un proceso de tamizado para el procedimiento SSP. Se definieron un conjunto de criterios para el AHP relacionados con calidad, tiempos de entrega y capacidad de producción. La razón principal al considerar estos criterios es porque un solo criterio no proporciona la mejor decisión de elección para este problema, por consiguiente, se debe tener en cuenta múltiples criterios a la hora de seleccionar los mejores proveedores [21]. Se definió el criterio costo para la etapa de asignación de forma óptima a los proveedores con MILP según el procedimiento propuesto, todos estos criterios son también utilizados por los investigadores en el SSP.

Siguiendo el procedimiento de selección de proveedores expuesto, como un ejemplo del modelo propuesto, se presentan siete oferentes, los cuales cumplen con los criterios de calidad, tiempos de entrega y capacidad de producción. Los elementos de interacción del problema en cuestión es la selección de los mejores tres oferentes, cuyos criterios son calidad, capacidad de producción y tiempos de entrega; las alternativas son los siete oferentes que cumplieron con las exigencias planteadas por la organización.

Según Ruiz, Mendoza y Ablanedo [17], para garantizar la confiabilidad del flujo de aprovisionamiento se debe utilizar una política de proveedores múltiples, con los cuales se minimiza la



probabilidad de escasez y los efectos producidos al interior de la empresa cuando un proveedor falle; por tal razón, el AHP se realiza para preseleccionar los tres mejores proveedores de los siete presentados como ejemplo, esto se logra calculando y generando de forma simulada el conjunto de pesos o la importancia relativa de los criterios y las alternativas.

El siguiente paso al aplicar AHP es construir y ordenar las matrices de comparaciones pareadas, estas matrices se obtuvieron por medio de simulación de variables discretas y con ayuda del método de Montecarlo; la razón principal para utilizar este método es porque el elemento tiempo no es factor pertinente [22]. Igualmente Montgomery, Runger y Maisel [23] definen una variable aleatoria X discreta uniforme si cada uno de los n valores que están en el rango de esta, X_1, X_2, \dots, X_n , tienen la misma probabilidad de ser escogidos $f(X) = 1/n$, por tal razón, se define que la escala que sugiere Saaty (Tabla I) tiene este tipo de distribución; por consiguiente, a las puntuaciones de esta se les asignan una probabilidad de $f(X) = 1/9$, donde Y_i presenta los posibles valores de la variable, h_i presenta la frecuencia relativa y H_i la frecuencia relativa acumulada.

Tabla I. Distribución de probabilidad para la escala de Saaty.

Yi	Escala de Saaty	Definición	hi	Hi
1	Igualmente preferida	Los dos criterios contribuyen igual al objetivo	1/9	0,111
2			1/9	0,222
3	Moderadamente preferida	La experiencia y el juicio favorecen un poco a un criterio frente al otro	1/9	0,333
4			1/9	0,444
5	Fuertemente preferida	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a un criterio frente al otro	1/9	0,556
6			1/9	0,667
7	Muy frecuentemente preferida	Un criterio es favorecido muy fuertemente sobre el otro. En la práctica se puede demostrar su dominio	1/9	0,778
8			1/9	0,889
9	Extremadamente preferida	La evidencia favorece en la más alta medida a un factor frente al otro	1/9	1,000

Los valores 2, 4, 6 y 8 se utilizan cuando no se puede definir con claridad la preferencia entre los factores, pero se les puede asignar probabilidad. Estos son valores intermedios de preferencia.

Con ayuda de números pseudoaleatorios se construyeron las matrices de comparaciones por pares (A), esto con el objetivo de estimar el peso o la importancia de los criterios (calidad, capacidad de producción y tiempos de entrega) en función de seleccionar los mejores tres proveedores de los siete tomados como ejemplo.

Se generaron porcentajes de calidad para cada proveedor i por medio de la expresión (1), el cual se definió como porcentaje mínimo el 90 % de calidad de cualquier proveedor.

$$\text{Porcentaje de calidad del proveedor } i = (X + 0,1 * ALETORIO()) \quad (1)$$

Donde:

X = Representa el porcentaje mínimo de calidad.

También se simularon los tiempos de entrega y se valoraron en unidades de tiempo (semanas). Los datos solo pueden tomar valores enteros de uno a cinco, para la simulación de estas variables se utiliza la expresión (2).

$$\text{Tiem.entr.prove.}i = ENTERO(1 + (5 - 1) * ALETORIO()) \quad (2)$$

La capacidad de producción se valoró con respecto a la cantidad de lotes que puede suministrar cualquier proveedor g . En la simulación de esta variable se estima que cualquier proveedor puede solo suministrar uno o más tamaños de lotes; se empleó la expresión (3) para simular datos.

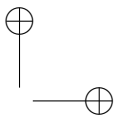
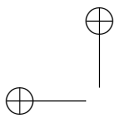
$$\text{Cap.pro.prove.}i = ENTERO(1 + (2) * ALETORIO()) \quad (3)$$

Los parámetros del MILP se simularon para cada uno de los proveedores, entre estos, se simuló si el proveedor g provee el artículo k , el número de unidades por lote del artículo k del proveedor g , capacidad utilizada del artículo k del proveedor g del lote l , costo del lote l del artículo k del proveedor g , capacidad de producción del proveedor g en el tiempo t y costo de administración por tener el proveedor g activo durante un periodo de tiempo.

Un supuesto para el ejemplo propuesto, el cual consiste en disponer de cinco personas encargadas de tomar la decisión de seleccionar los mejores tres oferentes del grupo propuesto de siete, en un caso en particular estas personas pueden ser: el gerente de producción, el gerente de compras, el contador de la compañía, entre otros. Las cuales, al presentárseles las matrices de comparaciones pareadas y realizar el procedimiento de comparación, llegan a un consenso; este conceso da cuenta de la subjetividad mediante el cálculo del cociente de consistencia y definiendo una sola tabla que

Tabla II. Comparaciones pareadas de proveedor versus proveedor en función de la calidad.

Simulación	Proveedor 1	Proveedor 2	Proveedor 3	Proveedor 4	Proveedor 5	Proveedor 6	Proveedor 7	VC
Proveedor 1	1	2	1/2	5	1	3	4	0,202 1
Proveedor 2	1/2	1	1/4	3	1/2	1	2	0,098 1
Proveedor 3	2	4	1	6	2	4	5	0,332 2
Proveedor 4	1/5	1/3	1/6	1	1/5	1/3	1/2	0,037 2
Proveedor 5	1	2	1/2	5	1	2	3	0,181 9
Proveedor 6	1/3	1	1/4	3	1/2	1	1	0,085 0
Proveedor 7	1/4	1/2	1/5	2	1/3	1	1	0,063 6



representan las preferencias del grupo. La subjetividad de la evaluación de las matrices de comparaciones pareadas se podría mejorar por medio de los resultados de la evaluación a los proveedores en periodos anteriores al de la asignación, a través de los criterios (porcentaje de calidad, tiempo de entrega del proveedor y capacidad de producción). En la Tabla II se presenta un ejemplo de la simulación de las comparaciones entre el proveedor i y el proveedor j en función del criterio calidad, obteniendo los elementos a ij simulados. En esta replica consignada en la tabla se evidencia que el proveedor tres fue mejor calificado o tiene más importancia con respecto a los demás proveedores con un 33.22 %.

Para un mayor entendimiento del lector se presenta una explicación breve de esta réplica simulada, en la cual el proveedor cinco es fuertemente preferido con respecto al proveedor cuatro, por lo tanto, el elemento $a_{54} = 5$ como se instituye en la escala sugerida por Saaty (Tabla I), como también se establece que el proveedor uno está entre moderadamente preferida y fuertemente preferido con respecto al proveedor siete, por tal razón, el elemento $a_{17} = 4$, y como último ejemplo se evidencia el proveedor dos y el proveedor seis son igualmente preferidos, por tal motivo el elementos $a_{26} = 1$. Los demás elementos de la matriz se establecen con las propiedades que establece Saaty, las cuales son: (a) reciprocidad, la cual establece que si $a_{ij} * a_{ji} = 1$ entonces $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$ donde $1 \leq a_{ij} \leq 9$; (b) homogeneidad, si las alternativas $i = j$ son a_{ji} consideradas igualmente importantes por lo tanto $a_{ij} = a_{ji} = 1$, se realizaron veintidós comparaciones por tabla, los demás elementos de la matriz se obtienen aplicando estas propiedades.

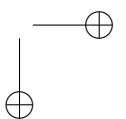
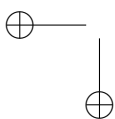
La simulación de los pesos de los criterios en función del problema se obtuvo generando números aleatorios por cada criterio, al sumar estos pesos y dividir el número de generado aleatoriamente entre la suma se obtiene el peso o la importancia relativa de cada criterio en función del problema (Tabla III).

Tabla III. Peso simulados de los criterios.

Criterios		
Calidad	0,5722	0,63733
Capacidad de producción	0,1949	0,21713
Tiempos de entrega	0,1307	0,14554
Suma	0,8977	

Los siguientes pasos al aplicar el AHP son obtener las matrices normalizadas y medir la consistencia, la cual calcula los juicios que los tomadores de decisiones ha tomado con firmeza o coherencia en el transcurso de la serie de comparaciones pareadas; en la simulación las matrices que se obtuvieran el cociente de consistencia (CR) mayor a 10 % se rechazan, la razón principal para realizar esta acción es que los juicios no son coherentes, por el contrario las matrices con $CR < 10\%$ se tienen presentes.

Se realizaron 30 réplicas de estas matrices, con sus correspondientes parámetros por cada proveedor g . El número de veces que cualquier proveedor ocupa alguno de los tres primeros puestos de las 30 réplicas se presenta en la columna de la frecuencia absoluta (n_i) como se ve en la Tabla IV, donde se demuestran que se deben de elegir en el AHP los proveedores tres, cuatro y seis. La razón principal para escoger a estos tres proveedores es porque tienen mayores reiteraciones en cualquiera de los tres puestos, el porcentaje de apariciones de cada uno de los proveedores en cualquier puesto



son: 18,89 % proveedor tres y 17,78 % proveedor cuatro y seis, sumando entre ellas se obtiene más de la mitad de las veces. Cabe recordar que el AHP se aplica como una técnica de tamizaje para seleccionar a tres proveedores de siete prestablecidos al comienzo, los cuales se utilizarán en el siguiente paso, este tamizaje es importante para el siguiente método, en el cual se asignarán de forma óptima estos para satisfacer los requerimientos de cuatro productos en un horizonte de planeación constituido por seis períodos.

Tabla IV. Número de veces que el proveedor g ocupó los primeros puestos.

	Puestos en el AHP			ni	hi
	Primero	Segundo	Tercero		
Proveedor 1	2	1	5	8	8,89 %
Proveedor 2	3	5	1	9	10,00 %
Proveedor 3	5	5	7	17	18,89 %
Proveedor 4	4	8	4	16	17,78 %
Proveedor 5	5	4	5	14	15,56 %
Proveedor 6	5	4	7	16	17,78 %
Proveedor 7	6	3	1	10	11,11 %
	30	30	30	90	

Al realizar las 30 réplicas por medio de la simulación de Montecarlo al AHP, se establece que esta simulación entrega diferentes posibilidades de tamizaje, en la Tabla IV se presenta el número de veces que cualquier proveedor ocupó el primero, el segundo y el tercer puesto. Al analizar la Tabla IV se evidencia que el proveedor siete ocupa seis veces el primer puesto, el segundo puesto el proveedor cuatro con ocho veces y el tercer puesto lo comparten el proveedor tres y el proveedor seis con siete veces.

La validación de este proceso se realizó por medio de la estadística, se realizó este análisis a los pesos (W_i) de los proveedores que ocuparon los primeros tres puestos de las 30 réplicas que arrojó el AHP, donde se demuestra que el error estadístico está en el orden del 3 al 2 %.

La media de cada criterio se puede usar como estimador puntual del parámetro poblacional, pero con la construcción de un intervalo al rededor del estadístico de muestra se atrapa el parámetro poblacional [24], es por esto que se calcula el intervalo de confianza para la media poblacional de estos pesos con la ayuda de la expresión (4). Se obtuvo que el parámetro poblacional para el criterio calidad de esta simulación tiene un peso de 26,2 % < μ < 38,26 % con un nivel de confianza del 95 %, para el criterio capacidad de producción con la misma confianza se espera se encuentre entre 31,41 % < μ < 44,76 % y para el tiempo de entrega se espera que la importancia para esta simulación de este criterio se encuentre entre 22,95 % < μ < 36,46 %.

$$\bar{X} - Z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{S}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{X} + Z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{S}{\sqrt{n}} = 1 - \alpha \quad (4)$$

Al simular la preselección de los proveedores se obtuvieron que los mejores tres proveedores eran: el proveedor tres, proveedor cuatro y proveedor seis. Para evitar confusiones o malentendidos, a partir de este momento se denotan estos tres proveedores como el proveedor uno, dos y tres respectivamente.

3.7. Asignación de proveedores

La aplicación de MILP como complemento de la primera o como técnica de optimización para el procedimiento de asignación de los proveedores. La aplicación de esta técnica se realiza con el fin de proporcionar un sustento eficiente en la toma de decisiones

En la simulación del AHP se obtuvieron los parámetros del modelo MILP, propuesto por Ruiz, Mendoza y Ablanedo [17]. El modelo de estos autores incluye la selección y asignación de proveedores en lotes fijos; en este sentido, la mejora del modelo se incorporó en el uso de múltiples cantidades de lotes. Los autores definieron unos parámetros que se consideraron en la optimización del ejemplo propuesto, adicionalmente, se incorpora un análisis de sensibilidad y a la vez se alimenta el modelo con los parámetros simulados en el AHP.

Para continuar con este procedimiento a continuación se expresa la denotación, en ella se enuncian los parámetros, las variables y el modelo matemático.

Parámetros

- q_{kgl} Número de unidades por lote l del artículo k del proveedor g .
- U_{kgl} Capacidad utilizada del artículo k del proveedor g del lote l .
- C_{kgl} Costo del lote l del artículo k del proveedor g .
- p_{gt} Capacidad de producción del proveedor g en el tiempo t .
- d_{kt} Demanda del artículo k el tiempo t .
- h_k Costo de mantener el artículo k .
- V_k Costo por unidades pendientes del artículo k .
- b_{kt} Unidades sin satisfacer del artículo k en el tiempo t .
- i_{kt} Unidades en el inventario del artículo tipo k en el tiempo t .
- b_{k0} Unidades sin satisfacer del artículo k en el tiempo $t = 0$.
- i_{k0} Unidades en el inventario del artículo tipo k en el tiempo $t = 0$.
- m_g Costo de administración por tener al proveedor g activo durante un período de tiempo.
- ϕ Un valor muy grande.

Variables

- X_{kgl} Número de lotes a ser requerido del artículo k del proveedor g del tamaño de lote l en el tiempo t .
- i_{kt} Inventario en el tiempo t del artículo tipo k .
- b_{kt} Unidades insatisfechas en el tiempo t del artículo tipo k .
- a_{gt} Variable binaria que indica si el proveedor g se encuentra activo durante el período t .

Modelo matemático

$$Min Z = \sum_{k \in W} \left(\sum_{t \in T} i_{kt} h_k + \sum_{t \in T} b_{kt} v_k \right) + \sum_{g \in S} \left(\sum_{k \in W} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} X_{kgl} C_{kgl} + \sum_{z \in T} a_{gz} m_g \right) \quad (5)$$

S.A.

$$d_{kt} + b_{k(t-1)} - i_{k(t-1)} - \sum_{g \in S_k} \sum_{l \in L} q_{kgl} X_{kgl} = b_{kt} - i_{kt} \quad \forall k \in W, \quad \forall t \in T \quad (6)$$

$$\phi a_{gt} \geq \sum_{k \in W} \sum_{l \in L} X_{kgl} \quad \forall g \in S, \quad \forall t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{k \in W} X_{kgl} U_{kgl} \leq P_{gt} \quad \forall g \in S, \quad \forall t \in T \quad (8)$$

$$i_{kt} = 0 \quad \forall k \quad (9)$$

$$b_{kt} = 0 \quad \forall k \quad (10)$$

$$X_{kgl} \geq 0 \quad \forall k \in W, \quad \forall g \in S, \quad \forall t \in T, \quad \forall l \in L \quad (11)$$

$$b_{kt} \geq 0; \quad i_{kt} \geq 0 \quad \forall k \in W, \quad \forall t \in T \quad (12)$$

$$a_{gt} \in \{0, 1\} \quad \forall g \in S, \quad \forall t \in T \quad (13)$$

$$X_{kgl}; \quad b_{kt}; \quad i_{kt} \in Z^+ \quad (14)$$

La función objeto (5) tiene como objetivo minimizar los costos de inventario y los costos de los órdenes pendientes por artículo, costos de adquisición y costos de administración por proveedor. Las restricciones en (6) determinan el flujo de unidades para el artículo k en todo los períodos de tiempo t ; en estas se tienen presentes todos los tamaños diferentes de lotes recibidos del proveedor g que puede producir el artículo k , en (7) son restricciones que determinan si un proveedor g está activo o no durante el período t , las restricciones en (8) limitan los lotes asignados al proveedor g para todo el producto hasta el período t , las restricción en (9) determinan el inventario al final del horizonte de planeación el cual debe ser igual a cero para cada artículo k , o igual a una constante K que representa un inventario de seguridad. Las restricciones en (10) determinan que no se permiten unidades pendientes al finalizar el horizonte de planeación, lo cual demuestra que se debe satisfacer la demanda en todo el horizonte de planeación, las demás restricciones (11), (12), (13) y (14) representan las restricciones de no negatividad de las variables, variables binarias y variables enteras.

Con esta técnica se espera identificar cuántos lotes se deben comprar del artículo k , del proveedor g , en qué período t y qué tamaño de lote l , con el objetivo de minimizar los costos de inventario, órdenes pendientes, administración de los proveedores y el costo de compra de los productos.

Por tal razón se presenta en la Tabla V, la información por artículo, en la Tabla VI, se presenta la información por proveedor y en la Tabla VII, se expone información de los artículos por proveedor.

Tabla V. Información por artículo.

Costo inventario		Costo de ordenes atrasadas	Demanda (dkt)					
k	hk	Vk	t = 1	2	3	4	5	6
1	1	20	100	30	50	90	40	50
2	2	50	50	75	40	10	50	40
3	3	60	120	300	100	500	80	20
4	1	70	20	35	20	10	12	60

Fuente: Ruiz, Mendoza y Ablanado (2013)

Tabla VI. Información del proveedor. Fuente: Ruiz, Mendoza y Ablanado (2013).

Proveedor (g)	Costos de administración	Pgt					
	mg	t = 1	2	3	4	5	6
1	400	2	2	2,5	2	0	2
2	600	1,5	1	3	3	2	2
3	900	1	2	3	2	2	3

Fuente: Ruiz, Mendoza y Ablanado (2013).

Tabla VII. Información de los artículos por proveedor.

Proveedor	Artículo	Lote							
		1		2		3		4	
		Lote 1	Lote 2	Lote 1	Lote 2	Lote 1	Lote 2	Lote 1	Lote 2
g=1	Unidades por lote, qklg	35	50			90	100		
	Costo de producción por lote, Cklg	100	1400			1820	2000		
	Capacidad utilizada por lote, Ukg	0,6				0,4			
g=2	Unidades por lote, qklg	30	50	200	220	100	110	8	18
	Costo de producción por lote, Cklg	900	1400	2000	2100	2000	2100	90	160
	Capacidad utilizada por lote, Ukg	1		2		1		1	
g=3	Unidades por lote, qklg			65	85	55	65	10	15
	Costo de producción por lote, Cklg			750	800	1000	1150	100	135
	Capacidad utilizada por lote, Ukg			0,5		0,5		0,7	

En la Tabla VIII, se presenta el costo por unidad del artículo tipo k , suministrado por el proveedor tipo g del tamaño de lote tipo l , en ella se formula el costo de una unidad de un artículo si se compra a un determinado proveedor, con un tamaño de lote específico, por ejemplo, si se observa la Tabla VIII se evidencia que el precio más económico para el artículo tres lo proporciona el proveedor tres con el tamaño de lote dos.

Tabla VIII. Costo por unidad del artículo tipo k suministrado por proveedor tipo g del tamaño de lote tipo l .

Proveedor		Artículo Cos./Uni.			
		1	2	3	4
g=1	Lote 1	28,57		20,22	
	Lote 2	28,00		20,00	
g=2	Lote 1	30,00	10,00	20,00	11,25
	Lote 2	28,00	9,55	19,09	8,89
g=3	Lote 1		11,54	18,18	10,00
	Lote 2		9,41	17,69	9,00

Los supuestos de este modelo son: la demanda de los artículos es determinística, algunos de los proveedores solo pueden suministrar unos productos, cada producto debe ser ofertado por lo menos por dos proveedores, el inventario inicial y final como también las órdenes pendientes para cualquier producto son cero y los proveedores presentan dos tamaños de lote con diferentes cantidades por cada producto.

El modelo matemático tiene que evaluar 208 variables entre enteras y binarias, las enteras compuestas por 144 variables que proporcionan en número de lotes a ser requerido del artículo k del proveedor g del tamaño de lote l en el tiempo t , veinticuatro variables que representan el nivel de inventario del artículo k al final del período t , veinticuatro variables proporcionan las unidades pendientes del artículo k al final del período t . Las binarias compuestas por dieciocho variables que identifican si el proveedor g se encuentra activo durante el período t , y un total de 68 restricciones.

3.8. Con los parámetros propuestos por los autores

En la Tabla IX se presentan de forma óptima la asignación de los tres proveedores preseleccionados, teniendo en cuenta los parámetros que Ruiz, Mendoza y Ablanedo [17] propusieron, en la cual se establece que el primer artículo lo satisfacen los proveedores uno y dos. El costo total de esta asignación es \$47 667, constituido de la siguiente forma: el costo de inventario fue de \$902, el costo por órdenes pendientes es \$3140, \$7300 el costo de administración por proveedores y \$36 325 el costo de adquisición de los diferentes productos.

En la Tabla IX se observa también que el proveedor uno, al satisfacer el producto tres, debe de entregar dos diferentes cantidades de lote en el cuarto período, con un costo por unidad de \$20,22 y \$20 respectivamente; también se observa que el proveedor dos debe entregar dos lotes de 110 unidades por lote para el mismo producto y periodo de tiempo, lo cual corresponde a 220 unidades de este proveedor, con un costo por unidad \$19,09, por lo tanto se esperan recibir 500 unidades en el cuarto período, para satisfacer la demanda de este periodo.

