



Enero – Abril 2019, Vol. 26, N° 1, ISSN 1316–6832
Online ISSN: 2610-8240



Revista INGENIERÍA UC

Órgano de Divulgación
Científica y Tecnológica de la Facultad de Ingeniería
de la Universidad de Carabobo

Disponible en:
Revista Ingeniería UC
servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista

VALENCIA – VENEZUELA

ISSN 1316–6832
Depósito legal pp 92.0200
Online ISSN: 2610-8240

**Revista
Ingeniería UC**

Revista indexada en:
REVENCYT (Venezuela); Actualidad Iberoamericana (CIT-Chile);
IET/INSPEC (United Kingdom UK); DRJI (The Directory of Research Journal Indexing);
LATINDEX-Catálogo (México); REDALYC (México); Periódica (México)
Emerging Sources Citation Index, Thomson Reuters.

**Órgano de Divulgación Científica y Tecnológica
Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo
Valencia-Venezuela**

Editor - Jefe

Prof. Ángel D. Almarza M., PhD Dirección de Investigación y Producción Intelectual, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela

Editores

Prof. Cristóbal Vega, PhD Instituto de Matemática y Cálculo Aplicado - IMYCA, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela

Prof. Jesús J. Jiménez Grimán, MSc Instituto de Matemática y Cálculo Aplicado - IMYCA, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela

Editores Honorarios

Prof. Edilberto Guevara, PhD Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela

Prof. Francisco Arteaga, PhD Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela

Prof.^a Lisbeth Manganiello, PhD Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela

Editores Asociados

Prof.^a Belén Paricaguán, PhD, Dirección de Estudios Básicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela

Prof. Francisco Soto, MSc, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela

Prof.^a Angelina Correia, PhD, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela

Corrector de redacción y estilo

Prof.^a Vanessa Hurtado. MSc. Escuela de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Venezuela

Junta Editorial

Dr Adelmo Ortiz Conde
Universidad Simón Bolívar, Venezuela
Dra. Maura Vázquez de Ramírez
Universidad Central de Venezuela, Venezuela
Dr. Guillermo Ramírez
Universidad Central de Venezuela, Venezuela
Dr. Antonino Caralli
Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Pablo Baricelli
Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Johnny Bullon
Universidad de los Andes, Venezuela
Dr. Sergio Mora
Universidad de Santiago de Chile, Chile
Dr. Herbert J. Sira R.
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México

Dr. Enrique Barbien
University of Houston, Estados Unidos
Dr. Ángel Ríos Castro
Universidad de Castilla La Mancha, España
Dr. Merlin Rosales
Universidad del Zulia, Venezuela
Dr. José A. Díaz
Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Carlos Martínez
Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Roberto Callarotti
Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Venezuela
Dr. Teodoro García
Universidad de Carabobo, Venezuela

Revista indexada en:
REVENCYT (Venezuela); Actualidad Iberoamericana (CIT–Chile);
IET/INSPEC (United Kingdom UK); DRJI (The Directory of Research Journal Indexing)
LATIDEX–Catálogo (México); REDALYC (México); Periódica (México)
Emerging Sources Citation Index, Thomson Reuters.

Órgano de Divulgación Científica y Tecnológica
Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo
Valencia–Venezuela

Comité Técnico*

Dr. Eliecer Colina, Universidad de Los Andes, Venezuela
Dr. César O. Seijas Fossi, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Francisco García Sánchez, Universidad Simón Bolívar, Venezuela
Dr. Fernando Mora, Universidad Simón Bolívar, Venezuela
Dr. Gian Franco Passariello, Universidad Simón Bolívar, Venezuela
Dr. Enrique Cázares Rivera, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México
Dr. Giovanni De Mercato, Universidad Simón Bolívar, Venezuela
Dra. Yadira Martínez, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Luis Vallés, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Luis Llave, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Alfonso Zozaya, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dra. Lilly Marcano, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. José A. Díaz, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. César Martínez, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Guillermo Montilla, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Oscar Crescente, Universidad de Oriente, Venezuela
Dra. Laura Sáenz, Universidad de las Fuerzas Armadas, Sede Latacunga, Ecuador
Ing. Enrique Flores, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Lic. Atilio Morillo, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Franklin Camejo, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Sergio Villazana, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Vanesa Altomare, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Reina Windevoxhel, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Lucia Martino, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Antonio Millán, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Ricardo Villegas, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Jesús Jiménez, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela

Ing. Paulino Del Pino, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Wilmer Sanz, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Carlos Lameda, MSc, Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre, Venezuela
Ing. Carlos Hernández, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Alfonso Alfonsi, Universidad de Oriente
Ing. Enrique Flores, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Ángel Villegas, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dra. Damelys Zabala, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Demetrio Rey Lago, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Alfredo Varela, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Johel Rodríguez, MSc, Universitat Politècnica de València, España
Dr. Sergio Pérez, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dra. Celeste Fernández, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Antonio Bonsjak, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. José R. Pacheco, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dra. Susana Salinas de Romero, Universidad del Zulia, Venezuela
Dr. Cristóbal E. Vega González, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Donato Romanello, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Teddy Rojas, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Alejandro Centeno, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Carlos Jiménez, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dra. Nereida Sánchez, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Luis Melián, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Enrique Pérez, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. Julio Pineda, Universidad de Carabobo, Venezuela
Ing. María Teresa Cruz, MSc, Universidad de Carabobo, Venezuela
*Lista parcial

Frecuencia de publicación

Revista INGENIERÍA UC se publica un volumen anual en tres números: abril, agosto y diciembre

Información de Contacto

<http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/>
<https://www.redalyc.org/revista.oa?id=707>
Correo–e: revistaing@uc.edu.ve

ISSN 1316-6832
Online ISSN: 2610-8240



Revista Ingeniería UC

ÓRGANO DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD DE CARABOBO

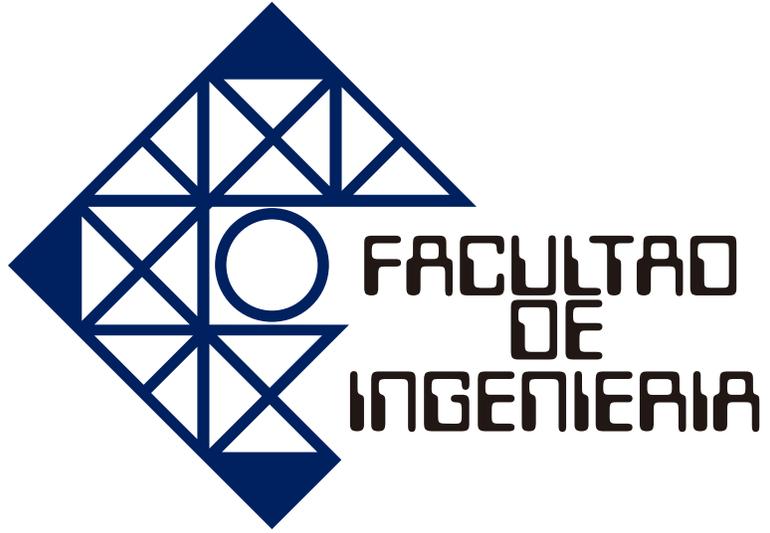
Valencia – Venezuela

Contenido General, (*General content*)

| | |
|---|-----------|
| Volumen 26 Número 1 | 1 |
| Editorial volumen 26 número 1 | 2 |
| <i>José Luis Nazar, Ángel Almarza</i> | |
| 1 Analysis of interfacial properties in samples of resins I, associated with a heavy crude oil, hydrotreated under distinct operative conditions | 4 |
| Análisis de las propiedades interfaciales en muestras de resinas I, asociadas a un crudo pesado, hidrotratado bajo distintas condiciones de operación | |
| <i>Beatriz Gutiérrez, Henry Labrador</i> | |
| 2 Comparison of three methods in the analysis of hydrometeorological droughts in the Ilave River basin Puno - Perú | 14 |
| Comparación de tres métodos en el análisis de sequías hidrometeorológicas en la cuenca del Río Ilave Puno – Perú | |
| <i>Lorenzo G. Cieza Coronel, Jesús Abel Mejía Marcacuzco</i> | |
| 3 Effect of mineral compounds of sands on acid gases generation at steam injection conditions | 23 |
| Efecto de composición mineral de arenas sobre generación de gases ácidos en crudos pesados a condiciones de inyección de vapor | |
| <i>Yefrenck Castro, Diego Sánchez, Alfredo Viloría</i> | |
| 4 Metaheuristics-based frameworks to solve the knapsack problem | 31 |
| Frameworks basados en metaheurísticas para resolver el problema de la mochila | |
| <i>Isela Jiménez-Castellano, Betania Hernández-Ocaña, José Hernández-Torruco, Oscar Chávez-Bosquez</i> | |
| 5 Design, construction and evaluation of the performance of a load reactor sequential for treatment of residual waters of teneries | 44 |
| Diseño, construcción y evaluación del desempeño de un reactor de carga secuencial para tratamiento de aguas residuales de tenerias | |
| <i>Estefania Freytez, Adriana Márquez, María Carolina Pire, Edilberto Guevara, Sergio Pérez</i> | |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 6 | Configuration of Harmony Search Parameters based on Fuzzy Logic | |
| | Configuración de los parámetros de la búsqueda armónica mediante lógica difusa | |
| | <i>Alejandro Centeno, Alejandro Bolívar, Demetrio Rey, Francisco Arteaga, César Séijas, Ángel D. Almarza M.</i> | 61 |
| 7 | Modeling of the monthly distribution of soil erosion and sediment yield in the Tucutunemo Basin, Venezuela | 72 |
| | Modelado de la distribución mensual de la erosión del suelo y la producción de sedimentos en la cuenca de Tucutunemo, Venezuela | |
| | <i>Samuel Cárdenas, Adriana Márquez, Edilberto Guevara, Demetrio Rey</i> | |
| 8 | Evaluation of the quality and water flow of a hydrographic basin located in a national park | 96 |
| | Evaluación de la calidad y el caudal de aguas de una subcuenca hidrográfica ubicada en un parque nacional | |
| | <i>Elianny Balza, María Zapata, Milagros Jiménez-Noda, Lisbeth Manganiello, Cristóbal Vega, Rosalyn Cova, Jesús Moreno</i> | |
| 9 | Tech note: bioremediation, enemy of cadmium | 110 |
| | Nota técnica: biorremediación, enemigo del cadmio | |
| | <i>Yeimy Nieves, Norbis Parra, Samuel Villanueva, Magaly Henríquez</i> | |
| 10 | Tech note: technologies for the production of isopropyl alcohol (IPA) | 119 |
| | Nota técnica: tecnologías para la producción de alcohol isopropílico (IPA) | |
| | <i>Greysi Moreno–Cedeño, Natasha Tellería Mata, Samuel Villanueva, Magaly Henríquez</i> | |
| | Índice de materias | 125 |
| | Subjects index | 126 |
| | Índice de autores (Author index) | 127 |
| | Apéndices | 1 |
| | A. Línea editorial | 2 |
| | B. Editorial line | 3 |
| | C. Normas para la presentación de artículos | 4 |

| | |
|--|-----------|
| D. Authors Information | 7 |
| E. Carta de compromiso | 9 |
| F. Compromise letter | 10 |
| G. Índices de Revista Ingeniería UC | 11 |



Volumen 26 Número 1

Editorial

La Revista Ingeniería UC en la edición de su volumen 26, número uno (1) correspondiente al período de enero a abril del año 2019, demuestra la solidez, el compromiso y la determinación que como equipo nos caracteriza, siendo capaces de sobrellevar las circunstancias de los tiempos actuales y cumplir con la comunidad científica nacional e internacional y nuestra ilustre casa de estudios. Estamos convencidos que son estas situaciones especiales y de complejidad, las que nos permiten valorar en su justa medida los esfuerzos de todos los que hacen posible la edición y montaje de cada número, dándonos la oportunidad de seguir ocupando nuestra posición como el principal órgano de divulgación científico y tecnológico de nuestra facultad. Desde la Revista Ingeniería UC, agradecemos la confianza que han puesto en nosotros los diversos autores y reafirmamos una vez más nuestra voluntad de seguir avanzando, manteniendo la excelencia académica, y haciendo visibles productos de investigación nacionales e internacionales de altísima calidad.

Abrimos la presente edición con un análisis de las propiedades interfaciales en muestras de resinas I, asociadas a un crudo pesado, mejorado por hidrotratamiento bajo distintas condiciones de operación, usando el método de gota colgante, presentado por Gutiérrez y Labrador. Cieza y Mejía, exponen un estudio de gran interés en términos del aprovechamiento de los recursos hídricos, basado en la comparación de tres métodos para el análisis de sequías hidrometeorológicas en la cuenca del río Ilave, Puno-Perú, por medio de la evaluación de series históricas que abarcan desde el año 1957 hasta el 2015.

Castro y su grupo, muestran el efecto de la composición mineral de arenas, provenientes de cuatro diferentes bloques de la faja petrolífera del Orinoco, en la reacción de aquatermolisis en condiciones de inyección de vapor, para lo cual usaron reactores por carga para el sistema arena/agua/petróleo entre 240-280°C en una atmósfera de vapor de agua. Jiménez-Castellano y colaboradores, realizaron una presentación de los frameworks basados en metaheurísticas de diferentes familias para resolver el problema de la mochila, a través de un prototipo de software desarrollado en lenguaje Java.

Freytez y su equipo plantean el diseño, construcción y evaluación del desempeño de un reactor de carga secuencial (SBR) para tratamiento de aguas residuales de tenerías, ejecutando la fase experimental con biomasa granular y biomasa suspendida; de donde se concluyó que la tasa de remoción de la DQO en un SBR para duraciones de ciclo de 6, 12 y 24 horas usando biomasa granular bajo condiciones aerobias resultó 2 veces superior a la tasa de remoción de la biomasa suspendida.

Centeno y su grupo implementaron una propuesta para la configuración de los parámetros numéricos del algoritmo de búsqueda armónica basada en lógica difusa, la cual se utiliza para el entrenamiento supervisado de una red neuronal multicapa con la finalidad de resolver un problema de clasificación binaria.