Al realizar los análisis correspondientes, se observa que el costo más bajo por unidad del producto tres lo proporciona el proveedor tres (Tabla VIII), el modelo indica que este proveedor no es utilizado para proporcionar este producto en el período cuatro, esto se debe a que las unidades por lote son muy pequeñas (Tabla VII) en comparación con los otros dos proveedores, como también la capacidad de producción del proveedor es muy baja en el horizonte de planeación.

Tabla IX. Solución óptima.

Artículo	Tipo de proveedor	Tipo de lote	t = 1	2	3	4	5	6
k=1	Proveedor 1	Lote 1		2	3	1		
		Lote 2	2					
	Proveedor 2	Lote 1						
		Lote 2					1	
k=2	Proveedor 2	Lote 1			1			
		Lote 2						
	Proveedor 3	Lote 1	1					
		Lote 2						
k=3	Proveedor 1	Lote 1	1			2		
		Lote 2		2	1	1		
	Proveedor 2	Lote 1					1	
		Lote 2				2		
	Proveedor 3	Lote 1						
		Lote 2	1	1				
k=4	Proveedor 2	Lote 1						
		Lote 2	1	1	1	1		
	Proveedor 3	Lote 1			1			
		Lote 2			1		4	

El análisis de sensibilidad consiste en medir el efecto que tiene sobre la solución óptima el hecho de hacer cambios en los valores en los parámetros del modelo [25], por tal razón, se ilustra la sensibilidad del modelo aumentándole una unidad a la capacidad al proveedor tres; en la Tabla X se evidencia la solución óptima realizando este cambio en los parámetros.

Tabla X. Solución óptima del análisis de sensibilidad.

Artículo	Tipo de proveedor	Tipo de lote	t = 1	2	3	4	5	6
k=1	Proveedor 1	Lote 1		2	3	1		
		Lote 2	2			1		
	Proveedor 2	Lote 1						
		Lote 2						
k=2	Proveedor 2	Lote 1			1			
		Lote 2						
	Proveedor 3	Lote 1	1					
		Lote 2						
k=3	Proveedor 1	Lote 1	2	1				
		Lote 2			1	1		
	Proveedor 2	Lote 1						
		Lote 2						
	Proveedor 3	Lote 1						
		Lote 2		3	6	1		
k=4	Proveedor 2	Lote 1						
		Lote 2			1	3		
	Proveedor 3	Lote 1					1	
		Lote 2	2	2			1	

El nuevo costo total es \$46 230, el cual se desglosa así: \$1505 el costo de inventario, \$3000 el costo órdenes pendientes, \$6400 el costo de administración de los proveedores activos en algún periodo de tiempo y el costo de compra o de adquisición de \$35 325.

Como también se evidencia en la Tabla IX el proveedor tres solo entregaba un lote en el periodo uno y en el periodo dos del artículo tres, con una cantidad por cada lote de 65 unidades; por otro lado, en la Tabla X, este mismo proveedor debe entregar el mismo artículo de la siguiente forma: tres lotes en el periodo dos, seis lotes en el periodo cuatro y un lote en el periodo cinco, con la misma cantidad de unidades por lote, esto se debe al costo más bajo por unidad del producto y al aumento de la capacidad del proveedor.

Al comparar los resultados se evidencia que el costo total disminuye en 3 %, al aumentar en una unidad la capacidad del proveedor tres, contrastando las dos soluciones óptimas se establece: el costo de inventario subió de \$902 a \$1505, el costo de ordenes pendientes disminuyó de \$3140 a \$3000, el costo de administración de los proveedores disminuyó de \$7300 a \$6400 y el costo de adquisición disminuyó \$36 325 a \$35 325.

De acuerdo con el análisis hecho anteriormente sobre el costo por unidad del producto tres, donde lo provee el proveedor tres con el lote dos, el cual es igual a \$17,69 por unidad y es el costo más barato, el cual no se tiene presente en la respuesta anterior; se evidencia en la Tabla 10 que esta situación cambia al aumentarle la capacidad a este proveedor en una unidad en todo el horizonte de planeación, está en la posibilidad de oferta y entregar seis lotes, con un tamaño de lote de 65 unidades en el período cuatro, por consiguiente, está en la capacidad el proveedor de entregar 390 unidades con un costo de producción de \$2000 en este periodo.

3.9. Con los parámetros simulados AHP

En este apartado se realizará la optimización de la preselección de los proveedores con los parámetros simulados con el AHP, los resultados esperados de esta simulación indican que se debe escoger al proveedor tres, proveedor cuatro y proveedor seis, por fortuna de las 30 réplicas que se realizaron se presentó una con estos tres proveedores ocupando los primeros puestos, se hace referencia a la réplica veintidós, en primer lugar se encuentra el proveedor cuatro, en segundo lugar el proveedor tres y en el tercer lugar el proveedor seis. Se presentan los parámetros de esta réplica (Tabla XI y Tabla XII), los demás parámetros permanecen sin cambio. En esta réplica se evidencia que el proveedor tres y cuatro distribuye los cuatros productos, en cambio el proveedor seis no suministra el producto cuatro, los proveedores tres y cuatro suministran dos tamaños de lotes, pero el proveedor seis solo un tamaño de lote.

Tabla XI. Información por proveedor simulada por AHP.

Costos de administración		Pgt					
Proveedor (g)	mg	Z = 1	2	3	4	5	6
4	700	3	0	1	2	0	3
6	800	2	3	0	3	1	2
3	400	2	1	3	0	1	2

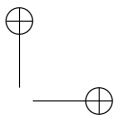
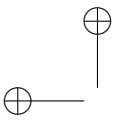
Tabla XII. Información de los artículos por proveedor simulados por AHP.

Proveedor	Artículo								
	1		2		3		4		
	Lote 1	Lote 2	Lote 1	Lote 2	Lote 1	Lote 2	Lote 1	Lote 2	
g=4	Unidades por lote, qklg	45	55	140	155	85	95	14	24
	Costo de proc. Por lote, Cklg	1323	1542	1477	1555	1727	1697	168	227
	Capacidad utilizada por lote, Ukg	1		0,9		1		1	
g=6	Unidades por lote, qklg	55		110		70			
	Costo de proc. Por lote, Cklg	1593		1236		1374			
	Capacidad utilizada por lote, Ukg	0,7		0,8		0,8			
g=3	Unidades por lote, qklg	45	50	80	90	100	115	8	13
	Costo de proc. Por lote, Cklg	1439	1546	943	1051	2162	2175	75,8	95,3
	Capacidad utilizada por lote, Ukg		0,3		1		0,2		1

En la Tabla XIII, se presenta la tabla óptima con los parámetros simulados, con un costo total de esta asignación de \$47 219.70.

Tabla XIII. Solución óptima del análisis de sensibilidad.

Artículo	Tipo de proveedor	Tipo de lote	t = 1	2	3	4	5	6
k=1	Proveedor 4	Lote 1						1
		Lote 2						
	Proveedor 6	Lote 1						
		Lote 2	3	1	2		1	
k=2	Proveedor 4	Lote 1						
		Lote 2				1		
	Proveedor 6	Lote 1	1					
		Lote 2						
k=3	Proveedor 4	Lote 1						1
		Lote 2						1
	Proveedor 6	Lote 1	1				3	
		Lote 2	1	3	1			
k=4	Proveedor 4	Lote 1						1
		Lote 2	3					1
	Proveedor 3	Lote 1						1
		Lote 2			2			1



3.10. Recepción del producto o satisfacción del servicio

La satisfacción del servicio es una muestra de la confianza que tienen las organizaciones por sus proveedores [26]. En este procedimiento se espera que los proveedores seleccionados y asignados para uno o varios productos en el tiempo previsto cumplan con los requerimientos solicitados por la organización.

3.11. Evaluación de proveedores

La calificación de desempeño se realiza proporcionando una evaluación al servicio prestado por cada proveedor, esta calificación puede variar desde 0 hasta 100 puntos.

La calificación final de cada uno de los proveedores se obtiene realizando un promedio de las calificaciones obtenidas por cada criterio en el horizonte de planeación, lo anterior con el objetivo de evaluar a los proveedores para continuar con sus servicios, para futuras contrataciones y suspender o eliminar las relaciones con alguno de ellos.

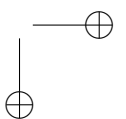
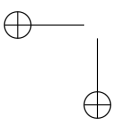
4. Conclusiones

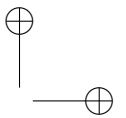
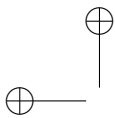
El modelo matemático propuesto corresponde a una versión mejorada del modelo de Ruiz, Mendoza y Ablanado [17], puesto que incorpora dos nuevas restricciones que permiten cerrar los flujos de inventarios y *backorder* al final del horizonte de planeación en tanto se satisface la demanda y no se dejan unidades pendientes. Además, incluye las diferentes cantidades de lotes al momento de seleccionar los proveedores, aspectos que contribuyen a mejorar la toma de decisiones ya que optimiza costos de inventario, órdenes pendientes, adquisición por proveedor y administración por proveedor. Igualmente es relevante mencionar que un elemento adicional que se tuvo que considerar sobre el modelo propuesto [17] es el cálculo de la oferta del producto tipo k en el periodo t , con el objetivo de determinar si los proveedores cubren la demanda, es decir, sin la incorporación de las restricciones nueve y diez (inventario y *backorder* final =0) el modelo no es viable para el escenario estudiado.

Además, se identificaron 117 criterios, los cuales se clasificaron en ocho grupos: calidad, producción, costo, financieros, administrativos, logísticos, servicio posventa y otros criterios. Los criterios con mayor utilización en los artículos científicos revisados son: sistema de gestión de la calidad con 33 %, costo 23 %, entrega del producto o servicio 21 %, capacidad del proveedor 18 %, aseguramiento en las políticas ambientales 17,5 %, entre otros.

Se propuso y se estableció un procedimiento, descrito en la sección de resultados, para la evaluación y selección de proveedores que mejore la eficacia en la toma de decisiones en la cual intervinieran AHP Y MILP, el primero (AHP) como técnica de aproximación y el segundo (MILP) como técnica de optimización que permita la disminución de los costos, y contempla diferentes cantidades de lotes por cada proveedor.

En el modelo de programación lineal entera mixta inicialmente se aplicaron los parámetros que proporciona el referente teórico [17], y así obtener un punto de comparación al momento de ana-



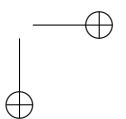
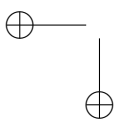


lizar los resultados que se desarrollaron con la modificación del modelo propuesto, además de incorporar los nuevos parámetros que se obtuvieron al aplicar el AHP (simulados), en la que se lograron buenos resultados según el proceso de validación. La validación de la simulación del AHP se realizó por medio de la estadística descriptiva y estadística inferencial. La validación de la técnica de optimización en que se empleó el MILP se realizó por medio de un análisis de sensibilidad.

Se recomienda en futuras investigaciones agregar parámetros al modelo matemático y relacionarlos con otras variables, entre ellas, el nivel de calidad deseado, el tiempo de entrega del producto y la ponderación o calificación de los proveedores para incluir la evaluación de estos cuando son proveedores antiguos. Adicionalmente, estudiar un híbrido entre una aproximación estadística que disminuya la incertidumbre de la demanda y la incorporación de una técnica de optimización matemática, es decir, que los resultados de la disminución de la incertidumbre de la demanda sean una entrada en la técnica de optimización.

Referencias

- [1] W. Sarache, O. Castrillón y L. Ortiz, "Selección de proveedores: una aproximación al estado del arte". *Cuadernos De Administración*, vol. 22, no. 38, pp. 145-167, 2009. [↑232](#)
- [2] W. Ho, X. Xu and P. K. Dey, "Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: A literature review". *European Journal of Operational Research*, vol. 202, no. 1, pp. 16-24, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.05.009> [↑232, 233, 235](#)
- [3] S. Chopra and P. Meindl, *Supply chain management. Strategy, planning and operation*. Pearson, 2013. [↑232](#)
- [4] S. Amin, J. Razmi y G. Zhang, "Selección de proveedores y asignación de orden basado en el análisis FODA y difusa programación lineal difusa". *Sistemas Expertos con Aplicaciones*, vol. 38, no. 1, pp. 334-342, 2011. [↑232](#)
- [5] F. M. Fernández, R. C. Suárez, J. V. Balsera y L. F. Álvarez, "Aplicación de técnicas de toma de decisión multicriterio discretas al proceso de selección de proveedores sanitarios". En *XIV International Congress on Project Engineering*, Madrid, junio y julio, 2010. [↑232](#)
- [6] U. M. Herrera y G. J. Osorio, "Modelo para la gestión de proveedores utilizando AHP difuso". *Estudios Gerenciales*, vol. 22, no. 99, pp. 69-88, 2006. [↑232](#)
- [7] J. C. Figueroa-García, G. Hernández and C. Franco, "Towards Solving Matrix Games with Interval Type-2 Fuzzy Uncertainty through Linear Optimization". *Ingeniería*, vol. 18, no. 2, pp. 85-96, 2013. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2013.2.a06> [↑232](#)
- [8] J. A. Patiño, Y. X. Daza and E. Lopez-Santana, "A Hybrid Mixed-Integer Optimization and Clustering Approach to Selective Collection Services Problem of Domestic Solid Waste". *Ingeniería*, vol. 21, no. 2, pp. 235-247, 2016. [↑232](#)
- [9] E. López-Santana, G. Méndez-Giraldo, C. Franco-Franco, "Diseño de cadenas de distribución con demanda bajo incertidumbre: una aproximación de programación lineal difusa". *Ingeniería*, vol. 18, no. 2, pp. 68-84, 2013 [↑232](#)
- [10] A. C. Da Silva, J. R. Ribeiro and M. C. Belderrain, "ANP and ratings model applied to supplier selection problem". In *International Symposium on the Analytic Hierarchy Process*, Pennsylvania, July, 2009 [↑232](#)
- [11] S. H. Ghodspour and C. O'Brien, "A decision support system for supplier selection using an integrated analytic hierarchy process and linear programming". *International Journal of Production Economics*, vol. 56, pp. 199-212, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(97\)00009-1](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(97)00009-1) [↑232, 233](#)
- [12] L. De Boer, E. Labro, and P. Morlacchi, "A review of methods supporting supplier selection". *European Journal of Purchasing and Supply Management*, vol. 7, no. 2, pp. 75-89, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0969-7012\(00\)00028-9](https://doi.org/10.1016/S0969-7012(00)00028-9) [↑232](#)
- [13] G. A. Keskin, S. Ilhan and C. Özkan, "The Fuzzy ART algorithm: A categorization method for supplier evaluation and selection". *Expert Systems with Applications*, vol. 37, no. 2, pp. 1235-1240, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.06.004> [↑232, 237](#)
- [14] J. Chai, J. N. Liu and E. W. Ngai, "Application of decision-making techniques in supplier selection: A systematic review of literature". *Expert Systems with Applications*, vol. 40, no. 10, pp. 3872-3885, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.05.004>



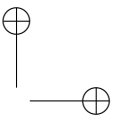
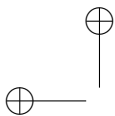
- [org/10.1016/j.eswa.2012.12.040](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.12.040) ↑232
- [15] M. Ghaniabadi and A. Mazinani, "Dynamic lot sizing with multiple suppliers, backloging and quantity discounts". *Computers and Industrial Engineering*, vol. 110, pp. 67-74, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.05.031> ↑233
- [16] T. Y. Wang and Y. H. Yang, "A fuzzy model for supplier selection in quantity discount environments". *Expert Systems with Applications*, vol. 36, no. 10, pp. 12179-12187, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.03.018> ↑233
- [17] T. A. Ruiz, A. Mendoza y R. J. Ablanedo, "Modelo para la planificación en la cadena de suministro: Selección y asignación a proveedores en el caso de lotes fijos", *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 31, no. 1, pp. 1-21, 2013. ↑233, 235, 237, 242, 245, 249
- [18] A. H. Lee, H. Y. Kang, C. M. Lai and W. Y. Hong, "An integrated model for lot sizing with supplier selection and quantity discounts". *Applied Mathematical Modelling*, vol. 37, no. 7, pp. 4733-4746, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.09.056> ↑233
- [19] J. Razmi, H. Rafiei and M. Hashemi, "Designing a decision support system to evaluate and select suppliers using fuzzy analytic network process". *Computers and Industrial Engineering*, vol. 57, no. 4, pp. 1282-1290, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.06.008> ↑236
- [20] N. R. Ware, S. P. Singh and K. D. Banwet, "A mixed-integer non-linear program to model dynamic supplier selection problem". *Expert Systems with Applications*, vol. 41, no. 2, pp. 671-678, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.092> ↑237
- [21] W. L. Ng, "An efficient and simple model for multiple criteria supplier selection problem". *European Journal of Operational Research*, vol. 186, no. 3, pp. 1059-1067, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.01.018> ↑237
- [22] H. A. Taha, *Investigación de operaciones*. México: Pearson Educación, 2004. ↑238
- [23] D. C. Montgomery, G. C. Runger and L. A. Maisel, *Applied statistics and probability for engineers*. Costa Rica: Exedra, 2006. ↑238
- [24] A. Nieves, F. Domínguez and F. Flores, *Probabilidad y estadística para ingeniería*. México: Mc Graw Hill, 2010. ↑241
- [25] F. S. Hiller y G. J. Lieberman, *Introducción a la Investigación de Operaciones*. México: McGraw-Hill, 2010. ↑246
- [26] R. C. Macedo, R. S. Martins, L. Rossoni e G. S. Martins, "Confiança nos relacionamentos em cluster de empresas". *RAE-Revista de Administração de Empresas*, vol. 57, no. 4, pp. 330-341, 2017. <https://doi.org/10.1590/s0034-759020170404> ↑249
- [27] T. L. Saaty, *What is the Analytic Hierarchy Process?*. Berlin: Springer Heidelberg, 1988. https://doi.org/10.1007/978-3-642-83555-1_5 ↑

Luis Alfonso Peña Florez

Es Ingeniero Industrial de la Universidad Católica de Bogotá, Colombia. Obtuvo su título de Maestría en Ingeniería Industrial en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá, Colombia. Actualmente se desempeña como profesor en el área de Investigación de Operaciones y Estadística en la Universidad Agustiniiana, Bogotá, Colombia, y pertenece como investigador al grupo GEICOS donde realiza estudios sobre Optimización de procesos de producción, logística y servicios. e-mail: luis.pena@uniagustiniana.edu.co.

Yuber Liliana Rodríguez-Rojas

Es Fisioterapeuta de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Obtuvo su título de Maestría en Salud y Seguridad en el Trabajo en la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Obtuvo su doctorado en Administración en la Universidad de Celaya, de Celaya, México. Actualmente se desempeña como profesor en el área de Calidad, Gestión Integral y Seguridad y Salud en el Trabajo en la Universidad Santo Tomás de Bogotá, Colombia, y pertenece como investigador en el grupo GEAMEC donde realiza estudios sobre Gestión organizacional y seguridad y salud en el trabajo, y pertenece como investigador al grupo GEAMEC donde realiza estudios sobre Gestión organizacional y seguridad y salud en el trabajo. e-mail: yuberrodriguez@usantotomas.edu.co



Review

REVISTA
Ingeniería

Cadmium, Copper and Lead Adsorption on Natural and Modified Bentonite, Kaolin and Zeolite: A Review of Process Parameters, Isotherms and Kinetics

Adsorción de Cadmio, Cobre y Plomo en Bentonita, Caolín y Zeolita Naturales y Modificadas: Una Revisión de los Parámetros de Operación, Isothermas y Cinética

Dalia Carbonel Ramos

Escuela de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima - Perú.
Correspondence: dcarbonelr@uni.pe

Recibido: 04/06/2018. Modificado: 24/08/2018. Aceptado: 18/09/2018.

Abstract

Context: Adsorption is a tertiary wastewater treatment that can be effectively employed to remove metal ions from aqueous solutions. Natural and modified clays and zeolites have been widely use as low-cost materials to increase the competitive advantage of the process.

Method: A comprehensive review was made amongst articles, that during the last decade, have studied cadmium, copper and lead adsorption onto natural and modified bentonite, clay and zeolite.

Results: Different process parameters, equilibrium conditions and kinetics were analyzed. Operation parameters studied were initial metal ion concentration, solution pH, adsorbent dosage and temperature. Compilation of system efficiencies, in regards to maximum adsorption capacity, is presented. Isotherm models to assess adsorption equilibrium as well as kinetic and diffusion models in studies reviewed are discussed.

Conclusions: Bentonite, kaolin and zeolite have been proven to be adequate materials to remove cadmium, copper and lead from aqueous solutions. The different adsorption capacities of cadmium, lead and copper are a reflection of the influence of many process parameters. The Langmuir isotherm usually describes best the equilibrium adsorption in the articles reviewed. Finally, the pseudo-second orden model better describes the kinetics in many cases.

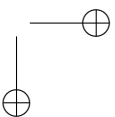
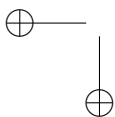
Keywords: Clays, clinoptilolite; natural adsorbents, heavy metals; process parameters; adsorption equilibrium; kinetics adsorption.

Language: Spanish

Open access



Cite this paper as: D. Carbonel, "Cadmium, Copper and Lead Adsorption on Natural and Modified Bentonite, Kaolin and Zeolite: A Review of Process Parameters, Isotherms and Kinetics", Ingeniería, vol. 23, no.3, pp. 252-273, Sep-Dic 2018.
© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.13418>



Resumen

Contexto: La adsorción es un proceso efectivo para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con metales pesados. El uso de adsorbentes de bajo costo incrementa la ventaja y competitividad de este proceso; en este sentido, arcillas y zeolitas, naturales y modificadas, han sido usadas ampliamente para la remoción de metales pesados de aguas residuales.

Método: Se revisaron, analizaron y compararon los estudios realizados durante la última década referentes a la adsorción de cadmio, cobre y plomo por bentonita, caolín y zeolita, naturales y modificadas.

Resultados: Se analizan diferentes parámetros de operación, condiciones de equilibrio y cinética. Los parámetros de operación estudiados son la concentración inicial de metales, pH de la solución, dosis de adsorbente y temperatura del sistema. Se presenta una recopilación de la eficiencia de los sistemas respecto a la capacidad máxima de adsorción; además, se discuten los modelos de isotermas usados para analizar el equilibrio de adsorción, así como los modelos cinéticos y de difusión en los estudios revisados.