Cárdenas y colaboradores, presentan el modelado de la distribución mensual de erosión del suelo y la producción de sedimentos en la cuenca de Tucutunemo, Venezuela, empleando técnicas de detección remota en imágenes satelitales de Landsat y el modelo de elevación digital global ASTER con una resolución espacial de 30 metros para utilizar los modelos USLE (Universal Soil Loss Equation) y Langebein-Schumm, encontrándose que los fenómenos objeto de estudio ocurren en la parte alta y media de la cuenca.

También forma parte de esta edición, un trabajo especial de grado premiado por la Escuela de Ingeniería Química de nuestra ilustre Universidad de Carabobo, realizado por Balza y Zapata, quienes evidencian en su artículo la evaluación de la calidad y el flujo de aguas de la subcuenca hidrográfica Miquija-Goaigoaza,

ubicada en la vertiente norte del Parque Nacional San Esteban (PNSE), donde se destaca el diseño de un modelo matemático, aplicando la metodología Box–Jenkins para la estimación de los caudales mensuales, apoyado tanto en caudales históricos como actuales.

Por último, cerramos con dos notas técnicas. En la primera, Nieves y colaboradores desarrollaron el levantamiento de información, que permitió determinar las tecnologías que a nivel mundial han sido desarrolladas para la biorremediación de los suelos contaminados con cadmio, destacando fundamentalmente dos de ellas, basadas en el uso de plantas y hongos respectivamente, para la posible implementación en una zona productora de cacao en el estado Miranda, Venezuela. En la segunda, Moreno y su grupo identificaron las tecnologías para la producción de alcohol isopropílico (IPA) patentadas a nivel mundial en el período 1900-2018, de donde se describen tres métodos fundamentales para la obtención de IPA, como lo son: hidratación de acetona, hidratación de propileno y actividad enzimática de bacterias genéticamente modificadas.

Nos despedimos, invitando muy cordialmente a publicar en nuestra Revista Ingeniería UC a todos aquellos investigadores nacionales e internacionales interesados en confiarnos sus productos científicos en las diferentes áreas de la ingeniería y ciencias afines

Profesor *José Luis Nazar*
Decano de la Facultad de Ingeniería

Profesor *Ángel Almarza*, PhD
Editor – Jefe

Analysis of interfacial properties in samples of resins I, associated with a heavy crude oil, hydrotreated under distinct operative conditions

B. Gutiérrez, H. Labrador*

*Laboratorio de Petróleo, Hidrocarburos y Derivados (Lab. PHD). Facultad Experimental de Ciencia y Tecnología.
Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.*

Abstract.- In this work several samples of resins I, associated to Mora crude oil, enhanced by hydrotreating (HT) under distinct conditions were considered, with the main objective of analyzing their interfacial properties with the pendant drop method. First, it was evaluated the variation of interfacial tension on solutions from resins I in saturated toluene, as a function of their concentration and it was calculated their critical micelle concentration (CMC); plus, as innovation, selected samples were purified through column elution chromatography, then their interfacial tension was measured and their CMC was calculated. As main results, it was verified that resins I associated to Mora crude oil, with or without enhancing it, didn't show any relevant changes between their interfacial tension, however, there were differences in their CMC; besides, through the purification process carried out in this work, it was proved the hypothesis of resins I, with its operative definition, contains saturated, aromatics and resins; plus, resins I samples, once purified, decreased their interfacial tension and CMC, which points out that the other sub fractions present within resin I, particularly in the case of Mora crude oil, represented modifications in tensoactive properties of the fraction under analysis.

Keywords: interfacial tension; critical micelle concentration (CMC); dispersants; resins; surfactants.

Análisis de las propiedades interfaciales en muestras de resinas I, asociadas a un crudo pesado, hidrotratado bajo distintas condiciones de operación.

Resumen.- En esta investigación se consideraron muestras de resinas I, asociadas al crudo Mora, mejorado por hidrotratamiento (HT) bajo distintas condiciones, con el objetivo general de analizar sus propiedades interfaciales, usando el método de la gota colgante. Inicialmente, se evaluó la variación de la tensión interfacial de disoluciones de resinas I en tolueno saturado, como función de su concentración y se determinó su concentración micelar crítica (CMC); adicionalmente y como innovación, varias muestras seleccionadas se purificaron, aplicando una cromatografía de elución en columna, se evaluó su tensión interfacial y se determinó su CMC. Como resultados más relevantes, se verificó que las resinas I asociadas al crudo Mora, con o sin mejoramiento, no presentaron cambios significativos en su tensión interfacial, pero se apreciaron diferencias en su CMC; en el proceso de purificación, se comprobó la hipótesis de que la fracción de resinas I, dada su definición operacional, contiene saturados, aromáticos y resinas; adicionalmente, las muestras de resinas I purificadas, disminuyeron su tensión interfacial y CMC, con lo cual se demuestra que la presencia de las sub fracciones antes mencionadas, particularmente en el crudo bajo análisis, representaron modificaciones a las propiedades tensoactivas de la fracción bajo estudio.

Palabras claves: tensión interfacial; concentración micelar crítica (CMC); dispersantes; resinas; surfactantes.

Recibido: 29 agosto 2018

Aceptado: 02 febrero 2019

1. Introducción

El petróleo es una mezcla compleja, formada por hidrocarburos de varios tipos, con presencia

de heteroátomos como azufre (S), oxígeno (O) y nitrógeno (N), además de ciertos metales, principalmente níquel (Ni) y Vanadio (V); su elevada complejidad, hace que sea muy común la división en pseudo familias de compuestos, con el objeto de facilitar el análisis y estudio de sus propiedades y estructuras [1]. Estas pseudo familias son: saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos.

* Autor para correspondencia:

Correo-e: hjlalbrad@uc.edu.ve (H. Labrador)

La precipitación de asfaltenos constituye uno de los problemas operativos más documentados en la industria petrolera, tanto en las etapas de extracción, transporte y almacenamiento [2], como en los procesos de refinación [3], pudiendo generar grandes pérdidas e interrupciones en las operaciones. Por esta razón, se han realizado estudios que buscan describir las propiedades de los asfaltenos [4, 5], además del tipo y características de las interacciones que tienen éstos en el seno del crudo, las cuales son responsables de su estabilización en el mismo [6, 7, 8, 9].

Dentro de esta división del crudo en pseudo familias de compuestos, se ha identificado que las sustancias responsables de estabilizar a los asfaltenos son las resinas [10], debido a su estructura, la cual presenta varios núcleos aromáticos (grupos polares), con sustituyentes laterales de grupos alifáticos y nafténicos (con menor polaridad), con presencia de ciertos grupos funcionales con heteroátomos, lo que hace que tengan propiedades tensoactivas [11, 12]. Sin embargo, la definición más formal que se tiene sobre las resinas asociadas al petróleo es que son la fracción de crudo que es soluble en alcanos livianos como el n-pentano o el n-heptano y que puede adsorberse sobre ciertos materiales activados como arcillas (bentonitas), sílice gel, alúmina, siendo insolubles en propano líquido [10, 13]. Adicionalmente, la pseudo familia de resinas puede dividirse en las resinas I, que son aquellas que coprecipitan con los asfaltenos en la separación primaria del crudo, siguiendo la norma ASTM D-6560-12 [14] y las resinas II, que en dicha etapa, permanecen en la fase líquida conocida como maltenos [15, 16].