Conclusiones: El uso de bentonita, caolín y zeolita es efectivo para la remoción de cadmio, cobre y plomo de soluciones acuosas. La influencia de diversos parámetros de operación se ve reflejado en la variabilidad de las capacidades de adsorción de cadmio, cobre y plomo. En relación con el equilibrio de adsorción en la mayoría de estudios revisados, la isoterma de Langmuir es la que mejor se ajusta a los datos; en cuanto a la cinética, el modelo de pseudosegundo orden es el que mejor se ajusta a los datos.

Palabras clave: Adsorbentes naturales, arcillas, cinética de adsorción, clinoptilolita, equilibrio de adsorción, metales pesados, parámetros de operación.

Idioma: Español

1. Introducción

En la actualidad, la intensa actividad industrial produce aguas residuales que contienen diversos metales pesados, entre ellos el cadmio, cobre y plomo; así, la contaminación de los ecosistemas acuáticos, resultante del vertimiento de esta agua sin tratar, es una de las principales preocupaciones de los gestores ambientales debido a la alta toxicidad y persistencia. Según la EPA (siglas en inglés de Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos), varios metales pesados figuran en lista de contaminantes prioritarios por ser una preocupación para la salud pública, estos son: arsénico, cromo, cobalto, níquel, cobre, zinc, plata, cadmio, mercurio, talio, titanio, selenio y plomo [1]. El cadmio, cobre y plomo provienen de numerosas actividades y, por encima de los límites permisibles, ocasionan efectos adversos y desórdenes en seres humanos (Tabla I) al acumularse en tejidos vivos [2].

Durante los últimos años, el proceso de adsorción ha tomado importancia como un método sencillo y económico para la remoción de contaminantes en el tratamiento de aguas [3], lo anterior debido a la flexibilidad en el diseño, la calidad del efluente tratado, la reversibilidad del proceso y la posibilidad de regenerar el adsorbente empleado [4]. Entre los adsorbentes más económicos y eficientes se encuentran materiales naturales como la bentonita, el caolín y las zeolitas, cuya estructura y composición les confiere una gran capacidad de intercambio catiónico y los hace materiales ideales para la remoción de diferentes tipos de contaminantes [5]. Los tratamientos físicos y químicos han sido usados con éxito para aumentar la superficie específica de los minerales y, en consecuencia, la capacidad de adsorción [2], [6].

En la última década se han hecho artículos de revisión que abordan la adsorción de contaminantes industriales en soluciones acuosas empleando arcillas, zeolita [7] y bentonita [8], [9], algunas recopilaciones se han enfocado en la adsorción de metales pesados con arcillas [10], [11] y otros minerales incluyendo zeolita [12], [13]; sin embargo, a pesar de que algunos autores han recopilado información sobre la adsorción de zinc [14] y níquel [12], no se han hecho revisiones sobre el cadmio, cobre y plomo. Por esta razón el objetivo de este trabajo es analizar los parámetros más importantes que influyen en el proceso de adsorción de cadmio, cobre y plomo empleando bentonita, caolín y zeolita; asimismo, se resumirán los principales hallazgos en cuanto al equilibrio y cinética de adsorción.

Para la presente revisión se han tomado en cuenta artículos científicos que hayan usado bentonita, caolín y zeolita para la adsorción de cadmio, cobre o plomo. Se han considerado estudios a partir del 2010.

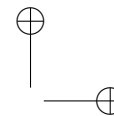
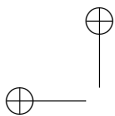
Tabla I. Fuentes, efectos adversos y valores referenciales del cadmio, cobre y plomo.

Metal	Fuentes de contaminación	Efectos adversos en personas	Valores de referencia de la OMS ^(a) (mg/L)	Referencias
Cadmio	Soldadura, fertilizantes, fungicidas, pesticidas, productos plásticos, colorantes, plantas nucleares, torres de platos para el lavado de gases, galvanoplastia, chapado de metales, baterías de níquel-cadmio, pinturas, entre otras.	Provocar cáncer, daño renal, destrucción de las membranas mucosas, vómitos, diarrea, daño óseo, enfermedad de itai-itai, afectan la producción de progesterona y testosterona.	0,003	[5], [15]–[17]
Cobre	Minería, metalurgia, fabricación de productos químicos, preservación de madera, pesticidas, entre otras.	Daño hepático y renal, irritación gastrointestinal, enfermedad de Wilson, insomnio, daño miocárdico, convulsiones, calambres, vómitos, aumento de la presión sanguínea y frecuencia respiratoria.	2	[15], [18], [19]
Plomo	Baterías, plomerías, pinturas, aceites, metales, fertilizantes fosfatados, producción de madera, entre otras.	Anemia, daño en los riñones, deterioro del sistema nervioso, daño a la capacidad de sintetizar proteínas.	0,01	[2], [5], [15]

(a) Valores referenciales sugeridos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) cuya presencia en el agua de consumo puede afectar la salud.

2. Clasificación de bentonita, caolín y zeolita

Las arcillas son uno de los materiales de mayor abundancia sobre la tierra y, debido a la capacidad catalítica de neutralizar elementos químicos contaminantes, han sido usados en la protección ambiental para la disposición y almacenamiento de químicos peligrosos. Como barrera para el almacenamiento de sustancias peligrosas, una de las características más importantes de las arcillas es la capacidad de adsorción [5].



Las arcillas pertenecen a la familia de los aluminosilicatos que se distinguen por tener estructuras en capas compuestas por láminas de polímeros tetraédricos de SiO_4 unidos a láminas octaédricas $(\text{Al, Mg, Fe})(\text{O,OH})_6$ [5]. Las zeolitas naturales son químicamente similares a las arcillas, sus moléculas se encuentran conectadas en una estructura enmarcada caracterizada por espacios entre los grupos moleculares, mientras que las arcillas se caracterizan por capas tetraédricas y octaédricas apiladas de determinadas maneras, lo que origina capas ligeramente conectadas [5].

La clasificación de Grim coloca a las caolinitas en el grupo de dos capas (1:1, una capa de tetraedros de sílice y otra capa de octaedros de alúmina), mientras que a las bentonitas en el grupo de tres capas (2:1, dos capas de tetraedros de sílice y una capa central dioctaédrica o trioctaédrica). Las zeolitas pertenecen al grupo mineral de los tectosilicatos, poseen tres estructuras tridimensionales de silicato y alúmina unidas entre sí por átomos de oxígeno compartidos [12].

3. Mecanismos de adsorción

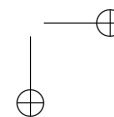
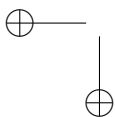
La adsorción es una operación de transferencia de masa muy usada en la práctica para remover sustancias de fluidos (gases o líquidos), de manera general se puede definir como el enriquecimiento de especies químicas de un fluido en la superficie de un líquido o sólido. Las ventajas de emplear arcillas y zeolitas como adsorbentes para la remoción de metales pesados son la elevada capacidad de adsorción e intercambio de iones, baja permeabilidad, capacidad de hinchamiento, estabilidad química y física y elevada área superficial [5].

La adsorción de metales pesados es un proceso complejo que refleja la tendencia de las arcillas de formar enlaces covalentes. El grado de remoción de metales no es solo una función de la capacidad de intercambio catiónico de las arcillas, la adsorción de iones implica varios procesos que incluyen la formación de complejos superficiales (los cuales pueden ser directos de esfera interna o indirectos de esfera externa), intercambio de iones y precipitación superficial. La formación de complejos superficiales, que es parte de la adsorción específica, ocurre en los bordes de la estructura laminar de las arcillas, implica la formación de enlaces directos entre los cationes metálicos, el OH superficial y átomos de oxígeno unidos de manera igual por enlaces iónicos y covalentes [20].

La adsorción de los aniones metálicos puede ocurrir en diferentes sitios de las partículas de arcillas, y el lugar puede variar según cada metal [20]. En [20] emplearon modelos de adsorción y desorción para cobre y cadmio en montmorillonitas y encontraron que estos metales eran adsorbidos en los bordes y entre las capas, los autores explican que para cada ión metálico el sitio de preferencia de adsorción puede depender, en diferentes maneras y alcances, de factores como fuerza iónica, el pH y los aniones presentes en la solución.

4. Modificaciones químicas y físicas de arcillas y zeolitas

La naturaleza química y la estructura de porosa de las arcillas y zeolitas influyen en la capacidad de adsorción; sin embargo, con el fin de aumentar esta capacidad, se realizan modificaciones físicas y químicas. La modificación utilizando agentes químicos normalmente se realiza por un método de



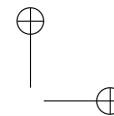
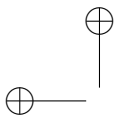
impregnación simple [5]. En las investigaciones revisadas se han usado ácidos inorgánicos como el ácido clorhídrico (HCl) o el ácido sulfúrico (H_2SO_4), como base el dióxido de manganeso (MnO_2) y, en el caso de sales, la sal de amoníaco (NH_4Cl) y el cloruro de magnesio ($MgCl_2$).

El objetivo principal de la activación con ácido es obtener un material parcialmente disuelto con una mayor área superficial específica, porosidad y acidez superficial [20]. El lavado con ácido produce la desagregación de las partículas de arcilla, eliminación de impurezas y la disolución de las capas externas [5]; el producto final de este proceso es un silicato hidratado amorfo y poroso con una estructura tridimensional reticulada [20].

En los artículos revisados se ha comprobado que la modificación de la arcilla aumenta la efectividad de remoción de metales pesados, lo que se explica principalmente por un aumento en el área superficial y el volumen de poros. En [21], luego de tratar bentonita con HCl, reportaron un incremento del 57 % de superficie específica y una reducción del diámetro promedio del poro en la bentonita ácida; por otro lado, en [2] modificaron la bentonita natural con H_2SO_4 , obtuvieron aumentos en la superficie específica y volumen de poros de 3.3 y 2.75 veces respectivamente. El tratamiento con ácido promovió la formación de poros pequeños, lo que incrementó la superficie específica. En [22] trataron caolín con HCl, el análisis realizado comprobó el aumento en número y tamaño de los poros, los valores de área superficial se incrementaron de $15.2 \text{ m}^2/\text{g}$ a $21.4 \text{ m}^2/\text{g}$ para el caolín sin tratamiento y tratado respectivamente. En [6] trataron zeolita con HCl y NaOH, obtuvieron una mayor eficiencia de remoción de plomo con el primer tratamiento, el análisis de superficie específica presentó valores de 68.84, 94.52 y $71.62 \text{ m}^2/\text{g}$ para la zeolita natural tratada con base y ácido respectivamente; por otro lado, la capacidad de intercambio catiónico de la zeolita natural, tratada con NaOH y HCl se midió en 89, 136 y 148 meq/100 g respectivamente. El tratamiento con ácido de las zeolitas remueve las impurezas que bloquean los poros, eliminando progresivamente cationes y removiendo átomos de aluminio conforme la intensidad y duración del tratamiento incrementa [23].

En comparación con el tratamiento con ácido, la impregnación de arcillas con sales y bases es menos usada [5]. Sari y Tüzen [24] estudiaron la adsorción de cadmio con caolín natural y caolín modificado con óxido de manganeso, el análisis BET mostró que el área de superficie específica aumentó en 68 % en el caolín modificado. Los autores explican que las fotografías de barrido electrónico del caolín modificado muestran una superficie uniforme debido a que las partículas de dióxido de manganeso ocuparon los espacios y vacíos formados en la superficie durante el tratamiento.

En [25] trabajaron con zeolita modificada con óxido de magnesio y obtuvieron valores de remoción para cadmio, cobre y plomo 1.5 veces mayores en comparación con las zeolitas tratadas con sodio y potasio; al igual que en los casos anteriores la superficie específica aumentó, en este caso, de 27.21 a $62.97 \text{ m}^2/\text{g}$. La capacidad de adsorción de cadmio, cobre y plomo de la zeolita natural estuvo entre 2.3 y 2.8 mg/g y 3.6 y 4.5 mg/g en la zeolita tratada con calcio y magnesio. Las capacidades de adsorción de las zeolitas modificadas con sodio y potasio fueron similares, los valores más altos se obtuvieron con el tratamiento de magnesio y fueron de, 4.0 , 4.5 , y 4.3 mg/g para cadmio, cobre y plomo respectivamente.



No en todos los casos un tratamiento físico a la arcilla mejora su eficiencia de adsorción. En [26] impregnaron bentonita con cloruro de amonio y luego la calentaron en un horno a 200 °C durante una hora, en este estudio se aplicaron diferentes rangos de temperatura con valores entre 100 y 200 °C, se produjeron protones suficientes para disolver los elementos minerales de la estructura de la arcilla, lo cual dio lugar a una mayor porosidad y una mejor capacidad de adsorción. Con temperaturas mayores a 200 °C, la descomposición cinética del cloruro de amonio se aceleró incrementando la acidez y destruyendo los sitios de adsorción y, por ende, la capacidad de remoción de la bentonita. En [27] tuvieron resultados similares cuando compararon la adsorción de bentonita natural contra bentonita calcinada; la bentonita natural fue remojada, tamizada, deshidratada, secada y molida, mientras que la bentonita calcinada se preparó mediante una pirolisis a 650 °C durante tres horas. La bentonita natural mostró una mayor capacidad de intercambio catiónico y adsorción que la bentonita calcinada, tanto en solución multimetal como monometal (0.47 y 0.08 mg/g y 1.82 y 0.50 mg/g); al caracterizar ambos adsorbentes la bentonita natural tenía una mayor capacidad de intercambio catiónico y área de superficie específica. Esta reducción en la superficie de la bentonita calcinada se explicaría por un probable colapso de los poros, mientras que la menor capacidad de intercambio catiónico puede deberse a la liberación de óxidos metálicos de la bentonita a elevadas temperaturas [8].

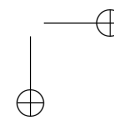
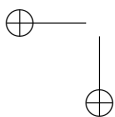
5. Parámetros de adsorción

El proceso de adsorción de metales pesados está influenciado por varios factores como el pH, temperatura, presencia de otros elementos, concentraciones iniciales de adsorbente y adsorbato [5]. En las siguientes secciones se desarrollarán estos factores.

5.1. Concentración inicial de metales

En los estudios revisados la concentración de metales pesados en la solución muestra una relación inversa con la eficiencia de remoción. En [6] estudiaron la capacidad de adsorción de Pb (II) usando zeolitas tratadas a un pH 6, dosis de adsorbente de 2 g/L y una variación de la concentración inicial de Pb (II) de 10 a 150 mg/L; la cantidad de Pb (II) adsorbida aumentó conforme la concentración de Pb (II) se incrementó de 10 a 50 mg/L, sin embargo, la eficiencia de remoción del Pb (II) se redujo conforme la concentración de este metal varió de 50 a 150 mg/L. Por otro lado, en [2] observaron un comportamiento similar al estudiar la adsorción de Cu (II) y Pb (II) en bentonita. En [25] analizaron la adsorción de Cd (II), Cu (II) y Pb (II) en zeolita modificada con magnesio, con una dosis de 40 mg/L de adsorbente a una concentración de 5 mg/L, tuvieron eficiencias del 100 % de remoción para los tres metales; sin embargo, al aumentar la concentración a 10 mg/L y 50 mg/L las eficiencias de remoción estuvieron entre 91-98 % y 8-15 % respectivamente.

Los resultados anteriores se explican debido a que a bajas concentraciones de adsorbato hay una mayor cantidad relativa de sitios activos disponibles en la superficie del adsorbente para un menor número de iones de adsorbato, a medida que la concentración de adsorbato aumenta para una misma dosis de adsorbente, el número relativo de sitios activos se reduce, lo que ocasiona una disminución en el porcentaje de remoción de iones metálicos en solución [28].



5.2. pH de la solución

El pH de la solución es uno de los parámetros más importantes en la remoción de metales dado que afecta la carga superficial del adsorbato y adsorbente [29], además de la especiación de los metales en solución [2]. Los iones metálicos tienden a formar complejos con compuestos inorgánicos, el tipo de complejo que se forme dependerá principalmente del valor del pH [30]. Generalmente, pH elevados favorecen la adsorción mediante la formación de cationes hidroxilados. Un pH alto también puede originar que las arcillas presenten una mayor especificidad por metales alcalinos debido a la tendencia de los iones metálicos a hidrolizarse [20].

Cuando la solución se encuentra a un pH bajo el número de iones hidrógeno, supera en gran cantidad a los iones metálicos, la superficie del adsorbente se cubre de iones hidrógeno y se reduce el número de sitios activos disponibles, esto explica la poca adsorción [31]. Más aún, en la bentonita los grupos silanol y aluminol (grupos hidroxilos enlazados con las capas tetraédricas de silicio y octaédricas de aluminio respectivamente) de la superficie tienen más protones y, por tanto, menor capacidad para retener iones metálicos [32]. La zeolita, por su parte, presenta gran cantidad de grupos silanol [33], lo que también contribuye en la cantidad de protones en la superficie. Otro factor en la poca adsorción de iones metálicos a pH bajos, aunque de menor influencia, es el aumento de la densidad de la carga positiva en la superficie del adsorbente por el enlace de los grupos silanol con el hidrógeno, lo que genera repulsión con los iones metálicos cargados positivamente [34].

Conforme aumenta el pH de la solución se reduce la concentración de iones hidrógeno, lo que permite una mejor atracción entre los cationes metálicos (con carga positiva) y la superficie del adsorbente (con carga negativa) [35], donde estos son adsorbidos en la superficie del adsorbente mediante intercambio catiónico o atracción electrostática [36], [37]; sin embargo, a pH muy altos la adsorción de los metales podría estar enmascarada por la precipitación de estos.

En ensayos de adsorción de Cu (II) y Pb (II) en bentonita natural y activada [1], [2], [32], [35] se ha observado que con una variación de pH entre 2 y 4 la adsorción incrementó bruscamente. En la mayor parte de casos estudiados más allá de un pH 6 no se observaron incrementos en la adsorción del Pb (II) [6], [22]; en el caso del Cd (II) se han encontrado valores máximos de adsorción usando bentonita natural con pH cercanos a 6 [1], [35]. En [24] evaluaron también la adsorción Cd (II) en caolín activado, hallando valores máximos de adsorción con pH entre 5 y 7, similares resultados obtuvieron en [38] con zeolita natural.

Las arcillas y zeolitas adsorben iones metálicos mediante dos mecanismos principales, a pH bajos el proceso que domina es el intercambio catiónico entre las capas como resultado de las interacciones entre iones y la carga negativa constante, mientras que a pH altos la remoción de metales ocurre junto con la liberación de iones hidrógeno y, al parecer, es mucho más específica que la adsorción a pH bajos por la formación de complejos en las partículas de arcilla [32]. Sin embargo, en un medio muy alcalino el adsorbente es más susceptible a una hidrólisis, lo que puede inhibir la adsorción. A un pH bajo (entre 3 y 5) el grupo silanol se carga negativamente, lo que facilita la adsorción de cationes metálicos [25]. En suma, el mecanismo de adsorción dependerá en gran parte del pH del medio y tipo de adsorbato y adsorbente, por esta razón es importante hallar el rango de pH óptimo según sea el caso.

5.3. Concentración del adsorbente

La tendencia en los estudios revisados es que a mayor cantidad de adsorbente aumenta el porcentaje de metal removido, lo anterior debido al incremento en la cantidad de sitios activos del adsorbente; sin embargo, la capacidad de adsorción por cantidad de adsorbente (mg/g) se reducirá al aumentar la dosis de arcilla o zeolita [2]. Cuando hay una mayor cantidad de concentración de adsorbente, la concentración inicial de metales no alcanza para cubrir todos los sitios de intercambio disponibles en el adsorbente, lo que reduce la capacidad de adsorción [24]; además, una mayor cantidad de adsorbente aumenta la probabilidad de colisión entre las partículas, lo que puede ocasionar una agregación de partículas que reduzca el área superficial y contribuya a una menor capacidad de adsorción de los metales pesados en el adsorbente [39]. La interferencia entre los sitios de intercambio por una mayor concentración de adsorbente también puede reducir la capacidad de adsorción [40].

Otros autores han explicado este comportamiento debido al aumento del pH originado por una mayor cantidad de adsorbente. En [22] usaron como adsorbente caolín activado con ácido (HCl) una concentración inicial de plomo de 100 mg/L y un rango de adsorbente de 0.05 – 0.5 g/L, la disminución de la capacidad de adsorción al aumentar la dosis de caolín se atribuyó a la naturaleza ácida de la superficie del caolín que al adsorber el Pb (II) reduce el pH inicial (al intercambiar iones hidrógenos por cationes de plomo). Con una dosis de 0.05 g/L el pH disminuyó de 4.78 a 4.54 luego de 1440 minutos; con dosis más altas de 0.2 g/L el pH disminuyó aún más, hasta 4.27. Al aumentar la dosis de adsorbente se disminuye aún más el pH lo que hace que los iones metálicos penetren con mayor facilidad en los sitios de adsorción ácidos, reduciendo la remoción de metal por parte del adsorbente [41]. Shaban y Abukhadra [38], usando zeolita natural para la adsorción de Cd (II) a una concentración inicial de 100 mg/L, explicaron igualmente que una mayor cantidad de zeolita en la solución reduce el pH, lo que ocasionará la adición de protones en la superficie de la zeolita disminuyendo la capacidad de adsorción de cationes metálicos.

5.4. Temperatura y termodinámica

La temperatura tiene relación directa con la energía cinética de los iones metálicos en solución. Un aumento en la temperatura eleva la tasa de difusión del sorbato, las variaciones de temperatura afectarán el equilibrio de la capacidad de adsorción del adsorbente por un sorbato en particular [42]; generalmente a temperaturas elevadas la remoción de metales aumenta debido a una mayor afinidad del mineral por el metal o un aumento en los sitios activos del adsorbente [43].

El aumento en la temperatura ocasiona cambios en el equilibrio y la cinética, esto se atribuye a tres razones: (a) el aumento en la energía cinética que facilita que los iones metálicos accedan a los sitios activos de adsorción, (b) el aumento en la actividad superficial del adsorbente que promueve e incrementa la afinidad en los sitios activos de adsorción, (c) la disminución de la resistencia de transferencia de masa [12]. Con el aumento de la temperatura se reduce en el grosor de la capa que rodea al adsorbente, lo que al mismo tiempo reduce la resistencia de la transferencia de masa del adsorbato en esta capa, facilitando la difusión del metal en el adsorbente. Conforme la temperatura aumenta, las interacciones electrostáticas se debilitan y los iones reducen su tamaño debido a una menor solvatación [44]; sin embargo, temperaturas muy elevadas pueden dar lugar a daños físicos

en el adsorbente, y reducir su capacidad de adsorción [45]. En algunos de los estudios revisados (Tabla II) la temperatura menor presentó la mayor capacidad de adsorción [24], [34], [46], [47].

La termodinámica de adsorción relaciona el equilibrio de adsorción con aquellas propiedades que no pueden medirse directamente en un experimento: la energía de activación, el cambio en la energía de Gibbs estándar (ΔG°), el cambio en la entalpía estándar (ΔH°) y el cambio en la entropía estándar (ΔS°). Uno de los criterios más importantes en la adsorción es el cambio en la energía Gibbs estándar que indica la espontaneidad del proceso. Esta variable se relaciona con la constante de equilibrio de adsorción usando la siguiente ecuación [5]:

$$\Delta G^\circ = RT \ln K_D \quad (1)$$

Donde K_D es el coeficiente de distribución de adsorción lineal, definido como la razón entre la concentración en equilibrio del soluto adsorbido en la superficie y la concentración en equilibrio del soluto en la fase líquida. El valor de K_D se obtiene graficando $\ln(q_e/C_E)$ contra C_E . q_e , es la cantidad de soluto adsorbido en la superficie del adsorbente en condición de equilibrio y C_E un parámetro de concentración en equilibrio del soluto en solución. El cambio de la entropía estándar se obtiene de la siguiente ecuación [5]:

$$\ln K_D = \Delta S^\circ / R - \Delta H^\circ / RT \quad (2)$$

Donde R es la constante de gas, $R = 8,3149 \times 10^{-3} \text{kJ/mol/K}$ y T la temperatura absoluta.

En la Tabla II se resumen los valores de los parámetros termodinámicos de adsorción de diversos estudios que usaron como adsorbente bentonita, caolín y zeolita, y como adsorbatos cadmio, cobre y plomo. El valor negativo de ΔG° indica la viabilidad y espontaneidad del proceso, mientras que un valor negativo de energía de Gibbs indica lo contrario. De la tabla II se puede observar que la mayoría de los sistemas presentan valores negativos, indicando que la adsorción de cadmio, cobre y plomo en bentonita, caolín y zeolita es factible y espontánea por naturaleza.

El valor positivo de ΔH° es un indicador de que el proceso de adsorción es endotérmico y de un fuerte enlace entre el soluto y el adsorbente. Un valor negativo de ΔH° indica que la adsorción es exotérmica, y el enlace entre el soluto y el adsorbente se da principalmente por fuerzas físicas o de Van der Waals. El valor de ΔH° o puede dar idea del tipo de adsorción, entre 5-40 kJ/mol es una adsorción física y entre 40-800 kJ/mol una adsorción química [48]. En la mayoría de casos revisados (Tabla II) el valor positivo indica un proceso endotérmico y valores que revelan una predominancia de la adsorción física.

El valor de ΔS° indica la aleatoriedad del sistema. Un valor positivo de ΔS° o refleja una alta afinidad del soluto en los sitios de adsorción, así como un aumento en la aleatoriedad de la interface sólido-solución durante la adsorción; este es el caso de la mayoría de estudios revisados (Tabla II). Generalmente el valor de ΔS° o en el sistema aumenta luego de un proceso de modificación. Un valor negativo de ΔS° o indica una menor aleatoriedad en el sistema de adsorción [5]; antes de que ocurra la adsorción, los iones metálicos cercanos a la superficie del adsorbente estarán más ordenados que en un estado adsorbido. La relación entre los iones metálicos libres interactuando con el adsorbente será mayor que en un estado adsorbido, como resultado, la distribución de la energía

rotacional y traslacional entre un pequeño número de moléculas aumentará conforme aumente la adsorción, lo que aumentará la aleatoriedad en la interface sólido-solución durante el proceso de adsorción [49].

Tabla II. Parámetros termodinámicos de adsorción de cadmio, cobre y plomo usando bentonita, caolín y zeolita.

Adsorbente	Metal	Rango de temperatura estudiado [K]	Temperatura de adsorción máxima [K]	Parámetros termodinámicos ^(a)	Referencias
Bentonita activada	Cu (II)	298.15 - 318.15	318.15	ΔG° : -13.74 ΔH° : 10.17 ΔS° : 77.63	[26]
Zeolita natural	Cu (II)	298 - 333	298	ΔG° : 71.97 ΔH° : 11.48 ΔS° : - 203	[46]
Caolín activado	Cd (II)	293.15 - 323.15	293.15	ΔG° : -21.39 ΔH° : -68.5 ΔS° : 161.36	[24]
Bentonita natural	Cd (II)	293 - 333	333	ΔG° : -15.76 ΔH° : -69.45	[50]
Zeolita activada	Cd (II)	293.15 - 333.15	333.15	ΔH° : 11.47 ΔS° : 0.22	[51]
Bentonita natural	Cd (II)	303.15 - 338.15	338.15	ΔG° : 5745 ΔH° : 14155 ΔS° : 24.4	[52]
Caolín activado	Pb (II)	298.15 - 333.15	333.15	ΔG° : -12.5 ΔH° : 15.2 ΔS° : 39.9	[22]
Zeolita natural	Pb (II)	293.15 - 313.15	293.15	ΔG° : 3.99 ΔH° : - 6.70 ΔS° : - 55.7	[34]
Caolín natural	Pb (II)	298 - 323	298	ΔG° : -4.71 ΔH° : -11.69 ΔS° : - 0.02	[47]
Bentonita activada	Pb (II)	298 - 318	318	ΔG° : -36.11 ΔH° : 40.12 ΔS° : 0.24	[49]
Bentonita natural	Pb (II)	303.15 - 338.15	338.15	ΔG° : -5672 ΔH° : 54083 ΔS° : 177	[52]

(a) El valor de ΔG o está dado para la temperatura de adsorción máxima.

5.5. Adsorción competitiva

En sistemas multicomponentes la capacidad de adsorción usualmente será menor que en un sistema de un componente, es decir, los cationes metálicos tienen un efecto antagonista en la adsorción. En [53] estudiaron la adsorción competitiva usando 1 g/L de bentonita, una concentración de 5 a

250 mg/L de Ni (II) y Cu (II) y de 5 a 150 mg/L de Pb (II), todo a un pH 5 y tiempo de contacto de 120 minutos. La interacción entre los metales se evaluó relacionando la capacidad de adsorción del metal en estudio con y sin la existencia de otros iones metálicos. Para analizar el efecto sinérgico o antagonista de los metales dividieron la capacidad máxima de adsorción en solución multimetal y la capacidad máxima de adsorción en solución monometal (q_i^{max}/q_i^o); cuando este valor fuera mayor a uno el efecto sería sinérgico, igual a uno sin efecto y menor a uno un efecto antagonista. Los valores de esta razón para los cuatro metales estudiados fueron menor a uno (entre 0.229 y 0.290) lo que demuestra el efecto antagonista en los cuatro sistemas estudiados, es decir, los iones metálicos compiten por los sitios de adsorción de la bentonita entre ellos, y la adsorción se inhibe en presencia de otros iones. Se calculó también el porcentaje de reducción de adsorción en la solución multimetal respecto a la solución monometal. Las reducciones fueron de 75.39, 72.02, 71.01 y 77.06 % para Cd (II), Cu (II), Ni (II) y Pb (II) respectivamente. Al relacionar q_i^{max}/q_i^o con la concentración inicial de metales se observa una relación inversa, a medida que aumenta la concentración de metales la razón disminuye, es decir, a mayor presencia de metales en solución el efecto antagonista es cada vez mayor, incluso para el Pb (II) a concentraciones muy bajas (5 mg/L) el efecto era sinérgico (una razón positiva). Los autores explican que este comportamiento se debe a que a bajas concentraciones los metales son adsorbidos en sitios específicos, conforme aumenta la concentración de metales, la superficie del adsorbente pierde su habilidad de atrapar metales pesados por el traslape de sitios de adsorción, reduciendo la especificidad por un metal en particular. Esto, en suma, reduce la adsorción.

En [27] estudiaron la adsorción de Pb (II), Cd (II) y Mn (II) en bentonita natural. En el ensayo emplearon 50 mg de arcilla seca junto con 50 mL de solución metálica a diferentes concentraciones, la mezcla se agitó a 100 rpm por 72 h; igualmente en solución multimetal la capacidad de adsorción fue menor que en solución monometal. La adsorción de Pb (II) en solución multimetal disminuyó de 0.046 a 0.036 mmol/g. La acumulación total de metales en la superficie de la bentonita en solución multimetal fue de 9.85 mg/g, lo que representa un aumento de 5.38 % respecto a la adsorción de Pb (II) en sistema monometal (9.32 mg/g). Lo anterior significa que la adsorción de Pb (II), en comparación con el Cd (II) y el Mn (II), está muy poco afectada por la presencia de cationes competitivos, estos resultados le permiten afirmar a los autores que la adsorción de Pb (II) en bentonita es selectiva en cuanto al sitio de adsorción. El hecho de que en la solución multimetal no se observe la dominancia de un metal en específico por los sitios activos, señalan los autores, indica que el adsorbente presenta sitios de adsorción específicos para cada catión metálico. Los autores concluyen que a pesar de la competencia que existe con otros cationes, cada metal es capaz de colocarse en su sitio de adsorción específico, aun a pesar del aumento en la concentración de metales.

Otro estudio sobre adsorción competitiva lo realizaron Zendelska y Golomeova [54] utilizando zeolita natural y una solución multimetal de Cu (II), Mn (II), Pb (II) y Zn (II) a una concentración inicial de 25 mg/L, un pH inicial de 3.5 y una dosis de adsorbente de 5 g en 400 mL, la solución se centrifugó a 400 rpm durante 360 minutos. La cantidad de adsorción en el caso del Cu (II) se redujo en 10 % en la solución multimetal respecto a la solución monometal; en el caso del Zn (II) y el Mn (II), las disminuciones fueron de 25 a 50 %; para el Pb (II), la diferencia de adsorción entre la solución multimetal y monometal fue mínima, asimismo, la cantidad total de metales adsorbidos por unidad de masa en la solución multimetal fue mayor que en la solución monometal. Según los

autores la diferencia en la capacidad de adsorción de los iones metálicos puede deberse a factores como el radio de hidratación, la entalpía de hidratación y la solubilidad de los cationes. El radio de hidratación de los cationes es: $r_H Zn(II) = 4,30\text{\AA}$, $r_H Cu(II) = 4,19\text{\AA}$, $r_H Pb(II) = 4,01\text{\AA}$ y $r_H Mn(II) = 4,38\text{\AA}$. Idealmente los cationes más pequeños deberían adsorberse más rápido y en mayor cantidad que los cationes más grandes, debido a que los cationes más pequeños pueden pasar con mayor facilidad a través de los microporos y capas de la estructura de la zeolita. Los autores indican que la adsorción debería describirse según la entalpía de hidratación; que es la energía que permite que las moléculas de agua se desprendan de los cationes y, por ende, refleja la facilidad con que los cationes interactúan con el adsorbente. Debido a la gran cantidad de silicios respecto al aluminio en la zeolita, esta tiene una densidad de carga estructural baja, por esta razón, los cationes metálicos con una hidratación de energía baja van a ser adsorbidos en mayor cantidad que aquellos de energía alta. La energía de hidratación de los cationes es: -2010, -1955, -1760 y -1481 kJ/mol para Cu(II), Zn(II), Mn(II) y Pb(II) respectivamente. Según los valores de energía de hidratación y radio de hidratación la zeolita preferirá al Pb antes que al Cu, Mn o Zn en una solución multimetal; por esta razón se espera que concentraciones elevadas de Pb limiten la remoción de Cu, Mn y Zn. Este análisis hecho por Zendelska y Golomeova [54] concuerda con los estudios revisados (Tabla III) donde el plomo usualmente es el primero en orden de selectividad ya sea en soluciones multi o mono metal.

Tabla III. Selectividad de iones metálicos con diferentes tipos de adsorbente.

Adsorbente	Selectividad	Referencias
Bentonita natural	Cu (II) > Ni (II) > Pb (II) > Cd(II) ^{(a)(b)}	[1]
Bentonita natural	Pb (II) > Cd (II) > Mn (II) ^{(a)(b)}	[27]
Bentonita natural	Pb (II) > Cd (II) > Hg (II) ^(b)	[35]
Bentonita natural	Pb (II) > Cu (II) > Ni (II) > Cd(II) ^(a)	[53]
Bentonita natural	Pb (II) > Cd (II) > Ni (II) > Cu(II) ^{(a)(b)}	[55]
Bentonita natural	Pb (II) > Cd (II) > Mn (II) ^(a)	[56]
Zeolita natural	Pb (II) > Cu (II) > Mn (II) > Zn(II) ^(a)	[54]
	Pb (II) > Cu (II) > Zn (II) > Mn(II) ^(b)	

(a) En solución multi-metal y (b) mono-metal.

6. Eficiencias de remoción

Como se ha visto, la capacidad de adsorción depende de los parámetros de operación. En la Tabla IV se resumen las eficiencias de remoción de cadmio, cobre y plomo empleando bentonita, caolín y zeolita en diferentes condiciones.

7. Isotermas

La isoterma de adsorción es la ecuación o curva que, en condición de equilibrio, relaciona la concentración de metal adsorbida en la fase sólida con la concentración de metal en solución para una temperatura específica [12], lo anterior se conoce como el equilibrio de adsorción y es uno de los aspectos más importantes a analizar en la adsorción [5], pues permite predecir la eficiencia del

Tabla IV. Eficiencias de remoción de bentonita, caolín y zeolita.

Metal	Solución	Tipo de operación	Concentración inicial de metales (mg/L)	Adsorbente con Tratamiento	pH	Concentración de adsorbente (g/L)	Capacidad máxima de adsorción (mg/g)	Referencias	
Cu(II)	Cu(II)	En lote	50	Bentonita	NH ₄ Cl, 200 °C por 1 h	6	4	114.39	[26]
Cu(II)	Cd(II), Cu(II) y Pb(II)	En lote	100-5000	Bentonita	HCl	-	20	36.68	[21]
Cu(II)	Cu(II) y Pb(II)	En lote	50-500	Bentonita	105 °C por 2-3 h	2-7	5	11.34	[32]
Cu(II)	Cu(II)	En lote	100	Bentonita	-	2-4	5	32.26	[1]
Cu(II)	Cu(II)	En lote	5000	Zeolita	-	5	10	24	[57]
Cu(II)	Cd(II), Cu(II) y Pb(II)	En lote	5	Zeolita	MgCl ₂	>5	0.04	15.21	[25]
Cu(II)	Cu(II) y Pb(II)	Columna de lecho fijo	25	Bentonita	H ₂ SO ₄	5	-	9.79	[2]
Cd(II)	Cd(II), Hg(II) y Pb(II)	En lote	100	Bentonita	-	2-6.5	2	19.45	[35]
Cd(II)	Cd(II), Cu(II) y Pb(II)	En lote	100-5000	Bentonita	HCl	-	20	57.88	[21]
Cd(II)	Cd(II)	En lote	100	Bentonita	-	3-5	5	31.25	[1]
Cd(II)	Agua Residual	En lote	10-400	Caolín	MnO ₂	5	4	36.47	[24]
Cd(II)	Cd(II), Cu(II) y Pb(II)	En lote	5	Zeolita	MgCl ₂	>7	0.04	36.88	[25]
Cd(II)	Cd(II), Mn(II) y Pb(II)	Columna de lecho fijo continua	10	Bentonita	-	4.9-5.3	1 (a)	1.71	[56]
Cd(II)	Cd(II)	En lote	25	Zeolita	-	7	10	26.59	[38]
Cd(II)	Cd(II)	En lote	50	Bentonita	-	5.5	1	4.08	[27]
Cd(II)	Cd(II), Zn(II) y Pb(II)	En lote	60	Caolín	-	6	10	-	[58]
Cd(II)	Cd(II), Mn(II) y Pb(II)	En lote	50	Bentonita	-	5.1	1	1.24	[59]
Pb(II)	Cd(II), Hg(II) y Pb(II)	En lote	100	Bentonita	-	2-6	2	19.45	[35]
Pb(II)	Pb(II)	En lote	50	Zeolita	HCl	6	2	132	[6]
Pb(II)	Pb(II)	Columna de adsorción de lecho fijo	1000	Zeolita-Bentonita-Caolín	Anillos Raschig calcinados	-	-	140.9	[60]
Pb(II)	Cd(II), Cu(II) y Pb(II)	En lote	100-5000	Bentonita	HCl	-	20	92.85	[21]
Pb(II)	Cu(II) y Pb(II)	En lote	50-500	Bentonita	105 °C por 2-3 h	2-4	5	36.28	[32]

Metal	Solución	Tipo de operación	Concentración inicial de metales (mg/L)	Adsorbente con Tratamiento	pH	Concentración de adsorbente (g/L)	Capacidad máxima de adsorción (mg/g)	Referencias	
Pb(II)	Pb (II)	En lote	2500	Bentonita	H ₂ SO ₄	6	10	24.4	[49]
Pb(II)	Pb(II)	En lote	100	Bentonita	Calentamiento hasta 1000 °C en una atmósfera de N ₂	2-4	1-10	85.47	[40]
Pb(II)	Pb(II)	En lote	100	Bentonita	-	2-4	5	85.47	[1]
Pb(II)	Li(I) y Pb(II)	Columna de lecho fijo	200	Zeolita	-	6.7	20 (a)	34.7	[61]
Pb(II)	Pb(II)	En lote	300	Zeolita	-	3-6	20	24.4	[34]
Pb(II)	Cd(II), Cu(II) y Pb(II)	En lote	5	Zeolita	MgCl ₂	>5	0.04	58.46	[25]
Pb(II)	Pb(II)	En lote	100	Caolín	HCl	5.5	0.05-0.3	34.5	[22]
Pb(II)	Cu(II) y Pb(II)	Columna de lecho fijo	25	Bentonita	H ₂ SO ₄	5	-	21.36	[2]
Pb(II)	Cd(II), Mn(II) y Pb(II)	Columna de lecho fijo continuo	10	Bentonita	-	4.9-5.3	1 (b)	2.22	[56]
Pb(II)	Pb(II)	En lote	2750	Zeolita	100 °C por 24 h	-	30	136.99	[62]
Pb(II)	Pb(II)	En lote	50	Bentonita	-	4.5	1	9.32	[27]
Pb(II)	Cd(II), Zn(II) y Pb(II)	En lote	60	Caolín	-	6	10	-	[58]
Pb(II)	Cd(II), Mn(II) y Pb(II)	En lote	50	Bentonita	-	5.1	1	8.7	[59]

(a) El valor representa gramos a un flujo de 6.7 mL/min y (b) a un flujo de 1.4 mL/min.

proceso y optimizar el uso del adsorbente [12]. La cantidad de iones metálicos adsorbidos en el adsorbente dependerá de la concentración en equilibrio de los iones metálicos, pH de la solución en equilibrio, y temperatura [63]. Una descripción matemática precisa para describir la isoterma de adsorción permitirá diseñar sistemas de adsorción eficientes [64]. Los modelos de equilibrio pueden clasificarse en modelos empíricos y mecánicos; así, los modelos empíricos, a pesar de no poder representar los mecanismos de adsorción, se pueden usar para predecir resultados experimentales, estos modelos se basan en relaciones matemáticas simples entre la fase líquida en concentración de equilibrio y la fase sólida en concentración de equilibrio [12]. En la Tabla V se resumen los modelos de dos y tres parámetros usados para describir la adsorción de plomo, cadmio y cobre en bentonita, caolín y zeolita en los estudios revisados. Los supuestos de estos modelos han sido desarrollados ampliamente por otros autores [6], [65].

Tabla V. Modelos de equilibrio de adsorción.

Isoterma	Ecuación	Parámetros del modelo	Referencias
Langmuir	$q_e = q_{max}(K_L C_e / (1 + K_L C_e))$	K_L, q_{max}	[5]
Freundlich	$q_e = K_F C_e^{1/n}$	K_F, n	[5]
Langmuir - Freundlich	$q_e = q_{max} K_{LF} C_e^{1/n_{LF}} / (1 + K_{LF} C_e^{1/n_{LF}})$	K_{LF}, q_{max}, n_{LF}	[65]
Dubinin - Radushkevich	$q_e = q_{max} \exp(-(RT \ln(C_e/C_s) / \beta E_o)^2)$	β, q_{max}	[5]
Sips	$q_{max} ((K_S C_e)^{1/n_s} / (1 + (K_S C_e)^{1/n_s}))$	n_s, q_{max}, K_s	[5]
Temkin	$q_e = (RT/b_T) \ln(A_T C_e)$	b_T, A_T	[5]
Redlich - Peterson	$q_e = K_R C_e / (1 + \alpha_R C_e^{\beta_R})$	K_R, α_R, β_R	[12]

q_e : concentración en equilibrio de metal en la fase sólida (mg/g)

q_{max} : capacidad máxima de adsorción (mg/g)

C_e : concentración en equilibrio de metal en la fase líquida (mg/L)

R : constante de gas universal (J/molK)

T : temperatura absoluta (K)

C_s : solubilidad del soluto para una temperatura determinada

E_o : energía promedio de adsorción por mol de adsorbato (kJ/mol)

Para la mayoría de casos las isothermas de Langmuir y Freundlich son las que mejor se ajustan a los datos, este alto nivel de correlación podría significar que durante el proceso de adsorción se forman monocapas y multicapas en la superficie del adsorbente. La mayoría de estudios han usado modelos de dos parámetros dada la complejidad de usar los modelos de tres parámetros. La práctica común es analizar la adsorción según los modelos de Langmuir y Freundlich [1], [2], [22], [25], [32], [47], [49], [60], [62], incluso algunos solo usan el modelo de Langmuir [6], [21]. Algunos autores han empleado también, además de los dos modelos comúnmente usados, el de Dubinin–Radushkevich (D-R) [24], [26], [40], [57], [66], este modelo permite hallar la variación de energía del proceso, para esos estudios los valores estuvieron entre 8-16 kJ/mol, lo que indica la naturaleza química del proceso. En [35] analizaron la adsorción de metales pesados con los modelos de Langmuir, Freundlich, Temkin y D-R; las isothermas de mejor ajuste variaron según el metal. Shaban y Abukhadra [38] usaron los modelos de Langmuir, Freundlich y Temkin; finalmente, en [27] analizaron los modelos Langmuir, Freundlich, Redlich–Peterson y Temkin.

Es importante señalar que en la mayoría de estudios el equilibrio de adsorción se analiza con las formas lineales de los modelos de isothermas. Es probable que al usar las formas no lineales de estos modelos se obtengan resultados diferentes de capacidad máxima de adsorción [12]. Actualmente, no existen estudios comparativos que apliquen ambos modelos, lineales y no lineales, de isothermas de dos parámetros para la adsorción de cadmio, cobre y plomo en arcillas y zeolitas.