Andersen y Speight [10] señalan que la fracción de resinas tiene gran importancia en el crudo, puesto que, éstas son las encargadas en formar las micelas, estabilizando a las moléculas de los asfaltenos, manteniéndolos dispersos en el sistema coloidal – molecular que representa al crudo.

A nivel industrial y de investigación, se han desarrollado varios métodos, tanto correctivos como preventivos, para solucionar los problemas relacionados con la precipitación de asfaltenos [17, 18]; dentro de estos métodos, uno de los

más empleados consiste en la aplicación de sustancias dispersantes, con objeto de estabilizar las moléculas de asfaltenos, evitando la asociación entre éstas con la consecuente formación de agregados sólidos. En los crudos inestables o con tendencia a precipitar asfaltenos, la aplicación de inhibidores o dispersantes busca reforzar la acción peptizante que naturalmente ejercen las resinas, por lo cual la composición en los productos comerciales está basada en la mayor parte de los casos en emplear moléculas con núcleos polares y extremos de baja polaridad, como por ejemplo los alquil fenoles, compuestos etoxilados, sulfonatos, aminas, amidas, en distintas combinaciones [13, 10]. La formulación de estos dispersantes e inhibidores representa un área de alta complejidad, pues cada crudo tiene características y propiedades distintas y el desempeño de estos aditivos es función de su composición, de las características y los parámetros estructurales del crudo y sus asfaltenos, de la tasa de adición, aparte de las variables operativas: temperatura, presión [19].

En atención a los retos en complejidad que representa el desarrollo de productos sintéticos como dispersantes de asfaltenos, unido a la necesidad de disminuir costos en esta materia y disminuir la generación de pasivos ambientales por manejo de sustancias contaminantes, la industria ha evaluado la utilización de sustancias naturales como posibles dispersantes de asfaltenos [20], así como el empleo de resinas provenientes de distintos crudos [21, 22, 23, 24, 25, 16, 13], aprovechando así las características antes mencionadas que éstas presentan, gracias a su estructura. La presente investigación desarrolla entonces la evaluación de las propiedades tensoactivas de varias muestras de resinas I, asociadas a un crudo pesado, el Mora (colombiano), previamente mejorado por hidrotreamiento (HT), a través de mediciones de tensión interfacial en disoluciones de resinas I en tolueno saturado, sobre medio acuoso y del cálculo de su concentración micelar crítica (CMC), ambos parámetros típicamente estudiados y calculados en el análisis de surfactantes, para describir la capacidad dispersante de una sustancia. Adicionalmente y como innovación, se presenta el sub fraccionamiento o purificación de las muestras

de resinas I, empleando una cromatografía de elución en columna, de acuerdo a la norma ASTM D-2007-11 [26], con lo cual se obtuvieron sus saturados, aromáticos y resinas, por muestra; finalmente, se midió la tensión interfacial y se calculó el CMC de las resinas purificadas, para realizar los análisis y comparaciones respectivas.

2. Reactivos y metodología

2.1. Reactivos

Se emplearon muestras de un crudo pesado, el Mora (colombiano), hidrotratado y no hidrotratado, pertenecientes al Laboratorio de Petróleo, Hidrocarburos y Derivados (Lab. PHD – Facyt) de la Facultad Experimental de Ciencia y Tecnología, de la Universidad de Carabobo (Venezuela). Dichas muestras, mejoradas bajo distintas condiciones, como parte de otra investigación [21], se indican en la Tabla 1, para la posterior identificación de las resinas I correspondientes.

Tabla 1: Identificación de las muestras de crudo empleadas en la investigación

| Muestra | Descripción |
|---------|--|
| 0 | Crudo Mora sin mejorar (patrón) |
| 1 | Crudo Mora HT a 230°C, 1000psig, catalizador de Ni ₂ B/γ – Al ₂ O ₃ |
| 2 | Crudo Mora HT a 270°C, 1000psig, catalizador de Ni ₂ B/γ – Al ₂ O ₃ |
| 3 | Crudo Mora HT a 310°C, 1000psig, catalizador de Ni ₂ B/γ – Al ₂ O ₃ |
| 4 | Crudo Mora HT a 270°C, 1000psig, catalizador de Ni ₂ B |
| 5 | Crudo Mora HT a 270°C, 1000psig, catalizador de Ni–Mo/γ – Al ₂ O ₃ |
| 6 | Crudo Mora HT a 270°C, 1000psig, s/c |

En cuanto a los disolventes empleados, todos fueron de grado analítico: n-hexano, tolueno, metanol. Como fase estacionaria para la cromatografía de elución en columna, se empleó sílice gel grado analítico.

2.2. Metodología

2.2.1. Separación de las muestras de resinas I del crudo

Se realizó partiendo de los ensayos estandarizados ASTM D-6560-12 (IP-143) [14] y ASTM

D-2007-11 [26] modificados, empleando en este caso n-hexano como disolvente de separación. Inicialmente se precalentó el crudo a 50°C para disminuir su viscosidad y facilitar su manejo; posteriormente se indujo la precipitación con n-hexano, a una relación crudo:disolvente de 1:30 en volumen, bajo agitación constante, durante 6 h; seguidamente, se dejó en reposo para favorecer la decantación, durante 12 h. Una vez transcurrido este tiempo, se realizó la filtración atmosférica del sistema y el sólido asfáltico obtenido fue pesado y secado, para pasar a una extracción en caliente Soxhlet, empleando n-hexano, con la finalidad de remover la fracción de resinas I, que habían coprecipitado con los asfaltenos; el proceso culminó al observar el disolvente incoloro en la cámara de extracción de la unidad Soxhlet. Posterior a esta etapa, la disolución obtenida se sometió a rotoevaporación, para obtener la muestra de resinas I correspondiente, para su cuantificación y almacenaje.

2.2.2. Medición de la tensión interfacial por el método de la gota colgante

Todas las mediciones se realizaron en un tensiómetro de gota colgante, construido en la Universidad Central de Venezuela, el cual cuenta con un software para procesamiento de las imágenes y resolución de los cálculos correspondientes. Antes de tomar las lecturas de tensión interfacial, se prepararon disoluciones madre, partiendo de todas las muestras de resinas I, en tolueno previamente saturado con agua destilada, a una concentración de 4000 mg/L, para el caso de las muestras iniciales, mientras que en el caso de las muestras ya purificadas, la concentración de las disoluciones madre fue de 8500 mg/L. Seguidamente se hizo un barrido preliminar de concentraciones, para las medidas piloto, con las cuales se quería ubicar el intervalo de concentraciones que permitiesen apreciar los cambios en la tensión interfacial de las distintas muestras. Para ello se prepararon 2 disoluciones, partiendo de la inicial, en cada caso se midió su densidad, usando un picnómetro, finalmente se procedió a medir su tensión interfacial, en medio acuoso. Con estos valores se precisó el intervalo

de concentraciones de trabajo, se prepararon todas las disoluciones por dilución de la inicial y en cada uno de los casos se midió también su densidad, usando el picnómetro. Posteriormente, al igual que en el caso de las disoluciones piloto, se evaluó la tensión interfacial de cada una de las disoluciones en el medio acuoso, siguiendo el procedimiento del equipo.