8. Cinética

Uno de los factores más importantes para el diseño de un sistema de adsorción es predecir la tasa a la cual ocurrirá la adsorción, el tiempo de residencia del adsorbato y las dimensiones del

reactor dependerán de la cinética del sistema de adsorción [12]. La cinética de adsorción se expresa como la velocidad de remoción de soluto que controla el tiempo de residencia del soluto en la interfase sólido-solución [5]. En los estudios de adsorción es importante identificar los mecanismos involucrados que pueden incluir difusión externa, difusión interna y reacciones químicas [12], para ellos existen modelos cinéticos que se basan en la superficie de reacción como el paso cinético que controla la tasa de adsorción. Estos modelos incluyen el cinético de pseudoprimer orden (también llamado el modelo Lagergren), el cinético de pseudosegundo orden, la ecuación de Elovich y de difusión intraparticular (Tabla VI).

Tabla VI. Modelos de cinética de adsorción.

Isoterma	Ecuación	Parámetros del modelo	Referencias
Pseudo-primer orden	$q_t = q_e(1 - \exp(-k_1t))$	q_e, k_1	5
Pseudo-segundo orden	$q_t = q_e^2 k_2 t / (1 + q_e k_2 t)$	q_e, k_2	5
Elovich	$q_t = (1/\beta) \ln(\alpha\beta) + (1/\beta) \ln t$	α, β	67
Difusión intraparticular	$q_t = k_i t^{1/2} + C$	k_i	68

q_t : concentración de metal en la fase sólida a un tiempo t (mg/g)

t : tiempo en minutos

C : intercepto

Como se aprecia en la Tabla VII las ecuaciones de pseudoprimer y pseudosegundo orden son las más usadas para correlacionar los datos de adsorción de cadmio, cobre y plomo en arcillas y zeolitas. En la mayoría de los casos el modelo de pseudo-segundo orden es el que mejor describe la adsorción, solo unos pocos estudios [6], [21], [64] reportan que el modelo de pseudoprimer orden se ajusta mejor a los datos.

Predecir la fase limitante de la velocidad de adsorción es un factor importante a ser considerado en el proceso. En la adsorción, la transferencia del soluto se caracteriza usualmente ya sea por una transferencia masa externa (difusión en la capa límite) o una difusión intraparticular o ambas [70]. Puede asumirse que en los mecanismos de remoción de metales pesados por adsorción ocurren los siguientes pasos [71]: (a) migración del adsorbato del soluto a la superficie del adsorbente, (b) difusión del adsorbato a través de la capa límite a la superficie del adsorbente, (c) adsorción del adsorbato en un sitio activo de la superficie del adsorbente, (d) difusión intraparticular del adsorbato hacia el interior de la estructura porosa del adsorbente. La fase más lenta será la que controle el proceso. La cuarta fase ocurre muy rápido y no influye en la velocidad de difusión, la primera fase es también muy rápida dado que los iones metálicos están disponibles en la capa límite; entonces, la velocidad de adsorción estará definida ya sea por la segunda o tercer fase, o también por ambas [72], de aquí la relevancia de aplicar el modelo de difusión intraparticular.

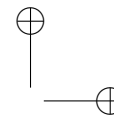
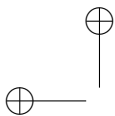
Al finalizar su estudio en [40] concluyeron que el modelo de difusión intraparticular no era un factor determinante en la cinética de adsorción del plomo en bentonita natural. Similares resultados obtuvieron [22] al estudiar la adsorción de plomo en caolín activado.

Tabla VII. Modelos de equilibrio de adsorción.

Metal	Adsorbente	Modelos de isotermas con mejor ajuste	Modelo cinético con mejor ajuste	Referencias
Pb (II)	Caolín natural	Langmuir	Pseudo-primer orden (c) , pseudo-segundo orden (c) y Difusión intraparticu- lar (d)	[66]
Cd(II)	Bentonita natural	Langmuir y Freundlich	Pseudo-segundo orden	[35]
Pb(II)	Bentonita natural	Freundlich	Pseudo-segundo orden	[35]
Pb (II)	Zeolita activada	Langmuir	Pseudo-primer orden	[6]
Pb (II)	Zeolita-Bentonita-Caolín	Langmuir	Pseudo-segundo orden	[60]
Pb (II)	Caolín natural	Langmuir y Freundlich	-	[65]
Cu(II)	Bentonita activada	Langmuir y Freundlich	Pseudo-segundo orden	[26]
Cu(II) y Pb(II)	Bentonita natural	Langmuir	Pseudo-segundo orden	[32]
Pb (II)	Bentonita natural y bentonita activada	Langmuir	Pseudo-segundo orden	[49]
Cd(II), Cu(II) y Pb(II)	Bentonita activada	Langmuir	Pseudo-primer orden	[21]
Cu (II)	Bentonita natural	Langmuir-Freundlich	-	[69]
Pb(II)	Bentonita natural	Freundlich	Pseudo-segundo orden	[40]
Cd(II), Cu(II) y Pb(II)	Bentonita natural	Langmuir	-	[1]
Cd(II)	Caolín activado	Langmuir	Pseudo-segundo orden	[24]
Cu (II)	Zeolita natural	Freundlich y Dubinin-Radushkevich (a) Langmuir y Dubinin-Radushkevich (b)	-	[57]
Cd(II), Cu(II) y Pb(II)	Zeolita activada	Langmuir	-	[25]
Pb(II)	Caolín activado	Langmuir y Freundlich	Pseudo-segundo orden	[22]
Cu(II) y Pb(II)	Bentonita activada	Langmuir y Freundlich	Pseudo-segundo orden	[2]
Pb(II)	Zeolita natural	-	Pseudo-segundo orden	[34]
Pb(II)	Zeolita natural	Freundlich	-	[62]
Cd(II)	Zeolita natural	Freundlich	Pseudo-segundo orden	[38]
Cd(II) y Pb(II)	Bentonita natural	Langmuir	-	[27]

(a) Cuando la concentración inicial de Cu (II) estuvo entre 500 y 1000 mg/L y (b) mayor a 1000 mg/L.

En [64] usaron caolín como adsorbente de Pb (II), para la mayor concentración inicial ensayada (80, 160 y 320 mg/L) el modelo de difusión intraparticu- lar se ajustó mejor a los datos. Esto demues- tra que, tal y como se postula en la ley de Fick, a mayor concentración habrá una mayor difusión. En [46], con el fin de estudiar la adsorción de Cu (II) en zeolita natural, emplearon tres modelos de difusión: intraparticu- lar, homogénea y parabólica. Los autores concluyen que durante los 60 primeros minutos la curva cinética se ajustó al modelo de difusión intraparticu- lar y al de difusión homogénea, esto ocurre, explican los autores, debido a que inicialmente (de 0 a 60 minutos) la difu- sión en la capa superficial de la partícula sucede de manera simultánea con la difusión a través de la capa límite; luego de los primeros 60 minutos ocurre la difusión a través de los poros del adsorbente hacia los sitios de intercambio. Por último, dado que el modelo de difusión parabólica mostró una linealidad en todos los ensayos, este se usó para calcular los parámetros termodinámicos. En [52] usaron el modelo de difusión intraparticu- lar para determinar si era un factor determinante en la cinética de adsorción del cadmio, manganeso y plomo en bentonita natural. Concluyeron que ese era el caso, sin embargo, se indicó que la capa límite podría representar también cierta restricción a la difusión de metales.



9. Conclusiones

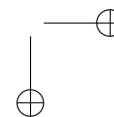
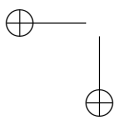
El uso de bentonita, caolín y zeolita es efectivo para la remoción de cadmio, cobre y plomo de soluciones acuosas. Las modificaciones químicas y físicas que se realizan en las arcillas y zeolitas aumentan la capacidad de adsorción y superficie específica de los materiales; sin embargo, se han reportado algunos casos en que la eficiencia de adsorción se reduce luego de un tratamiento del mineral. Se han elaborado numerosos estudios para evaluar el impacto de diversos parámetros de adsorción, el análisis realizado ha mostrado que los parámetros de operación más importantes son la concentración inicial de metales, el pH de la solución, la dosis de adsorbente y temperatura del sistema. La presencia de otros iones metálicos en la solución usualmente impacta de manera negativa la adsorción, sin embargo, en el caso del plomo no parece verse afectado por la presencia de otros iones metálicos. La influencia de diversos parámetros de operación se ve reflejado en la variabilidad de las capacidades de adsorción de cadmio, cobre y plomo como se resume en las tablas presentadas.

En relación con el equilibrio de adsorción en la mayoría de estudios revisados, la isoterma de Langmuir es la que mejor se ajusta a los datos y, en menor cantidad de trabajos, la isoterma de Freundlich. Algunos investigadores han usado otras isotermas como los modelos de D-R, Sips y Temkin para predecir el equilibrio de adsorción. Muchos estudios han modelado la cinética de adsorción con las ecuaciones de pseudoprimer orden y pseudosegundo orden, en la mayor parte de estudios el modelo de pseudosegundo orden es el que mejor se ajusta a los datos. El modelo de difusión intraparticular también ha sido usado para estudiar la adsorción.

La tendencia en estudios de adsorción se concentra en la elaboración de nanoadsorbentes, dado que estos presentan una mayor área superficial de adsorción y, por ende, un mayor rendimiento; sin embargo, una de las principales debilidades de estos compuestos es la dificultad en recuperarlos y la toxicidad que podrían representar en el agua tratada, por esta razón se considera pertinente el estudio de la adsorción de compuestos naturales haciendo énfasis en su uso en escalas piloto y real para promover así el empleo extendido en plantas de tratamiento de aguas residuales.

Referencias

- [1] A. Bourliva, K. Michailidis, C. Sikalidis, A. Filippidis and M. Betsiou, "Adsorption of Cd(II), Cu(II), Ni(II) and Pb(II) onto natural bentonite: study in mono- and multi-metal systems". *Environmental Earth Sciences*, vol. 73, no. 9, pp. 5435-5444, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3912-3> ↑ 253, 258, 263, 264, 265, 266, 268
- [2] R. Pawar, Lalhmunsiana, H. Bajaj and S. Lee, "Activated bentonite as a low-cost adsorbent for the removal of Cu(II) and Pb(II) from aqueous solutions: Batch and column studies". *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol.34, pp. 213-223, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.11.014> ↑ 253, 254, 256, 257, 258, 259, 264, 265, 266, 268
- [3] E. Worch, *Adsorption technology in water treatment*. Berlín: Walter de Gruyter, 2012. <https://doi.org/10.1515/9783110240238> ↑ 253
- [4] R. Bisht, M. Agrawal and K. Singh, "Heavy metal removal from wastewater using various adsorbents: a review". *Journal of Water Reuse and Desalination*, vol. 7, no. 1, pp. 387-419. 2017. ↑ 253
- [5] S. Ismadji, F. Soetaredjo and A. Ayucitra, *Clay Materials for Environmental Remediation*. Londres: Springer Cham, 2015 <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16712-1> ↑ 253, 254, 255, 256, 257, 260, 263, 266, 267



- [6] I. Ismael, A. Melegy and T. Kratochvíl, "Lead Removal from Aqueous Solution by Natural and Pretreated Zeolites". *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 30, no. 1, pp. 253-262, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9466-1> ↑253, 256, 257, 258, 264, 265, 266, 267, 268
- [7] L. Novikova and L. Belchinskaya, "Adsorption of industrial pollutants by natural and modified aluminosilicates". In *Clays, Clay Minerals and Ceramic Materials Based on Clay Minerals*. InTech, 2016. ↑254
- [8] R. Zhu, Q. Chen, Q. Zhou, Y. Xi, J. Zhu and H. He, "Adsorbents based on montmorillonite for contaminant removal from water: A review". *Applied Clay Science*, vol. 123, pp. 239-258, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.12.024> ↑254, 257
- [9] S. Pandey, "A comprehensive review on recent developments in bentonite-based materials used as adsorbents for wastewater treatment". *Journal of Molecular Liquids*, vol. 241, pp. 1091-1113, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.06.115> ↑254
- [10] G. Zhao, X. Wu, X. Tan and X. Wang, "Sorption of heavy metal ions from aqueous solutions: a review". *The Open Atmospheric Science Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 19-31, 2011. <https://doi.org/10.2174/1876530001104010019> ↑254
- [11] M. K. Uddin, "A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade". *Chemical Engineering Journal*, vol. 308, pp. 438-462, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.09.029> ↑254
- [12] S. Malamis and E. Katsou, "A review on zinc and nickel adsorption on natural and modified zeolite, bentonite and vermiculite: Examination of process parameters, kinetics and isotherms". *Journal of Hazardous Materials*, vol. 252-253, pp. 428-461, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.03.024> ↑254, 255, 259, 263, 265, 266, 267
- [13] S. S. Gupta and K. G. Bhattacharyya, "Adsorption of metal ions by clays and inorganic solids". *RSC Advances*, vol. 4, no. 54, pp. 28537- 28586, 2014. <https://doi.org/10.1039/C4RA03673E> ↑254
- [14] R. Ghibate, F. Sabry, O. Senhaji, R. Taouil and M. Touzani, "State of the art of technologies for Zn²⁺ ions removal from industrial effluents with adsorption: Examination of process parameters (Part I)". *International Journal for Innovative Research in Science and Technology*, vol. 2, pp. 39-48, 2017. ↑254
- [15] OMS. *Guías para la calidad del agua potable*. Ginebra: WHO Press, 2016. ↑254
- [16] F. A. A. Ihsanullah, K. B. Abusharkh, M. Khaled, M. A. Atieh, M. S. Nasser, T. Laoui, S. Agarwal, I. Tyagi and V. K. Gupta, "Adsorptive removal of cadmium(II) ions from liquid phase using acid modified carbon-based adsorbents". *Journal of Molecular Liquids*, vol. 204, pp. 255-263, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.01.033> ↑254
- [17] Ministerio de Salud, *Guía de Práctica Clínica para el Diagnóstico y Tratamiento de la Intoxicación por Cadmio*. Lima: Ministerio de Salud, 2015. ↑254
- [18] M. R. Awual, M. Ismael, T. Yaita, S. A. E. Safty, H. Shiwaku, Y. Okamoto and S. Suzuki, "Trace copper(II) ions detection and removal from water using novel ligand modified composite adsorbent". *Chemical Engineering Journal*, vol. 222, pp. 67-76, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.02.042> ↑254
- [19] C. Carolin, P. Kumar, A. Saravanan, G. Joshiba and M. Naushad, "Efficient techniques for the removal of toxic heavy metals from aquatic environment: A review". *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 2782-2799, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.05.029> ↑254
- [20] F. Bergaya, G. Lagaly, Ed., *Handbook of Clay Science*, Volume 5. Amsterdam: Elsevier, 2013. ↑255, 256, 258
- [21] S. Budsareechai, K. Kamwialisak and Y. Ngernyen, "Adsorption of lead, cadmium and copper on natural and acid activated bentonite clay". *Asia-Pacific Journal of Science and Technology*, vol. 17, no. 5, pp. 800-810, 2012. ↑256, 264, 266, 267, 268
- [22] S. Drweesh, N. Fathy, M. Wahba, A. Hanna, A. Akarish, E. Elzahany, I. El-Sherif and K. Abou-El-Sherbini, "Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies of Pb(II) adsorption from aqueous solutions on HCl-treated Egyptian kaolin". *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 1674-1684, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.02.005> ↑256, 258, 259, 261, 265, 266, 267, 268
- [23] G. Mihaila, H. C. Barbu, D. Lutic and M. I. Sava, "Adsorption of sulphur dioxide on clinoptilolite volcanic tuff". In *Natural Zeolites-Sofia '95*, G. Kirov, L. Filizova and O. Petrov, Ed., 1997 pp. 146-152. ↑256
- [24] A. Sari and M. Tüzen, "Cd (II) adsorption from aqueous solution by raw and modified kaolinite". *Applied Clay Science*, vol. 88, pp. 63-72, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.12.021> ↑256, 258, 259, 260, 261, 264, 266, 268
- [25] H. Choi, S. Yu and K. Kim, "Efficient use of Mg-modified zeolite in the treatment of aqueous solution contaminated with heavy metal toxic ions". *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 63, pp. 482-489,

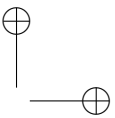
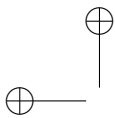
2016. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.03.005> ↑256, 257, 258, 264, 265, 266, 268
- [26] B. Abdelhamid, A. Ourari and M. S. Ouali, "Copper (II) ions removal from aqueous solution using bentonite treated with ammonium chloride". *American Journal of Physical Chemistry*, vol. 1, no. 1, pp. 1-10, 2012. <https://doi.org/10.11648/j.ajpc.20120101.11> ↑257, 261, 264, 266, 268
- [27] J. A. Alexander, M. Zaini, S. Abdulsalam, U. Aliyu El-Nafaty and U. O. Aroke, "Isotherm studies of lead (II), manganese (II), and cadmium (II) adsorption by Nigerian bentonite clay in single and multimetal solutions". *Journal Particulate Science and Technology*, pp. 1-11, 2018. ↑257, 262, 263, 264, 265, 266, 268
- [28] D. Tiwari, H. U. Kim and S. M Lee, "Removal behavior of sericite for Cu (II) and Pb (II) from aqueous solutions: batch and column studies". *Separation and Purification Technology*, vol. 57, no. 1, pp. 11-16, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.03.005> ↑257
- [29] K. G. Bhattacharyya and S. S. Gupta, "Adsorption of Co (II) from aqueous medium on natural and acid activated kaolinite and montmorillonite". *Separation Science and Technology*, vol. 42, no. 15, pp. 3391-3418, 2007. <https://doi.org/10.1080/01496390701515136> ↑258
- [30] K. S. Hui, C. Y. H. Chao and S. C. Kot, "Removal of mixed heavy metal ions in wastewater by zeolite 4A and residual products from recycled coal fly ash". *Journal of Hazardous Materials*, vol. 127, no. 1-3, pp. 89-101, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.06.027> ↑258
- [31] S. M. Lee, C. Laldawngliana and D. Tiwari, "Iron oxide nano-particles-immobilized-sand material in the treatment of Cu (II), Cd (II) and Pb (II) contaminated waste waters". *Chemical Engineering Journal*, vol. 195, pp. 103-111, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.04.075> ↑258
- [32] Z. Melichová and L. Hromada, "Adsorption of Pb²⁺ and Cu²⁺ ions from aqueous solutions on natural bentonite". *Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 22, no. 2, pp. 457-464, 2013. ↑258, 264, 266, 268
- [33] S. Kocaoba and T. Akyuz, "Effects of conditioning of sepiolite prior to cobalt and nickel removal". *Desalination*, vol. 181, no. 1-3, pp. 313-318, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.010> ↑258
- [34] F. Sharifipour, S. Hojati, A. Landi and A. Faz Cano, "Kinetics and thermodynamics of lead adsorption from aqueous solutions onto Iranian sepiolite and zeolite". *International Journal of Environmental Research*, vol. 9, no. 3, pp. 1001-1010, 2015. ↑258, 260, 261, 265, 268
- [35] Y. Fernández-Nava, M. Ulmanu, I. Anger, E. Marañón and L. Castrillón, "Use of granular bentonite in the removal of mercury (II), cadmium (II) and lead (II) from aqueous solutions". *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 215, no. 1-4, pp. 239-249, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0474-1> ↑258, 263, 264, 266, 268
- [36] V. C. Taty-Costodes, H. Fauduet, C. Porte and A. Delacroix, "Removal of Cd (II) and Pb (II) ions, from aqueous solutions, by adsorption onto sawdust of *Pinus sylvestris*". *Journal of Hazardous Materials*, vol. 105, no. 1-3, pp. 121-142, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2003.07.009> ↑258
- [37] A. Sari and M. Tüzen, "Adsorption of silver from aqueous solution onto raw vermiculite and manganese oxide-modified vermiculite". *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 170, pp. 155-163, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2012.12.004> ↑258
- [38] M. Shaban and M. R. Abukhadra, "Geochemical evaluation and environmental application of Yemeni natural zeolite as sorbent for Cd²⁺ from solution: kinetic modeling, equilibrium studies, and statistical optimization". *Environmental Earth Sciences*, vol. 76, no. 8, pp. 310, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6636-3> ↑258, 259, 264, 266, 268
- [39] A. Shukla, Y. H. Zhang, P. Dubey, J. L. Margrave and S. S. Shukla, "The role of sawdust in the removal of unwanted materials from water". *Journal of Hazardous Materials*, vol. 95, no. 1-2, pp. 137-152, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00089-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00089-4) ↑259
- [40] A. Bourliva, K. Michailidis, C. Sikalidis, A. Filippidis and M. Betsiou, "Lead removal from aqueous solutions by natural Greek bentonites". *Clay Minerals*, vol. 48, no. 5, pp. 771-787, 2013. <https://doi.org/10.1180/claymin.2013.048.5.09> ↑259, 265, 266, 267, 268
- [41] H. Cheng, Q. Liu, J. Yang, S. Ma and R. L. Frost, "The thermal behavior of kaolinite intercalation complexes-A review". *Thermochimica Acta*, vol. 545, pp. 1-13, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.04.005> ↑259
- [42] L. Nouri, L. I. Ghodbane, O. Hamdaoui and M. Chiha, "Batch sorption dynamics and equilibrium for the removal of cadmium ions from aqueous phase using wheat bran". *Journal of Hazardous Materials*, vol. 149, no. 1, pp. 115-125, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.03.055> ↑259
- [43] N. Goyal, S. C. Jain and U. C. Banerjee, "Comparative studies on the microbial adsorption of heavy metals". *Advances in Environmental Research*, vol. 7, no. 2, pp. 311-319, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(02\)00004-7](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(02)00004-7) ↑259