2.2.3. Purificación o sub fraccionamiento de las muestras de resinas I por cromatografía de elución en columna.

El proceso se llevó a cabo usando columnas cromatográficas de vidrio, de 860mm de longitud y un diámetro interno de 14mm, con sílice gel como fase estacionaria, en una relación másica de sílice gel:muestra de 30:1. Inicialmente se realizó la activación del sílice gel, manteniéndolo a 140°C durante 24h; posteriormente, se llenó cuidadosamente la columna cromatográfica con la fase estacionaria, eliminando burbujas y posibles espacios vacíos, recirculando n-hexano en esta etapa, para evitar fenómenos de canalización durante el proceso de separación, los cuales entorpecerían el fenómeno de transferencia de masa; además, la válvula de descarga se mantuvo en una apertura aproximada del 50 %, que permitió un tiempo de residencia suficiente para obtener la elución de las fracciones correspondientes. Se pesó ($0,5000 \pm 0,0001$)g de la muestra de resinas I correspondiente, se solubilizó en n-hexano debido a su alta viscosidad y se inyectó en el tope de la columna; posterior a la inyección de la muestra, se comenzó a recolectar el disolvente eluído por el fondo de la misma. Durante la recolección de la primera pseudo familia de componentes, se verificó constantemente con la ayuda de una lámpara de rayos UV-vis, para detectar el cambio hacia la fracción de aromáticos y empezar la recolección de éstos en forma separada; esta distinción entre fracciones se hizo empleando la capacidad de absorción de luz en el espectro UV-vis que tienen los aromáticos. Al iniciar la recolección de éstos por el fondo de la columna, se empezó a alimentar el tope de la misma con mezclas n-hexano/tolueno, a objeto de no generar cambios bruscos de disolvente en su interior y a medida que se avanzó en el

proceso, las mezclas se enriquecieron en tolueno, hasta inyectar solamente este último disolvente. La última fracción, de resinas, se comenzó a recolectar al visualizar el cambio de coloración en el solvente eluído al fondo de la columna, hacia un tono marrón oscuro, asociado típicamente con las resinas del petróleo; a partir de esa etapa se comenzó a alimentar el tope de la columna cromatográfica con mezclas de tolueno y metanol, enriqueciendo poco a poco en este último, para generar la desorción de las resinas desde la fase estacionaria de sílice gel hasta el final del proceso. Luego, todas las fracciones separadas fueron concentradas por rotoevaporación, recuperados los disolventes correspondientes, cuantificadas y almacenadas, especialmente la sub fracción de resinas, la cual fue empleada posteriormente durante la investigación.

3. Análisis y discusión de resultados

Inicialmente se elaboraron las curvas de tensión interfacial en función de la concentración, para las disoluciones de cada una de las muestras de resinas I, con la finalidad de evaluar el comportamiento de éstas y realizar las comparaciones necesarias. La Figura 1 presenta la variación de la tensión interfacial de las disoluciones de resinas I, en función de su concentración.

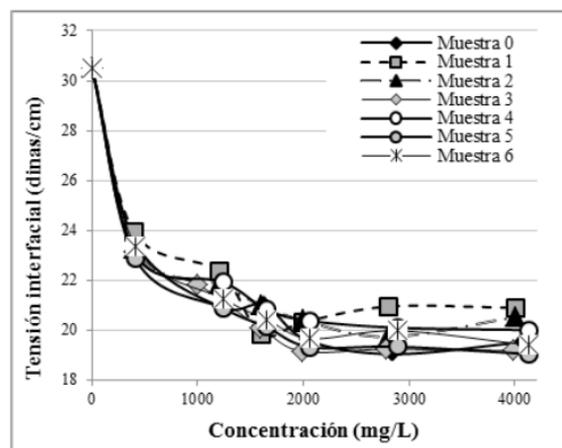


Figura 1: Variación de la tensión interfacial de las disoluciones de resinas I en función de su concentración.

En la Figura 1 puede apreciarse que las distintas curvas presentan tendencias similares,

con disminución de la variable tensión interfacial, a medida que aumenta la concentración de las disoluciones, hasta alcanzar mínimos en torno a las 19 dinas/cm. Esta tendencia en las curvas experimentales, se ajusta a aquella que presentan normalmente las curvas de tensión interfacial frente a la concentración, en moléculas tensoactivas, debido al fenómeno superficial que ocurre: a bajas concentraciones, las moléculas del surfactante se adsorben en la interfase de las dos fases líquidas inmiscibles, o en la superficie, cuando una de las dos fases es gaseosa; con esta acumulación del surfactante en la interfase, la variable tensión interfacial disminuye hasta alcanzar un valor a partir del cual, no hay más variaciones en esta variable, debido a que la interfase se encuentra saturada, con lo cual se identifica la concentración micelar crítica, identificada como CMC [27]. De manera específica, el menor valor experimental de tensión interfacial se obtuvo con la muestra 5.

Por otra parte, las leves diferencias halladas en las distintas curvas experimentales mostradas en la Figura 1, correspondientes a las muestras 1 a la 6, con respecto a la muestra 0 (patrón sin mejorar), sugieren que los procesos de mejoramiento por HT que se aplicaron sobre el crudo Mora, podrían haber tenido algunos efectos sobre las propiedades dispersantes de las muestras de resinas I bajo análisis.

La generación de estas curvas de tensión interfacial, particularmente en su forma logarítmica, mostrada en la Figura 2, fue la herramienta para calcular la concentración micelar crítica (CMC) en cada una de las muestras de trabajo, ya que a través de esta variable, como se ha mencionado anteriormente, se puede evidenciar y cuantificar el carácter dispersante presente en las mismas, además de poder establecer las diferencias entre sus posibles propiedades tensoactivas.

Así, se presenta la Tabla 2, con los resultados del CMC calculado por cada muestra, junto con la tensión interfacial estimada, correspondiente a dicho punto.

En la Tabla 2 puede apreciarse que los valores de concentración micelar crítica (CMC) de las muestras, presentaron diferencias sustanciales,

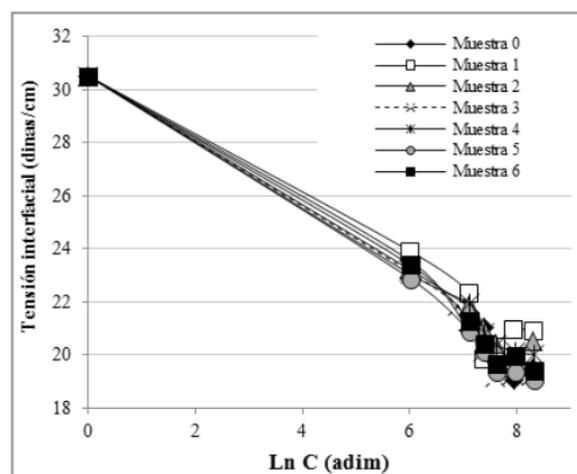


Figura 2: Variación de la tensión interfacial de las disoluciones de resinas I, en función de su concentración (logarítmica).

Tabla 2: Concentración micelar crítica (CMC) calculada para las disoluciones de resinas I

| Muestra | CMC (mg/L) | Tensión interfacial (dinas/cm) |
|---------|------------|--------------------------------|
| 0 | 6488 | 19,29 |
| 1 | 2579 | 20,66 |
| 2 | 3682 | 20,28 |
| 3 | 5481 | 19,22 |
| 4 | 4621 | 19,93 |
| 5 | 4841 | 19,04 |
| 6 | 4963 | 19,48 |

siendo que en todas las muestras provenientes del crudo mejorado (HT), se obtuvieron valores menores en su CMC (muestras 1 a la 6), con respecto a la muestra de resinas I proveniente del crudo sin mejorar (0), lo cual indica que el mejoramiento por HT significó una alteración en sus propiedades surfactantes, para todos los casos de esta investigación. Sin embargo, la tensión interfacial calculada en el CMC para las distintas muestras, se mantuvo sin variaciones significativas, con lo cual se puede inferir que, las micelas formadas por las resinas analizadas, presentan distintos tamaños, variando entonces la cantidad requerida de éstas para saturar la interfase tolueno-agua, hecho que es notable a través de las diferencias observadas en su CMC.

El estudio del comportamiento surfactante en

las sustancias ha permitido relacionar un mayor valor de CMC con una mejor actividad surfactante (fuente); en base a esta aseveración, la muestra 1 tuvo un menor CMC (2579 mg/L), mientras que el patrón o muestra 0 reflejó el mayor valor del conjunto (6488 mg/L), con lo que se puede concluir a través de este análisis que la muestra de resinas I proveniente del crudo Mora sin mejorar, presentó una menor actividad tensoactiva con respecto a las muestras provenientes del crudo mejorado. Sin embargo, las concentraciones de CMC calculadas en la presente investigación, pueden considerarse elevadas al comparar con resultados de otras investigaciones similares [25], donde los valores de CMC en disoluciones de resinas II asociadas a un crudo pesado y mejorado por HT, fueron en todos los casos menores a 1000 mg/L, lo que sugiere que las muestras analizadas en este caso, podrían no tener una actividad dispersante suficientemente apreciable, o que dentro de las mismas habría presencia de especies que interfieren con las propiedades dispersantes esperadas en las resinas asociadas al crudo.

Para analizar mejor este fenómeno, se recuerdan las definiciones operacionales que permiten distinguir típicamente las llamadas resinas I, con respecto a las resinas II: las resinas I representan la fracción que queda atrapada en el precipitado asfáltico cuando se agrega un exceso de parafina al crudo [28], mientras que las llamadas resinas II, constituyen la fracción de resinas que está presente en los maltenos separados por esta precipitación inducida [24]. Con base en estas definiciones, se presenta la hipótesis de que las resinas I, son esencialmente maltenos que han quedado atrapados entre los sólidos asfálticos durante el fraccionamiento primario del crudo, debido a la precipitación [21], por lo cual esta fracción contendría internamente las mismas pseudo familias de compuestos asociadas típicamente a los maltenos: saturados, aromáticos y resinas.

De acuerdo a las definiciones anteriores, de tipo operacional, las resinas I son esencialmente maltenos que quedan atrapados dentro de los sólidos asfálticos, en el fraccionamiento primario del crudo, debido a la precipitación, por

lo cual esta fracción contendría internamente las mismas pseudo familias de compuestos que se asocian a los maltenos: saturados, aromáticos y resinas. Así, la presencia de fracciones de saturados y aromáticos en las muestras de resinas I, podría ser entonces un posible factor clave, que afecte negativamente las propiedades dispersantes encontradas en dichas muestras, lo que se apreció en los valores determinados de sus CMC. Para verificar esta hipótesis, se realizó el proceso de purificación por cromatografía de elución en columna, planteado en la sección 2.2, sobre las muestras 0, 2 y 5, por considerarlas representativas dentro del conjunto analizado: el blanco o muestra patrón (muestra 0), la muestra proveniente del crudo HT con catalizador $Ni_2B/\gamma Al_2O_3$ (muestra 2) y la muestra proveniente del crudo HT con catalizador comercial (muestra 5). Los resultados de esta purificación se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Resultados del proceso de purificación en muestras seleccionadas de resinas I por cromatografía de elución en columna

| Muestra | Composición másica (Comp \pm 1) | | |
|---------|-----------------------------------|------------|---------|
| | % m/m | | |
| | Saturados | Aromáticos | Resinas |
| 0 | 10 | 58 | 32 |
| 2 | 18 | 32 | 50 |
| 5 | 24 | 47 | 29 |

A través de los resultados presentados en la Tabla 3, se puede apreciar que en todas las muestras de resinas I, que fueron purificadas por cromatografía de elución en columna, se encuentran presentes los saturados, los aromáticos y las resinas, en composiciones apreciables y variables en todos los casos. Además, la fracción de resinas purificadas no excedió el 50 % másico, mientras que en el caso de los aromáticos, se alcanzó un máximo para el conjunto de 58 % en el caso de la muestra 2. A la luz de estos resultados, mas la definición y la naturaleza de las fracciones de saturados y aromáticos, puede inferirse que las complejas interacciones de estas pseudo familias en las muestras de resinas I afectarían el comportamiento surfactante natural

que presentan las resinas en un crudo.

Las mediciones de tensión interfacial de las resinas sub fraccionadas se llevaron a curvas en función de la concentración de las disoluciones, con el objeto de calcular nuevamente el CMC. La Figura 3 presenta la variación de la tensión interfacial en las muestras analizadas: patrón (muestra 0), HT con catalizador $Ni_2B/\gamma Al_2O_3$ (muestra 2) y HT con catalizador comercial $Ni-Mo/\gamma Al_2O_3$ (muestra 5).

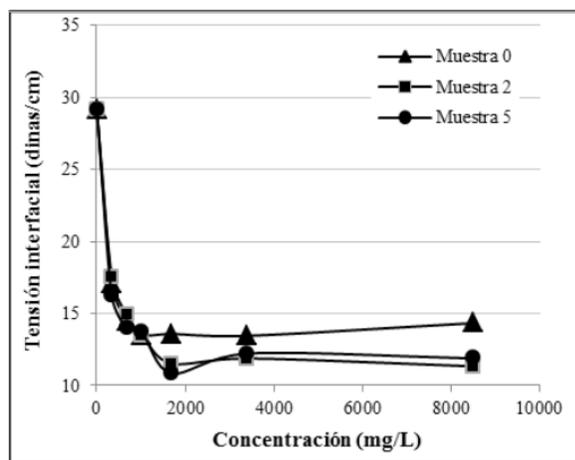


Figura 3: Variación de la tensión interfacial de las disoluciones de resinas I en función de la concentración, para las muestras sub fraccionadas 0, 2 y 5.