- [44] V. J. Inglezakis, M. M. Loizidou and H. P. Grigoropoulou, "Ion exchange studies on natural and modified zeolites and the concept of exchange site accessibility". *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 275, no. 2, pp. 570-576, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.02.070> ↑259
- [45] D. Park, Y. S. Yun and J. M. Park, "The past, present, and future trends of biosorption". *Biotechnology and Bio-process Engineering*, vol. 15, no. 1, pp. 86-102, 2010. <https://doi.org/10.1007/s12257-009-0199-4> ↑260
- [46] L. Ćurković, M. Trgo, M. Rožić and N. V. Medvidović. "Kinetics and thermodynamics study of copper ions removal by natural clinoptilolite". *Indian Journal of Chemical Technology*, vol. 18, no. 2, pp. 137-144, 2011. ↑260, 261, 268
- [47] S. Wang, Z. Nan, X. Cao, Q. Liao, J. Liu, W. Wu, T. Zhou, C. Zhao and W. Jin, "Sorption and desorption behavior of lead on a Chinese kaolin". *Environmental Earth Sciences*, vol. 63, no. 1, pp. 145-149, 2011. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0678-0> ↑260, 261, 266
- [48] H. K. Boparai, M. Joseph and D. M. O'Carroll, "Kinetics and thermodynamics of cadmium ion removal by adsorption onto nano zerovalent iron particles". *Journal of Hazardous Materials*, vol. 186, no. 1, pp. 458-465, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.11.029> ↑260
- [49] A. Zehhaf, A. Benyoucef, R. Berenguer, C. Quijada, S. Taleb and E. Morallon, "Lead ion adsorption from aqueous solutions in modified Algerian montmorillonites". *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 110, no. 3, pp. 1069-1077, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10973-011-2021-8> ↑261, 265, 266, 268
- [50] A. V. Kostin, L. V. Mostalygina and O. I. Bukhtoyarov, "The mechanism of adsorption of zinc and cadmium ions onto bentonite clay". *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, vol. 51, no. 5, pp. 773-778, 2015. <https://doi.org/10.1134/S2070205115050172> ↑261
- [51] M. Irannajad, H. Kamran Haghighi and E. Safarzadeh, "Development of kinetic and equilibrium models for removal of Cd²⁺ and Zn²⁺ ions from aqueous solutions by clinoptilolite". *Environmental Progress and Sustainable Energy*, vol. 35, no. 3, pp. 633-641, 2016. <https://doi.org/10.1002/ep.12260> ↑261
- [52] J. A. Alexander, M. Ahmad Zaini, A. Surajudeen, E. Aliyu and A. U. Omeiza, "Insight into kinetics and thermodynamics properties of multi-component lead (II), cadmium (II) and manganese (II) adsorption onto Dijah-Monkin bentonite clay". *Journal Particulate Science and Technology*, pp. 1-9, 2017. ↑261, 268
- [53] A. Bourliva, K. Michailidis, A. Filippidis, C. Sikalidis, M. Betsiou and G. Bantsis, "Copper removal from single and multi-component systems by natural bentonite from milos island, Greece". In *8th Panhellenic Scientific Conference on Chemical Engineering, Thessaloniki, Greece*, may 2011. ↑261, 263
- [54] A. Zendelska and M. Golomeova, "Effect of competing cations (Cu, Zn, Mn, Pb) adsorbed by natural zeolite". *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 2, no. 5, pp. 483-492, 2014. ↑262, 263
- [55] H. Merrikhpour and M. Jalali, "Sorption processes of natural Iranian bentonite exchanged with Cd²⁺, Cu²⁺, Ni²⁺, and Pb²⁺ cations". *Chemical Engineering Communication*, vol. 200, no. 12, pp. 1645-1665, 2013. <https://doi.org/10.1080/00986445.2012.759561> ↑263
- [56] J. A. Alexander, A. Surajudeen, E. Aliyu, A. Omeiza and M. Zaini, "Multi metals column adsorption of lead(II), cadmium(II) and manganese(II) onto natural bentonite clay". *Water Science and Technology*, vol. 76, no. 7-8, pp. 2232-2241, 2017. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.391> ↑263, 264, 265
- [57] J. Kyzioł-Komosińska, C. Rosik-Dulewska, M. Franus, P. Antoszczyszyn-Szpicka, J. Czupiol and I. Krzyżewska, "Sorption Capacities of Natural and Synthetic Zeolites for Cu (II) Ions". *Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 24, no. 3, 2015. ↑264, 266, 268
- [58] K. Al-Essa and F. Khalili, "Heavy Metals Adsorption from Aqueous Solutions onto Unmodified and Modified Jordanian Kaolinite Clay: Batch and Column Techniques". *American Journal of Applied Chemistry*, vol. 6, no. 1, pp. 25-34, 2018. ↑264, 265
- [59] J. A. Alexander, M. A. Ahmad, A. Surajudeen, E. N. U. Aliyu and A. U. Omeiza, "Insight into kinetics and thermodynamics properties of multicomponent lead (II), cadmium (II) and manganese (II) adsorption onto Dijah-Monkin bentonite clay". *Journal Particulate Science and Technology*, vol. 36, no. 5, pp. 569-577, 2018. <https://doi.org/10.1080/02726351.2016.1276499> ↑264, 265
- [60] A. Salem and R. Akbari, "Removal of lead from solution by combination of natural zeolite-kaolin-bentonite as a new low-cost adsorbent". *Chemical Engineering Journal*, vol. 174, no. 2-3, pp. 619-628, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.09.075> ↑264, 266, 268
- [61] R. Al Dwairi, W. Omar and S. Al-Harashsheh, "Kinetic modelling for heavy metal adsorption using Jordanian low cost natural zeolite (fixed bed column study)". *Journal of Water Reuse and Desalination*, vol. 5, no. 2, pp. 231-238, 2015. <https://doi.org/10.2166/wrd.2014.063> ↑265

- [62] M. Rahimi and J. Mahmoudi, "Studies on optimization of efficient parameters for removal of lead from aqueous solutions by natural zeolite as a low-cost adsorbent using response surface methodology". *Advanced Environmental Technologies*, vol. 2, pp. 99-108, 2017. ↑[265](#), [266](#), [268](#)
- [63] H. N. Tran, S. J. You, A. Hosseini-Bandegharai and H. P. Chao, "Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: a critical review". *Water Research*, Vol. 120, pp. 88-116, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.04.014> ↑[265](#)
- [64] Y. S. Ho, J. F. Porter and G. McKay, "Equilibrium isotherm studies for the sorption of divalent metal ions onto peat: copper, nickel and lead single component systems". *Water, Air, Soil Pollution*, vol. 141, no. 1-4, pp. 1-33, 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1021304828010> ↑[265](#), [267](#), [268](#)
- [65] J. Wang and C. Chen, "Biosorbents for heavy metals removal and their future". *Biotechnology Advances*, vol. 27, no. 2, pp. 195-226, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.11.002> ↑[265](#), [266](#), [268](#)
- [66] Q. Tang, X. Tang, Z. Li, Y. Chen, N. Kou and Z. Sun, "Adsorption and desorption behaviour of Pb (II) on a natural kaolin: equilibrium, kinetic and thermodynamic studies". *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 84, no. 9, pp. 1371-1380, 2009. <https://doi.org/10.1002/jctb.2192> ↑[266](#), [268](#)
- [67] S. H. Chien and W. R. Clayton, "Application of Elovich equation to the kinetics of phosphate release and sorption in soils 1". *Soil Science Society of America Journal*, vol. 44, no. 2, pp. 265-268, 1980. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400020013x> ↑
- [68] W. J. Weber and J. C. Morris, "Kinetics of adsorption on carbon from solution". *Journal of the Sanitary Engineering Division*, vol. 89, no. 2, pp. 31-60, 1963. ↑
- [69] S. A. Al-Jilil and M. S. Latif, "Evaluation of Equilibrium Isotherm Models for The Adsorption of Cu and Ni from Wastewater on Bentonite Clay". *Materiali in Tehnologije*, vol. 47, no. 4, pp. 481-486, 2013. ↑[268](#)
- [70] M. A. El-Latif, A. M. Ibrahim and M. F. El-Kady, "Adsorption equilibrium, kinetics and thermodynamics of methylene blue from aqueous solutions using biopolymer oak sawdust composite". *American Journal of Science*, vol. 6, no. 6, pp. 267-283, 2010. ↑[267](#)
- [71] A. P. Mathews and W. Weber, "Effects of external mass transfer and intraparticle diffusion on adsorption rates in slurry reactors". In *AIChE Symposium Series*, vol. 73, no. 166, 1977 ↑[267](#)
- [72] F. Helfferich, *Ion Exchange*. 1ra edición. Nueva York: Dover, 1995. ↑[267](#)

Dalia Carbonel Ramos

Nació en Lima, Perú. Es Ingeniero de la Universidad Nacional Agraria La Molina, de Lima, Perú. Actualmente se desempeña como estudiante de maestría de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería, donde realiza una investigación en adsorción de metales pesados con pelets de arcilla. e-mail: dcarbonelr@uni.pe



Research

REVISTA
Ingeniería

A Meta-Optimization Approach to Solve the Set Covering Problem.

Un enfoque de Meta-Optimización para Resolver el Problema de Cobertura de Conjunto

Broderick Crawford¹, Ricardo Soto¹, Eric Monfroy², Gino Astorga^{*,1,3}, José García^{1,4}, Enrique Cortes^{1,5}

¹Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Chile, ²Universite de Nantes. Francia, ^{1,3}Universidad de Valparaíso. Chile, ^{1,4}Centro de Investigación y Desarrollo Telefónica, ^{1,5}Universidad de Playa Ancha. Valparaiso - Chile

* Correspondence email: gino.astorga@uv.cl

Received: 16-04-2018. Modified: 09-08-2018. Accepted: 14-09-2018

Abstract

Context: In the industry the resources are increasingly scarce. For this reason, we must make a good use of it. Being the optimization tools, a good alternative that it is necessary to bear in mind. A real-world problem is the facilities location being the Set Covering Problem, one of the most used models. Our interest, it is to find solution alternatives to this problem of the real-world using metaheuristics.

Method: One of the main problems which we turn out to be faced on having used metaheuristic is the difficulty of realizing a correct parametrization with the purpose to find good solutions. This is not an easy task, for which our proposal is to use a metaheuristic that allows to provide good parameters to another metaheuristics that will be responsible for resolving the Set Covering Problem.

Results: To prove our proposal, we use the set of 65 instances of OR-Library which also was compared with other recent algorithms, used to solve the Set Covering Problem.

Conclusions: Our proposal has proved to be very effective able to produce solutions of good quality avoiding also have to invest large amounts of time in the parametrization of the metaheuristic responsible for resolving the problem.

Keywords: Artificial Bee Colony Algorithm, Meta-Optimization, Set Covering Problems.

Language: English

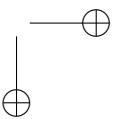
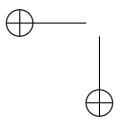
Open access



Cite this paper as: B. Crawford, R. Soto, E. Monfroy, G. Astorga, J. García and E. Cortes. "A Meta-Optimization Approach to Solve the Set Covering Problem", Ingeniería, vol. 23, no.3, pp. 274-288, Sep-Dic 2018.

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

DOI:<https://doi.org/10.14483/23448393.13247>



Resumen

Contexto: En la industria los recursos son cada vez más escasos, por esta razón se debe hacer un buen uso de ellos y las herramientas de optimización son una buena alternativa que se debe tener presente. Un problema del mundo real lo constituye la ubicación de instalaciones, siendo el problema de cobertura de conjuntos uno de los modelos más utilizados. El presente interés es encontrar alternativas de solución a este problema de la vida real, utilizando metaheurísticas.

Método: Uno de los principales problemas que se enfrentan al utilizar metaheurísticas es la dificultad de realizar una correcta parametrización con el objetivo de encontrar buenas soluciones. Esta no es una tarea fácil, por lo cual la propuesta es utilizar una metaheurística que permita proporcionar buenos parámetros a otra metaheurística que será la encargada de resolver el problema de cobertura de conjuntos.

Resultados: Para probar la propuesta, se utiliza el set de 65 instancias de OR-Library, el cual fue comparado con otros recientes algoritmos que son usados para resolver el problema de cobertura de conjuntos.

Conclusiones: La propuesta ha demostrado ser muy efectiva, logrando producir soluciones de buena calidad y evitando, además, que se tenga que invertir gran cantidad de tiempo en la parametrización de la metaheurística encargada de resolver el problema.

Palabras clave: Algoritmo colonia de abejas artificiales, metaoptimización, problema de cobertura.

Language: Inglés

1. Introduction

The Set Covering Problem (SCP), introduced in [1], is an important problem NP-Hard present in the current industry. The following applications for covering problems were mentioned in [2]: Bus stop location, Fire equipment allocation, Fire company relocation, Fire service sitting and Terrain visibility. Also, in [3] were presented some general applications of the gradual covering problem: The delivery problem; Competitive location; Dense competition; The radio, TV, or cellular transmitter problem and Medical facility location problem.

Mathematically SCP can be defined as: Let $A = (a_{ij})$ be an m -row, n -column, zero-one matrix. We say that a column j can cover a row i if $a_{ij} = 1$. Each column j is associated with a non-negative real cost c_j . Let $I = \{1, \dots, m\}$ and $J = \{1, \dots, n\}$ be the row set and column set, respectively. The SCP calls for a minimum cost subset $S \subseteq J$, such that each row $i \in I$ is covered by at least one column $j \in S$. A mathematical model for the SCP is stated in the following:

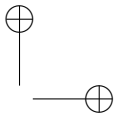
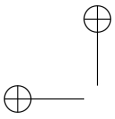
$$\text{Minimize } f(x) = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq 1, \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$x_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J \quad (3)$$

If the costs c_j are equal for each $j \in J$, the problem is referred to as the unicast SCP, otherwise, the problem is called the weighted or non-unicast SCP, where $J_i = \{j \in J : a_{ij} = 1\}$: the subset of columns covering row i and $I_j = \{i \in I : a_{ij} = 1\}$: the subset of rows covered by column j .



The goal is to minimize the sum of the costs of the selected columns, where $x_j = 1$ if the column j is in the solution, 0 otherwise. The constraints ensure that each row i is covered by at least one column.

Different solving methods have been proposed in the literature for the Set Covering Problem. The use of metaheuristics is a good alternative to tackle this problem as can be swarm intelligence continuous metaheuristic. Because they are continuous metaheuristics and SCP is a combinatorial problem, these metaheuristics must be accompanied by a binarization mechanism. In the literature, we find the main binarization technique used to solve SCP corresponds to transfer functions, for more details on binarization techniques see gas [4], [5]. Among the main algorithms that use this technique we found a cat swarm [6], a binary Firefly Optimization [7], a Binary Cuckoo Search (BCS) [8] and artificial bee colony [9]. Specific binarization techniques have also been developed to solve SCP, among the most efficient are: a Teaching-learning binarization [10], a Binary Black Hole (BBH) [11], and a specific Jumping Particle Swarm Optimization (JPSO) method [12].

Depending on the algorithm that has been used, the quality of the solution wanted and the complexity of the SCP chosen, it is defined the amount of customization effort required. Being of paramount importance the determination of the values that are given to the parameters. Conveniently, this work proposes a meta-optimization approach where the task of customization is transferred to another metaheuristic (a “high level” metaheuristic) which can handle the task of parameters adjustment for a low level metaheuristic [13].

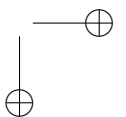
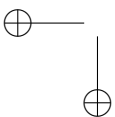
Our proposal considers a Genetic Algorithm (GA) for parameter setting and an ABC algorithm at a lower level using an Automatic Parameter Tuning approach. The Automatic Parameter Tuning is carried by the GA which searches for the best parameters in the parameter space in order to tune the solver automatically.

This approach is considered as meta-optimization since there are two metaheuristics covering tasks of parameter setting, for the former, and problem solving, for the latter [14]. This work is an extension of [15] where emphasis is given to the percentage of improvement of the different instances.

The rest of this paper is organized as follows. In Section 2, we briefly survey the ABC algorithm. In section 3 we present the meta-optimization approach. In Section 4, we present the experimental results obtained. The analysis of the results of comparing our proposal with a constructive metaheuristic is presented in section 5. Finally, in Section 6 we conclude the paper and give some perspectives for further research.

2. Artificial Bee Colony Algorithm

ABC is one of the most recent algorithms in the domain of the collective intelligence [16]. Created by Dervis Karaboga in 2005, who was motivated by the intelligent behavior observed in the domestic bees to take the process of foraging [17]. ABC is an algorithm of combinatorial optimization based on populations, in which the solutions of the problem of optimization, the sources of



food, are modified by the artificial bees, that fungen as operators of variation. The aim of these bees is to discover the food sources with major nectar.

In the ABC algorithm, the artificial bees move in a multidimensional search space choosing sources of nectar depending on its past experience and its companions of beehive or fitting his position. Some bees (exploratory) fly and choose food sources randomly without using experience. When they find a source of major nectar, they memorize his position and forget the previous one. Thus, ABC combines methods of local search and global search, trying to balance the process of the exploration and exploitation of the space of search. The Flow chart of Artificial Bee Colony is showed in Fig. 1.

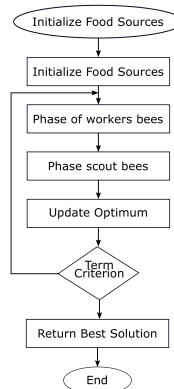


Figure 1. Flow Chart of ABC Algorithm.

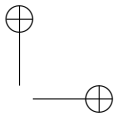
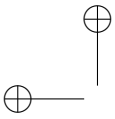
The procedure for determining a food source in the neighbourhood of a particular food source which depends on the nature of the problem. Karaboga [18] developed the first ABC algorithm for continuous optimization. The method for determining a food source in the neighbourhood of a particular food source is based on changing the value of one randomly chosen variable while keeping other variables unchanged. This is done by adding to the current value of the variable the product of a uniform value in [-1, 1] and the difference in values of this variable for this food source and some other randomly chosen food source. This approach can not be used for discrete optimization problems for which it generates at best a random effect.

Singh [19] subsequently proposed a method, which is appropriate for subset selection problems. In his model, to generate a neighbouring solution, an object is randomly dropped from the solution and in its place another object, which is not already present in the solution is added. The object to be added is selected from another randomly chosen solution. If there are more than one candidate objects for addition then ties are broken arbitrarily. In this work we use the ABC algorithm described in [20] and extending the work presented in [14].

3. A Meta-Optimization Approach to Solve the SCP

Metaheuristics, in their original definition, are solution methods that orchestrate an interaction between local improvement procedures and higher level strategies. Thus, metaheuristics create a process capable of escaping from local optima and performing a robust search of a solution space.

Over time, these methods have also come to include any procedures that employ strategies for overcoming the trap of local optimality in complex solution spaces. The use of one or more neighborhood structures as a means of defining admissible moves to transition from one solution to another, or to build or destroy solutions in constructive and destructive processes are examples of such procedures.



3.1. Parameter setting

The selection of an adequate set of values for parameters improves the performance of metaheuristic methods. This configuration can be realized of two ways:

3.1.1. Offline configuration

It consists of finding the appropriate configuration of parameters of the algorithm before the algorithm is executed. It is mostly done in the form of trial and error. This makes tuning process a very high consuming time task. There depends much of the intuition and the experience of the creator of the algorithm. They are typically undocumented and therefore not reproducible driving often to an unequal adjustment of different algorithms. An alternative to find good values for the parameters shown in [21]. Within this group are the racing methods where it is evaluated iteratively different candidate configurations for a certain number of instances [22]; Also this Sequential Model-Based Optimisation, this approach, consists of improving the initial values of the parameters alternating the experiment design and the identification of the parameters [23] and Graphic Radial Method, in this approach radar chart curve is used to define the best configuration [5].

3.1.2. Online configuration

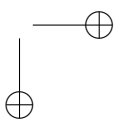
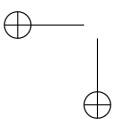
It is an important research area, since the algorithms can adapt themselves better to the characteristics of a particular instance. In the search process, it is essential to identify the phases of exploration and exploitation of the algorithm since the adjustment of parameters can be different in each stage allowing to achieve a better performance. Can improve results in cases of algorithms that are used in situations which are very different to those that were built.

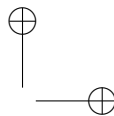
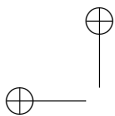
Different techniques exist, being the most simple to define the rule variation of parameters before executing the algorithm.

The on-line approaches can be classified in dynamic and adaptive. Dynamic approaches are those where the updating of the parameters is performed in a random or deterministic way. On the other hand in adaptive approaches the memory is used and the change of value is made according to the progress in the search process. One special case is the autonomous search concept where internal and external information is used for adjustment. Find a correct configuration of parameters constitutes an optimization problem for which we can use a meta-Level optimizer.

3.2. Meta-Optimization

A meta-optimization approach can be considered as two or more metaheuristics where a higher level metaheuristic controls the parameters of a lower level one, which is at charge of dealing more directly to the problem. Our ABC algorithm employs four control parameters which are: number of food sources, the value of limit, % of Columns to add, and % of Columns to eliminate. On a higher level GA allows to evaluate different parameter configurations avoiding manual configuration. Each GA individual encodes the parameters of an ABC algorithm generating an ABC instance. The detail of the proposed approach is presented below:





3.3. Higher level metaheuristic

GA has been successfully used in various algorithm configurations, a particular case is the presented by Grefenstette [24], that used it to find the parameter values of another genetic algorithm. Another example is [25] where several subpopulations are used and a specialized cross-over operator to generate new candidate configurations. On the other hand it was recently used by Senthilkumar in [26] to find the parameters of the arc welding process with flux core. Using a proven algorithm in the search for configurations, allows us to validate our proposal.

In the GA component, the chromosome genes are: “*Food sources*”, it is the number of initial solutions for ABC (which is equal to the number of workers or onlookers bees), it will take values between 50 and 500. The second gene, “*Limit*”, it takes values between 0 and 100. Similarly, the third and fourth genes, “*% Columns to Add*” and “*% Columns to Eliminate*”, they take values between 0.01 and 10.

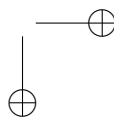
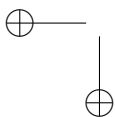
During each generation of the GA algorithm, in order to produce offsprings, a tournament selection method is used to select a set of individuals from the population as follows. Given the size k of the tournament group and a probability p , the k individuals are sorted using their fitness value and a random value r is generated. If $r \leq p$, the best individual is chosen, otherwise the probability p is incremented, a new random value is generated and the tournament group is reduced by one. This process is repeated at most k times. If no individual is chosen after k attempts, the worst individual belonging to the tournament group is selected. To select n individuals this selection procedure is carried out n times.

The operator randomly selects two chromosomes from the population and performs the crossover as follows. It generates randomly a binary crossover mask with the same length as the chromosomes. If the value of a bit is 1, chromosome information is copied from the first parent. If the value is 0, the genes from the second parent are used and vice-versa for the second offspring.

The mutation operator is applied with a certain rate replacing the value of a gene with a value drawn uniformly from its domain.

3.4. Lower level Metaheuristic

In the ABC component, a first step is performed in order to initialize the parameters of ABC as size of the colony, number of workers and onlookers bees, limit of attempts and maximum number of cycles (iterations). To generate the initial population we cross every row of the counterfoil of constraints and by every row a column is selected at random. This column is part of the solution which is represented by means of an entire vector. This vector considers the columns chosen in one solution. To complete this vector a procedure is performed for all the rows in such a way that the generated solution complies with all the constraints. Then, the evaluation of the population fitness is performed using the objective function, see (1). Afterwards, the modification of the position and selection of sites for worker bees is performed as follows. A hard-working bee modifies its current position selecting a food source randomly. If a hard-working bee duplicates a solution, it is transformed to an explorer bee. Otherwise, it proceeds to add a certain random number of columns between 0 and the maximum number of columns to be added. Then, it proceeds to eliminate a cer-



tain random number of columns between 0 and the maximum number of columns to be eliminated. If the new solution does not meet the constraints, it is repaired.

We use repair method where all rows not covered are identified and the columns required are added. So in this way all the constraints will be covered. The search of these columns are based in the relationship showed in the Equation 4.

$$\frac{\text{cost of one column}}{\text{amount of columns not covered}} \tag{4}$$

Once the columns are added and the solution is feasible, a method is applied to remove redundant columns of the solution. A redundant column are those that are removed, the solution remains a feasible solution.

After this, the fitness of the solution is evaluated by means of the objective function of the SCP and if the fitness is minor that the solution previously obtained, the solution is replaced. Otherwise, the number of attempts for improving this solution is increased and the algorithm continues evaluating another hard-working bee.

3.5. Integrating Components

The Figure 2 shows the meta-optimization approach developed to solve the SCP. Once the GA population is generated, each individual is taken to run the ABC algorithm until a certain cut-off. Then, the genetic operators are applied and a termination criterion is evaluated in order to stop the parameter setting. Once the termination criterion is achieved, the best individual from the GA contains the best parameter set which is selected to run the ABC algorithm.

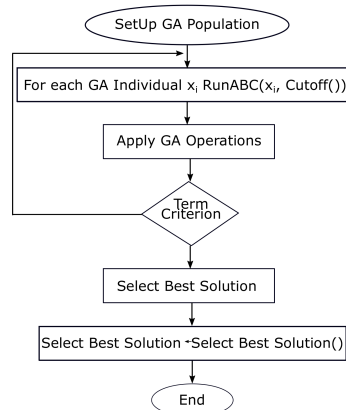


Figure 2. Tuning ABC().

4. Results

In this section we detail the behaviour of our approach. To solve the different SCP instances, a Computer with Windows 7, 2.5 GHz Dual Core processor and 4GB in RAM was used.

The ABC algorithm was executed 30 times for each instance, where the main features are shown in the Table I, where the density corresponds to the percentage of non-zero in the matrix.

In the top level Java Package was used ¹ (jgap) 3,5 version to implement the genetic algorithm using the parameters shown in the Table II. The GA implementation has 3 main phases: configuration, initial population and evolution of the population.

¹<http://jgap.sourceforge.net>

Table I. Features of the 65 instances [20].

Instance set	No. of instances	m	n	Cost range	Density (%)	Optimal solution
4	10	200	1000	[1, 100]	2	Known
5	10	200	2000	[1, 100]	2	Known
6	5	200	1000	[1, 100]	5	Known
A	5	300	3000	[1, 100]	2	Known
B	5	300	3000	[1, 100]	5	Known
C	5	400	4000	[1, 100]	2	Known
D	5	400	4000	[1, 100]	5	Known
NRE	5	500	5000	[1, 100]	10	Known
NRF	5	500	5000	[1, 100]	20	Known
NRG	5	1000	10000	[1, 100]	2	Unknown
NRH	5	1000	10000	[1, 100]	5	Unknown

Table II. Parameters used in GA

Parameter	Value	Parameter	Value
Number of generations	20	Mask probability	0.5
Population size	30	Mutation rate	0.025
Crossover type	Uniform crossover	Selector tournament size	3
Crossover rate	0.4	Tournament selector parameter (p)	0.75

The best parameters settings for each instance were found using GA, since these may vary because the search space can change very much of one instance to another. In the table III shows the values of the parameters of the best chromosomes obtained.

Table III. Parameters values from best chromosome

Instance set	Food sources	Limit	% Columns to add	% Columns to eliminate
4	83	30	0.4	1
5	77	40	0.7	1.2
6	106	37	0.6	1.3
A	93	53	0.6	1.1
B	85	50	0.2	1.7
C	100	70	0.5	1.4
D	112	66	0.2	1.5
NRE	98	38	0.3	1.5
NRF	200	51	0.3	1.7
NRG	103	70	0.3	1.6
NRH	107	53	0.4	2

In order to compare our proposal with other works and given information available, we use the relative percentage deviation (*RPD*) which quantifies the deviation of the target value Z of Z_{opt} . We report the optimal value, the best found value using our proposed and its average. The results are shown in the Tables V, VI and VII.

To validate our proposal were resolved the 65 instances of OR-Library and were compared with published results of recent approaches: Binary Cat Swarm Optimization (BCSO) [6]; Binary Firefly Optimization (BFO) [27]; Binary Shuffled Frog Leaping Algorithm (BSFLA) [28]; Binary Electromagnetism - Like Algorithm (BELA) [29]; and Binary Artificial Bee Colony (BABC) [30]. The comparison is done using relative percentage deviation (*RPD*).

The table V show the results obtained for instances from group 4, where ABC had the best optimal values compared to the results by the previous approaches, only BFO exhibit a good performance for this data with two global optimums.

Table IV. Results obtained for IWD - Meta-Optimization

Instance	Optimal	IWD			M-OPT		
		Min	Avg	RPD	Min	Avg	RPD
4.1	429	454	468.73	5.83	430	430.5	0.2
5.1	253	294	302.00	12.65	254	255	0.4
6.1	138	177	217.96	28.26	140	140.5	1.4
A.1	253	310	350.68	22.53	254	254	0.4
B.1	69	92	124.44	33.33	69	69	0.0
C.1	227	227	351.74	30.84	230	231	1.3

In the group 5, ABC, BFO, BSFLA AND BABC obtained optimal values, detailed as follows: ABC, four optimal values; BFO, three optimal values; BSFLA, four optimal values; BABC, two optimal values. BELA and BCSO did not achieve some optimum. The results are shown in the Table VI.

The results of groups B, C and H are shown in the Table VII where it is visualized that ABC achieves all the optimals for groups B and H, also achieving 2 optimal for group C. In relation to the other techniques used in the comparison, BFO finds two optimal values, BSFLA finds four optimal values. In the case of BABC, there are two optimal values. BCSO not get optimal as well as BELA.

Additionally, our proposal was compared with the constructive Metaheuristic called Intelligent Water Drops presented by [31]. For this comparison was used the first instances of the groups 4, 5, 6, A, B y C. The results are shown in the table IV.

Table V. Results obtained for Set 4

Instance	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	4.10	
Z_{opt}	429	512	516	494	512	560	430	492	641	514	
New approach											
ABC	Z_{min}	430.0	512.0	516.0	494.0	512.0	561.0	430.0	493.0	643.0	514.0
	Z_{avg}	430.5	512.0	516.0	494.0	512.0	561.7	430.0	494.0	645.5	514.0
	RPD	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	0.3	0.0
Previous approaches											
BCSO	Z_{min}	459	570	590	547	545	637	462	546	711	537
	Z_{avg}	480	594	607	578	554	650	467	567	725	552
	RPD	7	11.3	14.3	10.7	6.4	13.8	7.4	11	10.9	4.5
BFO	Z_{min}	429	517	519	495	514	563	430	497	655	519
	Z_{avg}	430	517	522	497	515	565	430	499	658	523
	RPD	0	0.97	0.58	0.2	0.39	0.53	0	1.01	2.18	0.97
BSFLA	Z_{min}	430	516	520	501	514	563	431	497	656	518
	Z_{avg}	430	518	520	504	514	563	432	499	656	519
	RPD	0.23	0.78	0.78	1.42	0.39	0.54	0.23	1.02	2.34	0.78
BELA	Z_{min}	447	559	537	527	527	607	448	509	682	571
	Z_{avg}	448	559	539	530	529	608	449	512	682	571
	RPD	4.20	9.18	4.07	6.68	2.93	8.39	4.19	3.46	6.40	11.09
BABC	Z_{min}	430	513	519	495	514	561	431	493	649	517
	Z_{avg}	430	513	521	496	517	565	434	494	651	519
	RPD	0.23	0.20	0.58	0.20	0.39	0.18	0.23	0.20	0.93	0.58

In order to demonstrate that our approach helps to improve the overall time to solve a problem, to contribute to the search for a good configuration parameters in less time, we use the table VIII it shows the times used for the configuration of each instance. Manually we used 5 hours, in contrast with GA we use 720 seconds for each group of instances.

In the Table VIII we can see that the biggest instances the percentage of progress of the time diminishes what it makes necessary to incorporate in the future other techniques to improve this behavior.

Table VI. Results obtained for Set 5

Instance	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	5.10	
Z_{opt}	253	302	226	242	211	213	293	288	279	265	
New approach											
ABC	Z_{min}	254.0	309.0	228.0	242.0	211.0	213.0	296.0	288.0	280.0	266.0
	Z_{avg}	255.0	310.2	228.5	242.0	211.0	213.0	296.0	288.0	279.2	267.0
	RPD	0.4	2.3	0.9	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.4	0.4
Previous approaches											
BCSO	Z_{min}	279	339	247	251	230	232	332	320	295	285
	Z_{avg}	287	340	251	253	230	243	338	330	297	287
	RPD	10.3	12.3	9.3	3.7	9	8.9	13.3	11.1	5.7	7.5
BFO	Z_{min}	257	309	229	242	211	213	298	291	284	268
	Z_{avg}	260	311	233	242	213	213	301	292	284	270
	RPD	1.58	2.31	1.32	0	0	0	1.7	1.04	1.79	1.13
BSFLA	Z_{min}	254	307	228	242	211	213	297	291	281	265
	Z_{avg}	255	307	230	242	213	214	299	293	283	266
	RPD	0.4	1.66	0.88	0	0	0	1.37	1.04	0.72	0
BELA	Z_{min}	280	318	242	251	225	247	316	315	314	280
	Z_{avg}	281	321	240	252	227	248	317	317	315	282
	RPD	10.67	5.30	7.08	3.72	6.64	15.96	7.85	9.38	12.54	5.66
BABC	Z_{min}	254	309	229	242	211	214	298	289	280	267
	Z_{avg}	255	309	233	245	212	214	301	291	281	270
	RPD	0.40	2.32	1.33	0	0	0.47	1.71	0.35	0.36	0.75

Table VII. Results obtained for Set B, C and H

Instance	B.1	B.2	B.3	B.4	B.5	C.1	C.2	C.3	C.4	C.5	H.1	H.2	H.3	H.4	H.5	
Z_{opt}	69	76	80	79	72	227	219	243	219	215	63	63	59	58	55	
New approaches																
ABC	Z_{min}	69.0	76.0	80.0	79.0	72.0	230.0	219.0	244.0	220.0	215.0	63.0	63.0	59.0	58.0	55.0
	Z_{avg}	69.0	76.0	80.0	79.0	72.0	231.0	219.0	244.5	224.0	215.0	63.0	63.0	59.0	58.0	55.0
	RPD	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0	0.4	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Previous approaches																
BCSO	Z_{min}	79	86	85	89	73	242	240	277	250	243	70	67	68	66	61
	Z_{avg}	79	89	85	89	73	242	241	278	250	244	71	67	70	67	62
	RPD	14.5	13.2	6.3	12.7	1.4	6.6	9.6	14	12.3	13	11.1	6.3	15.3	13.8	10.9
BFO	Z_{min}	71	78	80	80	72	230	223	253	225	217	69	66	65	63	59
	Z_{avg}	72	78	80	81	73	232	224	254	227	219	70	66	67	65	60
	RPD	2.89	2.63	0	1.26	0	1.32	1.82	4.11	2.73	0.93	9.52	4.76	10.16	6.77	7.27
BSFLA	Z_{min}	70	76	80	79	72	229	223	253	227	217	68	66	62	63	59
	Z_{avg}	70	77	80	80	73	231	225	253	228	218	69	66	63	64	61
	RPD	1.45	0	0	0	0	0.88	1.83	4.12	3.65	0.93	7.94	4.76	5.08	8.62	7.27
BELA	Z_{min}	86	88	85	84	78	237	237	271	246	224	70	71	68	70	69
	Z_{avg}	87	88	87	88	81	238	239	271	248	225	71	71	70	72	69
	RPD	24.64	15.79	6.25	6.33	8.33	4.41	8.22	11.52	12.33	4.19	11.11	12.70	15.25	20.69	25.45
BABC	Z_{min}	70	78	80	80	72	231	222	254	231	216	70	69	66	64	60
	Z_{avg}	70	79	80	81	74	233	223	255	233	217	71	72	67	64	61
	RPD	1.45	2.63	0	1.27	0	1.76	1.37	4.53	5.48	0.47	11.11	9.52	11.86	10.34	9.09

Table VIII. Comparison of ABC with manually and automatically tuned parameters

Instance	Manual tuned	Auto tuned	%	Instance	Manual tuned	Auto tuned	%	Instance	Manual tuned	Auto tuned	%
4.1	282.0	77.1	72.66	6.3	287.2	154.3	46.27	D.5	344.3	211.4	38.60
4.2	281.7	76.8	72.74	6.4	286.0	153.1	46.47	NRE.1	366.0	233.1	36.31
4.3	281.8	76.9	72.71	6.5	290.0	157.1	45.83	NRE.2	375.7	242.8	35.37
4.4	282.3	77.4	72.58	A.1	288.8	155.9	46.02	NRE.3	381.8	248.9	34.80
4.5	282.5	77.6	72.53	A.2	288.1	155.1	46.16	NRE.4	370.1	237.2	35.90
4.6	282.0	77.1	72.66	A.3	287.7	154.7	46.23	NRE.5	374.6	241.7	35.47
4.7	281.9	77.0	72.69	A.4	288.5	155.6	46.07	NRF.1	607.3	474.4	21.88
4.8	282.3	77.4	72.58	A.5	287.6	154.7	46.21	NRF.2	559.5	426.5	23.77
4.9	281.2	76.3	72.87	B.1	316.3	183.4	42.02	NRF.3	585.4	452.5	22.70
4.10	282.5	77.6	72.53	B.2	314.6	181.6	42.28	NRF.4	602.0	469.1	22.07
5.1	283.9	79.0	72.17	B.3	311.7	178.8	42.64	NRF.5	601.2	468.2	22.12
5.2	283.0	78.1	72.40	B.4	318.6	185.7	41.71	NRG.1	374.5	241.5	35.51
5.3	284.3	79.4	72.07	B.5	312.9	179.9	42.51	NRG.2	373.8	240.9	35.55
5.4	283.1	78.2	72.38	C.1	294.1	161.2	45.19	NRG.3	371.3	238.4	35.79
5.5	283.5	78.6	72.28	C.2	294.2	161.3	45.17	NRG.4	369.4	236.5	35.97
5.6	283.6	78.7	72.25	C.3	295.7	162.8	44.94	NRG.5	369.7	236.8	35.94
5.7	284.2	79.3	72.10	C.4	294.5	161.5	45.16	NRH.1	809.3	676.4	16.42
5.8	283.0	78.1	72.40	C.5	294.6	161.6	45.15	NRH.2	810.8	677.9	16.39
5.9	283.0	78.1	72.40	D.1	355.5	222.6	37.38	NRH.3	834.1	701.1	15.94
5.10	283.1	78.1	72.41	D.2	351.2	218.3	37.84	NRH.4	842.7	709.8	15.77
6.1	288.5	155.6	46.07	D.3	351.5	218.6	37.81	NRH.5	816.0	683.1	16.28
6.2	287.6	154.7	46.21	D.4	343.1	210.1	38.76				

In tables IX to XI we analysed the difference of RPD of the different techniques with respect to the RPD obtained by ABC. We can observe that for Set 4 (Figure IX) in average the lowest percentage of improvement corresponds to 36,41 %, however low to 27.84 % for set 5. For the most complicated groups, our proposal also presents important improvement with respect to the other techniques.

Table IX. Comparison RPD Set 4 with ABC

	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	4.10
BCSO	97,14	100	100	100	100	0,00	100	98,18	97,25	100
BFO	0,00	100	100	100	100	96,88	-	80,20	86,24	100
BSFLA	13,04	100	100	100	100	48,72	100	80,39	87,18	100
BELA	95,24	100	100	100	100	48,72	100	94,22	95,31	100
BABC	13,04	100	100	100	100	78,49	100	0,00	67,74	100
AVG	36,41	100	100	100	100	54,56	100	70,60	86,74	100

Table X. Comparison RPD Set 5 with ABC

	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	5.10
BCSO	96,12	81,30	90,32	100	100	100	92,48	100	92,98	94,67
BFO	74,68	0,43	31,82	0,00	0,00	0,00	41,18	100	77,65	64,60
BSFLA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	27,01	100	44,44	0,00
BELA	96,25	56,60	87,29	100	100	100	87,26	100	96,81	92,93
BABC	0,00	0,86	32,33	0,00	0,00	100	41,52	100	0,00	46,67
AVG	53,41	27,84	48,35	40,00	40,00	60,00	57,89	100	62,38	59,77

Table XI. Comparison RPD Set B, C and H with ABC

	B.1	B.2	B.3	B.4	B.5	C.1	C.2	C.3	C.4	C.5	H.1	H.2	H.3	H.4	H.5
BCSO	100	100,00	100,00	100	100	80,30	100,00	97,14	95,93	100	100	100	100	100	100
BFO	100	100,00	0,00	100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BSFLA	100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BELA	100	100	100,00	100	100	70,52	100,00	96,53	95,94	100	100	100	100,00	100	100
BABC	100	100	0,00	100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
AVG	100	80,00	40,00	80,00	40,00	30,16	40,00	38,73	38,38	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00

5. Statistical Analysis

To perform the statistical analysis in this study, we use the following tests:

- Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors [32] is used to determine the independence of samples.
- Wilcoxon Signed Rank [33] is used to verify superiority of the strategy of resolution using Meta-optimization in relation to the IWD algorithm.

For both tests, we use a significance level of 0.05, that is, values smaller than 0.05 indicate that the corresponding hypothesis cannot be assumed.

For the first test, the following hypothesis is used:

H_0 = The data follow a normal distribution.

H_1 = The data do not follow a normal distribution.

Given the P-values obtained in the tests, the hypothesis is rejected.

The Wilcoxon-Mann-Whitney [33] test is then applied. To verify the superiority of the resolution strategy using Meta-Optimization in relation to the IWD Algorithm, fitness is used, and the following hypotheses are defined:

H_0 = IWD algorithm \geq Meta-Optimization

Table XII. Statistical Analysis Results.

Instance	IWD	M-Opt	p-value
	Min	Min	
4.1	454	430	6.273690e-12
5.1	285	254	2.203342e-11
6.1	177	140	2.660479e-11
A.1	310	254	7.643806e-12
B.1	92	69	1.677019e-12
C.1	227	231	1.530219e-11

$H_1 = \text{IWD algorithm} < \text{Meta-Optimization}$

It is obtained $p\text{-value} < 0.05$; therefore, the hypothesis H_0 is rejected, and H_1 is accepted, which implies that Meta-optimization provides better results. This procedure extends to each instance of the benchmark (Table XII). The results of this analysis are coincident with those verified by RPD.

6. Conclusions

In our work we use a metaheuristics with a meta-optimization approach to solve the SCP. The results revealed, once again, the importance of the parametrization of the algorithms. The results were very good in comparison with the other proposals used. Clearly the use of the automation in the parameters, allows to significantly improve the results in relation to the manual parameterization. In this work, was possible to observe that the time of instances of the groups 4 and 5, considering the time used in the process of configuration, was greater than 50 percent. As future work, we propose the use of other metaheuristics with different parameters with the order to improve the results and also to facilitate the use by simplifying the parametrization of the metaheuristic of top level. In addition you can use this approach to other problems of the real world as is the problem of routing of school buses with time windows [34].

Acknowledgment

Broderick Crawford is supported by grant CONICYT / FONDECYT / REGULAR 1171243 and Ricardo Soto is supported by Grant CONICYT / FONDECYT / REGULAR / 1160455, Gino Astorga is supported by Postgraduate Grant, Pontificia Universidad Catolica de Valparaíso, 2015 and José García is supported by INF-PUCV 2016. This research was partially funded by CORFO Program Ingeniería 2030 PUCV - Consortium of Chilean Engineering Faculties.