En la Figura 3 puede apreciarse que en todas las curvas se registró un descenso de la tensión interfacial a concentraciones más bajas que el observado en las curvas de la Figura 1, además, la tensión interfacial tuvo convergencia hasta valores en el intervalo de 10 a 15 dinas/cm, a diferencia de la primera fase de mediciones, donde la convergencia obtenida fue en el intervalo de 19 a 20 dinas/cm. Ambos hechos son indicadores de cambios en el comportamiento dispersante de las muestras de resinas, producto del proceso de purificación aplicado sobre éstas; el cambio de pendiente en la recta a concentraciones más bajas ayuda a inferir menores valores del CMC, lo cual también se asocia a un mejor comportamiento dispersante [27].

Las Figuras 4, 5 y 6 presentan las curvas de variación de la tensión interfacial como función

de la concentración de las disoluciones, para las muestras 0, 2 y 5 respectivamente, colocando en cada caso las dos mediciones: las resinas I sin purificar y muestras de resinas I luego de la purificación o sub fraccionamiento, con el objeto de visualizar mejor los cambios en la tensión interfacial, producto de esta purificación.

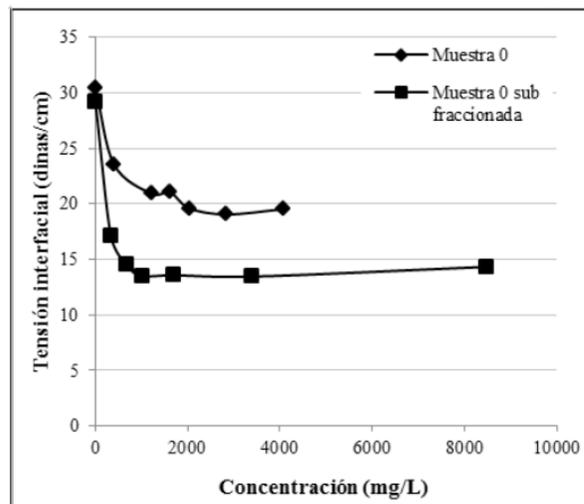


Figura 4: Variación de la tensión interfacial en función de la concentración para la muestra 0 (patrón) antes y después de la purificación.

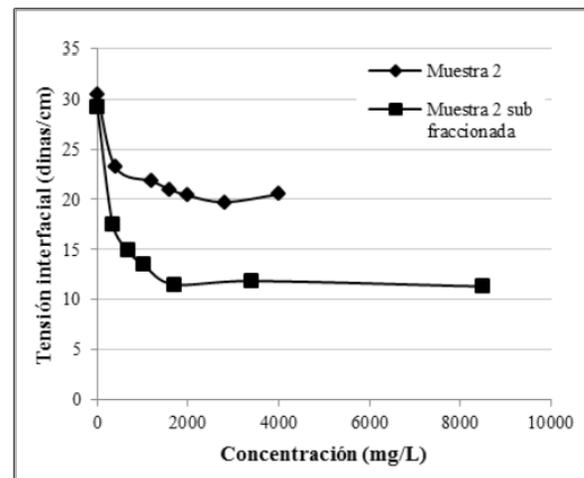


Figura 5: Variación de la tensión interfacial en función de la concentración para la muestra 2 antes y después de la purificación.

En las Figuras 4, 5 y 6 puede apreciarse que hay grandes variaciones entre la variable tensión interfacial para las disoluciones de resinas I antes y

después del sub fraccionamiento; el mayor cambio lo reflejaron las muestras 2 y 5, con diferencias de hasta 10 dinas/cm entre ambas curvas, para una misma concentración de disoluciones. Por otra parte, las muestras purificadas alcanzaron valores de equilibrio en su tensión interfacial, a concentraciones más bajas que en las muestras correspondientes sin purificar, lo cual hizo inferir sobre cambios favorables en su CMC.

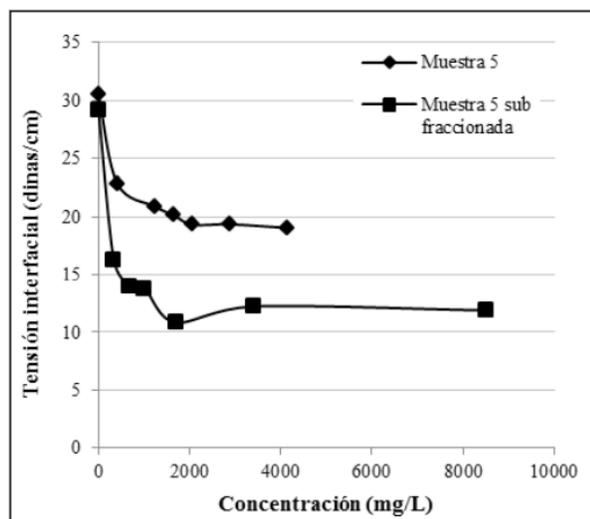


Figura 6: Variación de la tensión interfacial en función de la concentración para la muestra 5 antes y después de la purificación.

Por otra parte, al comparar las muestras 2 y 5 purificadas, con respecto a la muestra 0, también purificada, se observó que la tensión interfacial que alcanzaron las muestras 2 y 5 en el equilibrio, fue menor que el valor alcanzado por la muestra patrón (0), hecho que indica entonces, que los procesos de mejoramiento a que fueron sometidas las muestras de crudo Mora, pudieron haber tenido incidencia positiva sobre las propiedades tensoactivas de las resinas I sub fraccionadas.

Posteriormente se procedió a calcular gráficamente el CMC para cada una de las muestras de resinas purificadas, el cual se presenta en la Tabla 4.

Los resultados de la Tabla 4 muestran disminución frente a los CMC correspondientes de la Tabla 2, reforzando el comportamiento observado en las curvas de tensión interfacial en función de la concentración, con lo cual la purificación o sub fraccionamiento de las muestras

Tabla 4: Concentración micelar crítica para las muestras de resinas sub fraccionadas

| Muestra | CMC (mg/L) | Tensión interfacial (dinas/cm) |
|---------|------------|--------------------------------|
| 0 | 1335 | 13,28 |
| 2 | 3280 | 11,59 |
| 5 | 2559 | 11,42 |

de resinas I significó una mejora en sus propiedades dispersantes observadas por medio de los ensayos de tensión interfacial, debido a que fueron separados sus saturados y aromáticos asociados a la fracción de resinas I. Con estos resultados se prueba entonces que, para el crudo Mora, la pseudo familia de resinas I, de acuerdo a su definición operacional, presenta un comportamiento similar a los maltenos en cuanto a su composición, con presencia de saturados, aromáticos y resinas, las cuales modifican notablemente sus propiedades interfaciales, punto que ha sido evidenciado a través de la medición y análisis de su tensión interfacial y la determinación de sus CMC para las distintas muestras. Como nota adicional, se pudo evidenciar, por medio de estos ensayos de tensión interfacial sobre disoluciones de las resinas I purificadas, que éstas mostraron excelentes propiedades interfaciales y una menor concentración requerida para llegar al equilibrio.