Referencias

- [1] C. Toregas, R. Swain, C. ReVelle, and L. Bergman, "The location of emergency service facilities," *Operations Research*, vol. 19, no. 6, pp. 1363–1373, 1971. <https://doi.org/10.1287/opre.19.6.1363>†. 275
- [2] D. Schilling, V. Jayaraman, and R. Barkhi, "A review of covering problem in facility location," *Location Science*, vol. Vol. 1, no. 1, pp. 25–55, 1993†. 275

- [3] T. Drezner, Z. Drezner, and Z. Goldstein, "A stochastic gradual cover location problem," *Naval Research Logistics (NRL)*, vol. 57, no. 4, pp. 367–372, 2010. <https://doi.org/10.1002/nav.20410>†. 275
- [4] B. Crawford, R. Soto, G. Astorga, J. García, C. Castro, and F. Paredes, "Putting continuous metaheuristics to work in binary search spaces," *Complexity*, vol. 2017, no. 2, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/8404231>†. 276
- [5] J. García, B. Crawford, R. Soto, C. Castro, and F. Paredes, "A k-means binarization framework applied to multidimensional knapsack problem," *Applied Intelligence*, vol. 48, no. 2, pp. 357–380, 2017†. 276, 278
- [6] B. Crawford, R. Soto, N. Berrios, F. Johnson, F. Paredes, C. Castro, and E. Norero, "A binary cat swarm optimization algorithm for the non-unicost set covering problem," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015, no. 2, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/578541>†. 276, 281
- [7] B. Crawford, R. Soto, M. Olivares-Suárez, F. Paredes, and F. Johnson, "Binary firefly algorithm for the set covering problem," in *2014 9th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, pp. 1–5, June 2014. <https://doi.org/10.1109/CISTI.2014.6877090>. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06740-7_6†. 276
- [8] R. Soto, B. Crawford, R. Olivares, J. Barraza, I. Figueroa, F. Johnson, F. Paredes, and E. Olguín, "Solving the non-unicost set covering problem by using cuckoo search and black hole optimization," *Natural Computing*, pp. 1–17, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11047-016-9609-7>†. 276
- [9] D. Karaboga, "An idea based on honey bee swarm for numerical optimization," tech. rep., Technical report-tr06, Erciyes university, engineering faculty, computer engineering department, 2005†. 276
- [10] Y. Lu and F. J. Vasko, "An or practitioner's solution approach for the set covering problem," *International Journal of Applied Metaheuristic Computing (IJAMC)*, vol. 6, no. 4, pp. 1–13, 2015. <https://doi.org/10.4018/IJAMC.2015100101>†. 276
- [11] J. García, B. Crawford, R. Soto, and P. García, "A multi dynamic binary black hole algorithm applied to set covering problem," in *Harmony Search Algorithm*, pp. 42–51, Springer, 2017†. 276
- [12] S. Balaji and N. Revathi, "A new approach for solving set covering problem using jumping particle swarm optimization method," *Natural Computing*, vol. 15, no. 3, pp. 503–517, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11047-015-9509-2>†. 276
- [13] B. Crawford, C. Valenzuela, R. Soto, E. Monfroy, and F. Paredes, "Parameter tuning of metaheuristics using metaheuristics," *Advanced Science Letters*, vol. 19, no. 12, pp. 3556–3559, 2013. <https://doi.org/10.1166/asl.2013.5236>†. 276
- [14] B. Crawford, R. Soto, W. Palma, F. Johnson, F. Paredes, and E. Olguín, "A 2-level approach for the set covering problem: Parameter tuning of artificial bee colony algorithm by using genetic algorithm," in *Advances in Swarm Intelligence* (Y. Tan, Y. Shi, and C. Coello, eds.), vol. 8794, pp. 189–196, Springer International Publishing, 2014†. 276, 277
- [15] B. Crawford, R. Soto, E. Monfroy, G. Astorga, J. García, and E. Cortes, "A meta-optimization approach for covering problems in facility location," in *4th Workshop on Engineering Applications*, pp. 565–578, Springer, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66963-2_50†. 276
- [16] D. Karaboga, B. Gorkemli, C. Ozturk, and N. Karaboga, "A comprehensive survey: artificial bee colony (ABC) algorithm and applications," *Artificial Intelligence Review*, vol. 42, no. 3, pp. 21–57, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10462-012-9328-0>†. 276
- [17] D. Karaboga and B. Basturk, "A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm," *Journal Global Optimization*, vol. 39, no. 3, pp. 459–471, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10898-007-9149-x>†. 276
- [18] D. Karaboga, "An idea based on honey bee swarm for numerical optimization," *Technical Report TR06. Computer Engineering Department, Erciyes University, Turkey*, 2005. 277
- [19] A. Singh, "An artificial bee colony algorithm for the leaf-constrained minimum spanning tree problem," *Applied Soft Computing*, vol. 9, no. 2, pp. 625–631, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2008.09.001>†. 277
- [20] B. Crawford, R. Soto, R. Cuesta, and F. Paredes, "Application of the artificial bee colony algorithm for solving the set covering problem," *The Scientific World Journal*, vol. 2014, no. 1, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/189164>†. 277, 281
- [21] M. López-Ibáñez, J. Dubois-Lacoste, L. P. Cáceres, M. Birattari, and T. Stützle, "The irace package: Iterated racing for automatic algorithm configuration," *Operations Research Perspectives*, vol. 3, pp. 43 – 58, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2016.09.002>†. 278

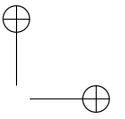
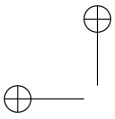
- [22] M. Birattari, “*The problem of tuning metaheuristics as seen from a machine learning perspective*,” Amsterdam: IOS Press, 2004. [↑](#). 278
- [23] G. Franceschini and S. Macchietto, “Model-based design of experiments for parameter precision: State of the art,” *Chemical Engineering Science*, vol. 63, no. 19, pp. 4846–4872, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.11.034>. [↑](#). 278
- [24] J. J. Grefenstette, “Optimization of control parameters for genetic algorithms,” *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, vol. 16, no. 1, pp. 122–128, 1986. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1986.289288>. [↑](#). 279
- [25] C. Ansótegui, M. Sellmann, and K. Tierney, “A gender-based genetic algorithm for the automatic configuration of algorithms,” in *International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*, pp. 142–157, Springer, 2009. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04244-7_14. [↑](#). 279
- [26] B. Senthilkumar, T. Kannan, and R. Madesh, “Optimization of flux-cored arc welding process parameters by using genetic algorithm,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 93, no. 1-4, pp. 35–41, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7636-7>. [↑](#). 279
- [27] B. Crawford, R. Soto, M. Olivares-Suárez, and F. Paredes, “A binary firefly algorithm for the set covering problem,” in *3rd Computer Science On-line Conference 2014 (CSOC 2014)*, vol. 285 of *Advances in Intelligent Systems and Computing*, pp. 65–73, Springer International Publishing, 2014. [↑](#). 281
- [28] B. Crawford, R. Soto, C. Peña, W. Palma, F. Johnson, and F. Paredes, “Solving the set covering problem with a shuffled frog leaping algorithm,” in *7th Asian Conference, ACIIDS 2015, Bali, march 23-25, 2015*. 281
- [29] R. Soto, B. Crawford, A. Muñoz, F. Johnson, and F. Paredes, “Pre-processing, repairing and transfer functions can help binary electromagnetism-like algorithms,” in *Artificial Intelligence Perspectives and Applications*, vol. 347 of *Advances in Intelligent Systems and Computing*, pp. 89–97, Springer International Publishing, 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-319-18476-0_10. [↑](#). 281
- [30] R. Cuesta, B. Crawford, R. Soto, and F. Paredes, “An artificial bee colony algorithm for the set covering problem,” in *Modern Trends and Techniques in Computer Science:3rd Computer Science On-line Conference 2014 (CSOC 2014)*, Springer International Publishing, 2014. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06740-7_5. [↑](#). 281
- [31] H. Shah-Hosseini, “Intelligent water drops algorithm: A new optimization method for solving the multiple knapsack problem,” *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, vol. 1, no. 2, pp. 193–212, 2008. <https://doi.org/10.1108/17563780810874717>. [↑](#). 282
- [32] S. S. Shapiro and M. B. Wilk, “An analysis of variance test for normality (complete samples),” *Biometrika*, vol. 52, no. 3/4, pp. 591–611, 1965. <https://doi.org/10.2307/2333709>. <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>. [↑](#). 284
- [33] H. B. Mann and D. R. Whitney, “On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other,” *The annals of mathematical statistics*, pp. 50–60, 1947. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491>. [↑](#). 284
- [34] L. Santana, E. Ramiro, and J. Romero, “A hybrid column generation and clustering approach to the school bus routing problem with time windows,” *Ingeniería*, vol. 20, no. 1, pp. 101–117, 2015. [↑](#). 285

Broderick Crawford

Currently is adjunct professor at the Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile. Informatics Engineering, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile; Bachelor of Arts in Engineering Science, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile; Master of Business Administration, Universidad de Chile; Doctor in Informatics Engineering, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.

Ricardo Soto

Currently is adjunct professor at the Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile. Civil Engineer in Computer Science, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile; Bachelor of Science in Engineering, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile; PhD in Computer Science, Universit de Nantes, France.



Eric Monfroy

Currently working as a Professor in the Department of Science and Technology, France. His research interests includes Digital Sciences . Is serving as an editorial member and reviewer of several international reputed journals and member of many international affiliations. Is has authored of many research articles/books related to Digital Sciences.

Gino Astorga

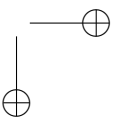
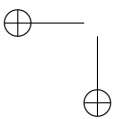
Currently is Phd Student in Computer Engineering, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile. Computer Engineer, Universidad de Viña del Mar, Chile; Master in Computer Engineering, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile; Master in Sciences of the Computer Engineering, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile.

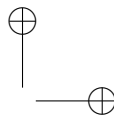
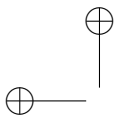
José García

Currently is Phd Student in Computer Engineering, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile. Biochemical, Universidad de Chile, Chile; PhD in Mathematics, Universidad de Chile,Chile; Master in Computer Engineering, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile; Master in Sciences of the Computer Engineering, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile.

Enrique Cortes

Currently is professor at the Universidad de Playa Ancha, Chile and Phd Student in Computer Engineering. Chemical Engineering, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile; ; Master of Science in Engineering with mention in Chemical Engineering; Master in Computer Engineering, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile; Master in Sciences of the Computer Engineering, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile.





Instrucciones para los Autores

Introducción

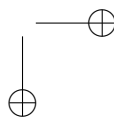
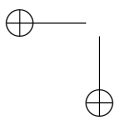
La Revista INGENIERÍA es una publicación de carácter científico con una periodicidad cuatrimestral editada por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La Revista está dirigida a la comunidad académica, investigadores, egresados, sectores productivos y en general al público interesado en los temas del campo de la Ingeniería. Su principal objetivo es difundir y debatir avances en investigación y desarrollo en las diferentes áreas de la ingeniería a través de la publicación de artículos originales e inéditos, con pertinencia local o internacional.

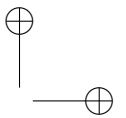
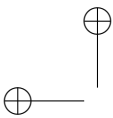
Todo artículo es evaluado de manera doble-ciega por pares revisores antes de ser calificado como candidato para publicar. El Comité Editorial, tomando en cuenta los conceptos emitidos por los evaluadores y el cumplimiento de las políticas editoriales de la Revista, decide la publicación del artículo en una edición futura. Todos los artículos presentados a la revista INGENIERÍA deben ser inéditos. No se publicarán artículos que hayan sido anteriormente publicados o que hubieren sido sometidos por el autor o los autores a otros medios de difusión nacional o internacional para su publicación.

Clasificación de los artículos

La clasificación de un artículo científico dependerá de la naturaleza del nuevo conocimiento que reporte, lo que nos lleva a plantear la siguiente tipificación:

- **Investigación:** son aquellos que abordan una pregunta sobre un aspecto disciplinar teórico o aplicado, usualmente mediante un estudio científico del comportamiento de un fenómeno o una situación bajo ciertas condiciones de control.
- **Metodología:** estudios enfocados en presentar un nuevo método de solución para una categoría particular de problemas, demostrando resultados favorables en comparación con el estado del arte o de la técnica. Son investigaciones específicamente dedicadas a validar las bondades y desventajas del método que proponen o a realizar caracterizaciones comparativas de varios métodos en dominios disímiles o inexplorados.
- **Revisión:** los que presentan análisis críticos, sistemáticos, delimitados y exhaustivos, sobre los avances, tendencias, resultados positivos y negativos, vacíos y futuras rutas de investigación encontrados en el actual estado del arte o de la técnica.
- **Perspectiva:** aquellos que, recurriendo a fuentes bibliográficas originales y con un discurso argumentativo y controversial, cuestionan el actual estado del arte o de la técnica, proponen visiones alternativas a las corrientes de pensamiento dominantes, critican la vanguardia de la disciplina o instigan un viraje hacia tópicos de investigación abandonados o desentendidos por la comunidad científica. Usualmente más que una reflexión personal, buscan establecer una posición colectiva (de comunidad científica), sustentada en una discusión que combina introspectiva, retrospectiva y prospectiva sobre el asunto en cuestión.
- **Reporte de Caso:** los que buscan divulgar un hallazgo novedoso encontrado durante o posterior a un caso particular de desarrollo tecnológico, que eventualmente podría





generalizarse mediante una investigación más amplia (aplicada a más casos) y que por lo tanto ameritan ser conocidos por la comunidad para convocarla en tal sentido. Más que enfatizar en el desarrollo tecnológico o innovación per sé, se enfocan en caracterizar el conocimiento descubierto en el caso de estudio respectivo.

- **Editoriales, Cartas al Editor, Artículo Invitado:** son las únicas categorías que no reportan nuevo conocimiento, sino que discuten temas de interés para la Revista, para su línea editorial o para su comunidad, con un carácter de opinión informada.

Para una mayor información de la explicación y/o diferencias de la anterior clasificación los invitamos a visitar el siguiente enlace “Guía breve de clasificación de artículos en INGENIERÍA”. <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/11131/12114>

Procedimiento para el envío de artículos

Los autores deberán enviar al Editor los siguientes documentos mediante la plataforma Open Journal System (OJS) de la Revista:

- Carta de presentación y originalidad del artículo: el formato de la presente carta se puede descargar en el siguiente enlace:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5087/11961> (Formato PDF)
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/11486/12242> (Formato Word)
La finalidad de la carta es certificar que el artículo es inédito, que no está sometido a otra publicación y que aceptan las normas de publicación de la Revista.

- El artículo en formato digital utilizando la plantilla y las normas de presentación que se pueden consultar en el siguiente enlace (instrucciones a los autores):

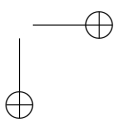
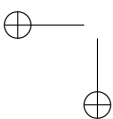
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/4979/11816> (Formato PDF)
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5233/11815> (Formato Word)
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/9539/10775> (Formato Latex)

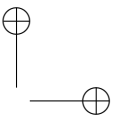
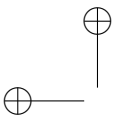
- Los autores relacionarán en el correo de postulación del artículo dos posibles evaluadores que cumplan las siguientes condiciones:

- Debe tener al menos título de maestría.
- Pertener a una institución diferente a la de los autores.
- Haber realizado publicaciones en los últimos tres años.

Nota: Enviar los datos de los contactos de los posibles evaluadores (nombre completo, institución y correo electrónico). Esta información también puede ser enviada a la siguiente dirección electrónica: revista_ing@udistrital.edu.co

- En caso de ser aceptado, los autores del artículo se comprometen a diligenciar el formato de cesión de derechos para publicación. Se puede descargar en el siguiente enlace:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5091/6711>





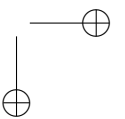
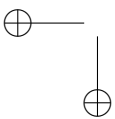
Se puede consultar la guía rápida para autores en la plataforma OJS en el enlace:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5540/7070>

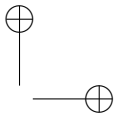
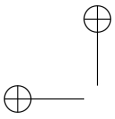
Aspectos a tener en cuenta

- Se considera un artículo largo cuando tiene más de diez (10) páginas con este formato. Por consiguiente se recomienda tener como límite diez (10) páginas para la elaboración de un artículo. El Comité Editorial podría solicitar a los autores reducir el tamaño del artículo cuando lo considere demasiado largo.
- Los resultados de las evaluaciones de los pares árbitros y las modificaciones que requiera el Comité Editorial serán notificados a los autores a través de la plataforma OJS y al correo electrónico del autor de correspondencia. Los autores deberán enviar nuevamente el artículo con las modificaciones sugeridas sin nombres y sin biografías. En general, este intercambio de sugerencias y modificaciones puede llegar a presentarse una, dos o más veces después de presentar el artículo.
- Cuando un artículo no cumple con las condiciones definidas para la revista, el Comité Editorial podría decidir no publicarlo. En este caso, el autor o los autores serán notificados de la decisión.

Derechos de autor

El contenido completo de la licencia Creative Commons, bajo la cual se resguardan los derechos de autor de aquellos que publican en la Revista INGENIERÍA, puede consultarse en: Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.





Instructions for authors

Aim and scope

INGENIERÍA Journal is a scientific publication with a periodicity published every four months by Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Its main goal is to disseminate and discuss advances in research and development in the different areas of engineering through the publication of original unpublished papers.

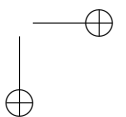
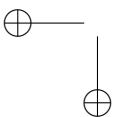
The intended audience of the Journal is the academic community, researchers, graduates, productive sectors and in general the public interested in all engineering disciplines.

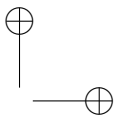
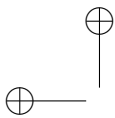
Submitted papers are double-blind peer-reviewed by at least two experts in the field, before being qualified as a candidate to be published. The Editorial Board grounds its acceptance decision on the basis of the recommendations given by the experts and the fulfillment of the editorial policies of the Journal. All papers submitted to INGENIERÍA Journal must be unpublished and not submitted to publication to other journal, although papers previously published in conference proceedings may be considered if substantial extensions are included.

Types of papers

Papers published in INGENIERIA Journal are classified according to the nature of the new knowledge it reports, as follows:

- **Research:** These are papers that address a question about a theoretical or applied disciplinary aspect, usually through a scientific study of the behaviour of a phenomenon or a situation under certain control conditions.
- **Methodology:** These are papers focusing on presenting a new method of solution for a particular category of problems, demonstrating favorable results compared to the state of the art or technique. They are investigations specifically dedicated to validate the advantages and disadvantages of the method proposed or to perform comparative characterisations of several methods in dissimilar or unexplored domains.
- **Review:** These are papers that present critical, systematic, delimited and exhaustive analyzes on the progress, trends, positive and negative results, gaps and future research routes found in the current state of the art or technique.
- **Perspective:** These are papers that, using original bibliographical sources and argumentative and controversial discourse, question the current state of art or technique, propose alternative visions to dominant currents of thought, criticise the vanguard of the discipline or call for the attention towards research topics abandoned or disregarded by the scientific community. Usually more than a personal reflection, they seek to establish a collective (scientific community) position, based on a discussion that combines introspective, retrospective and prospective on the subject in question.
- **Case Report:** These are papers intending to disclose a novel finding found during or after a particular case of technological development, which could eventually be generalised by a more extensive investigation (applied to more cases) and which therefore deserve to be known by the community. In other words, rather than emphasising on





technological development or innovation per se, they focus on characterising preliminary knowledge discovered in the respective case study.

- **Editorials:** Letters to the Editor, Guest Article: These are the only contributions that do not report new knowledge, but discuss topics of interest for the Journal, for its editorial line or for its community, with an informed opinion style.

Procedure for the submission of papers

Authors should submit to the Editor the following documents using our Open Journal System (OJS) platform:

- Cover letter and originality statement: a template can be downloaded from:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/5087/11961> (PDF Format)

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/11486/12242> (Word format)

- The manuscript formatted according to the template and style of the instructions to authors:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/4979/11816> (PDF Format)

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/5233/11815> (Word Format)

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/9539/10775> (Latex Format)

- (Optional) Suggestions of two candidate experts for peer review, complying with:

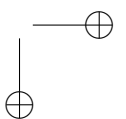
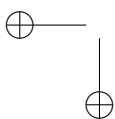
- Must have a PhD. Degree
- Must belong to an institution other than the authors'
- Have publications in recognised journals in the last two years

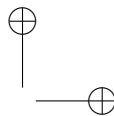
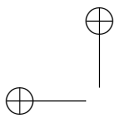
- If accepted for publication, the authors must agree with and submit a copyright form that transfers rights for publication. This form can be downloaded from:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/5091/6711>

Additional considerations

- Recommended paper length is ten (10) pages. If authors require more pages, they should inform the Editor in advance during the submission process.
- The result of the review process and the reviewers comments would be notified to the authors through the OJS platform and by email to the correspondence author. The result can be “Major correction”, “Minor corrections” or “Rejected”. When corrections are required, authors should resubmit a corrected anonymous manuscript and a companion document explaining the changes made in reply to what comments. Usually, a submitted manuscript would undertake at least two rounds of review. Statistics of average review and production times and other Journal indicators can be seen at:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/index>
- When a submission does not meet the conditions defined for the journal, the Editorial





Committee may decide not to publish it. In this case, the authors will be notified of the decision within two (2) weeks from the date of submission.

Copyright and publishing cost

INGENIERÍA Journal distributes the full content of its printed and digital version under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License. No publication costs are charged to the author or author's institutions, nor any payment are made to expert peer reviewers or associated or adjunct editors. INGENIERÍA Journal is funded by Universidad Distrital Francisco José de Caldas, its School of Engineering and its Central Research Office.

Code of good conduct in scientific publishing

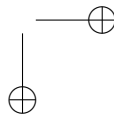
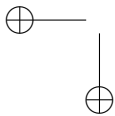
INGENIERÍA Journal advocates and defends the universal principles of good conduct in scientific publication, in particular, those referring to respect for the community, respect for the selfless and voluntary work of peer reviewers and editors, as well as respect to intellectual property. Regarding the latter, INGENIERÍA Journal does not tolerate behaviours related to plagiarism of previously published material and strives to honor to the maximum extent the copyrights and patents and reproduction rights. Likewise, the Journal seeks to observe the moral rights of third parties, in addition it will establish the necessary processes to avoid and to resolve the possible conflicts of interest that can exist in the publications.

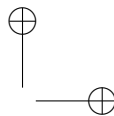
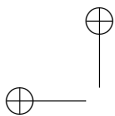
Inappropriate behaviour not tolerated by the journal

1. Wrongly addressed submission intended to other journal different to INGENIERIA Journal.
2. Plagiarism or self-plagiarism.
3. Simultaneous submission of a manuscript to several journals.
4. Unjustified withdraw of a submitted manuscript due to unfavourable reviews.
5. Unjustified abandonment of submission at any stage of the process: verification of submission conditions, peer-review process or layout and final proof adjustments.

Penalties for inappropriate behaviour

1. Official communication sent to the authors indicating the misconduct, requesting a letter of apology addressed to the Editorial Committee, Scientific and/or peer reviewers.
2. Notification sent to the Colombian Network of Engineering Journals (Red Colombiana de Revistas de Ingeniería) reporting the case of misconduct with evidences.
3. Official communication sent to author's affiliated or financing institutions informing about the misconduct.
4. Retraction of the paper in case it has been published, notifying this decision publicly in the editorial pages of the Journal and in an official letter addressed to the entities of institutional affiliation of the authors.





5. Application of a publication veto to the authors in the Journal during a period determined by the Editorial Board according to the seriousness of the misconduct.

6. Notification of the case and the result of the investigation to the competent authorities, in case the good will of the Universidad Distrital FJC or the INGENIERIA Journal is compromised.

Procedure in case of suspicion of plagiarism and duplicate publication

INGENIERIA Journal will follow the guidelines established by the Publications Ethics Committee (COPE) to handle unethical issues or behaviours:

Suspicion of plagiarism in a submitted manuscript

<http://publicationethics.org/files/u7140/plagiarism%20A.pdf>

Suspicion of plagiarism in a published paper

http://publicationethics.org/files/u7140/plagiarism%20B_0.pdf

Suspicion of duplicate publication in a submitted manuscript

<http://publicationethics.org/files/u7140/redundant%20publication%20A.pdf>

Suspicion of a duplicate publication in a published paper

http://publicationethics.org/files/u7140/redundant%20publication%20B_0.pdf

For more information on non-ethical conduct and/or penalties please see:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/7784/11818>