4. Conclusiones

De acuerdo al primer ciclo de evaluación de tensión interfacial, las muestras de resinas I no presentaron cambios significativos al comparar las distintas curvas de tensión interfacial en función de la concentración de las disoluciones correspondientes. Sin embargo, los valores calculados de CMC para las muestras de resinas I, provenientes del crudo Mora mejorado por hidrotreamiento (HT), presentaron valores menores que la muestra patrón, proveniente del crudo sin mejorar (muestra 0). En base al comportamiento de la tensión interfacial en función de la concentración, para las muestras purificadas pudo evidenciarse que los procesos de hidrotreamiento incidieron sobre el comportamiento tensoactivo registrado por

las muestras de resinas I, consideradas en esta investigación. Las muestras de resinas I analizadas, al pasar por procesos de purificación con el método de cromatografía de elución en columna, presentaron composiciones de saturados, aromáticos y resinas, comprobando, para el caso del crudo Mora, la hipótesis de que las llamadas resinas I, dada su definición operacional, se comportan como maltenos en cuanto a su composición. Finalmente, la comparación de la variable tensión interfacial y el CMC en las muestras antes y después de la purificación, permitió comprobar que el proceso de sub fraccionamiento por cromatografía de elución en columna, mejoró notablemente las propiedades tensoactivas de las muestras evaluadas.

5. Referencias

- [1] J. Ancheyta and J. Speight. *Hydroprocessing of heavy oils and residua*. CRC Press, Florida, USA, 2017.
- [2] K. Leontaritis, J. Amaefule, and R. Charles. A systematic approach for the prevention and treatment of formation damage caused by asphaltene deposition. *SPE Production & Facilities*, 9(3):157–164, 1994.
- [3] M. Absi-Halabi, A. Stanislaus, and D. Trimm. Coke formation on catalyst during the hydroprocessing of heavy oils. *Applied Catalysis*, 72(2):193–215, 1991.
- [4] B. Borges, E. Del Carpio, C. Urbina de Navarro y N. Ortega. Caracterización morfológica y espectroscópica de asfaltenos provenientes de diferentes crudos. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 34(2):218–229, 2014.
- [5] B. Zhao, M. Becerra, and J.M. Shaw. On asphaltene and resin association in Athabasca bitumen and Maya crude oil. *Energy Fuels* 2009, 23(9):4431–4437, 2009.
- [6] L. Alcázar-Vara, L. Zamudio-Rivera, and E. Buenrostro-González. Effect of asphaltenes and resins on asphaltene aggregation inhibition, rheological behavior and waterflood oil recovery. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 37(11):1544–1554, 2016.
- [7] P. Spiecker, K. Gawrys, C. Trail, and P. Kilpatrick. Effects of petroleum resins on asphaltene aggregation and water-in-oil emulsion formation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 220(1):9–27, 2003.
- [8] O. León, E. Contreras, E. Rogel, G. Dambakli, J. Espidel, and S. Acevedo. The influence of the adsorption of amphiphiles and resins in controlling asphaltene flocculation. *Energy Fuels*, 15(5):1028–1032, 2001.
- [9] J. Douda, M. Llanos, R. Alvarez, and J. Navarrete. Structure of Maya asphaltene-resin complexes through the analysis of Soxhlet extracted fractions. *Energy Fuels*, 18(3):736–742, 2004.
- [10] S. Andersen and J. Speight. Petroleum resins: separation, character and role in petroleum. *Petroleum Science and Technology*, 19(1):1–34, 2001.
- [11] J. Speight. *The Chemistry and Technology of Petroleum*. CRC Press, Florida, USA, fourth edition, 2007.
- [12] A. Firoozabadi. *Thermodynamics of hydrocarbon reservoirs*. McGraw-Hill, Washington, USA, 1999.
- [13] A. Firoozabadi and L. Goual. Effect of resins and DBSA on asphaltene precipitation from petroleum fluids. *American Institute of Chemical Engineers Journal*, 50(2):470–479, 2004.
- [14] ASTM International. ASTM D-6560-12. Standard test method for determination of asphaltenes (heptane insolubles) in crude petroleum and petroleum products, 2012.
- [15] V. Valbuena, L. De Lima y M. Ranaudo. Obtención y caracterización molecular de resinas tipo I y resinas tipo II de crudos venezolanos. *Revista Ingeniería UC*, 19(2):25–34, 2012.
- [16] L. Navarro, M. Alvarez, J. Grosso y U. Navarro. Separación y caracterización de resinas y asfaltenos provenientes del crudo Castilla. Evaluación de su interacción molecular. *Ciencia, Tecnología y Futuro*, 2(5):53–67, 2004.
- [17] D. Padilla y K. Watt. Precipitación de asfaltenos: técnicas de predicción y control. Trabajo de grado no publicado, Universidad de San Buenaventura, Cartagena, 2015.
- [18] S. Pinzón y J. Rojas. Evaluación de métodos convencionales y no convencionales para la remediación e inhibición de la precipitación de parafinas en pozos de petróleo. Trabajo de grado no publicado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2006.
- [19] E. Ghouloum, M. Al-Qahtani, and A. Al-Rashid. Effect of inhibitors on asphaltene precipitation for Marrat Kuwaiti reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 70(1):99–106, 2010.
- [20] A. Rodríguez y S. Gaspar. Evaluación de la resina de aceite de árbol (*Copaifera Officinalis*) como agente dispersante de asfaltenos. Trabajo de grado no publicado, Universidad de Oriente, Venezuela, 2012.
- [21] B. Gutiérrez. Evaluación de las propiedades dispersantes de las resinas (I) modificadas, provenientes del crudo Mora hidrotratado sobre los asfaltenos a nivel de laboratorio. Trabajo de maestría no publicado, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2017.
- [22] Y. Villard, F. Fajardo, and A. Milne. Enhanced oil recovery using innovative asphaltene inhibitors in East Venezuela. In *SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control*, Lafayette, Louisiana, USA, February 2016.

- [23] F. Llanos y M. Pirona. Evaluación de los efectos dispersantes de las resinas modificadas obtenidas del crudo Ayacucho hidrotratado a diferentes temperaturas. Trabajo de grado no publicado, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2014.
- [24] E. Medina. Estudio del efecto de las resinas I y II como agente estabilizante de los asfaltenos en solución. Trabajo de grado no publicado, Universidad Central de Venezuela, Venezuela, 2009.
- [25] D. Secuiiu. Estudio de las resinas modificadas producto del hidrotratamiento del crudo Carabobo como posible dispersante de los asfaltenos. Trabajo de grado no publicado, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2008.
- [26] ASTM International. ASTM D-2007-11. Standard test method for characteristic groups in rubber extender and processing oils and other petroleum-derived oils by the clay-gel adsorption chromatographic method, 2011.
- [27] M. Rosen and J. Kunjappu. *Surfactants and interfacial phenomena*. JohnWiley & Sons, Inc., Hoboken, 4th edition, 2012.
- [28] N. Carnahan, J. Salager, R. Antón, and A. Dávila. Properties of resins extracted from Boscan crude oil and their effect on the stability of asphaltenes in Boscan and Hamaca crude oils. *Energy & Fuels*, 13(2):309–314, 1999.

Comparison of three methods in the analysis of hydrometeorological droughts in the Ilave River basin Puno - Perú

Lorenzo G. Cieza Coronel^{*,a}, Jesús Abel Mejía Marcacuzco^b

^aUniversidad Nacional Agraria La Molina, Escuela de Post Grado, Doctorado Recursos Hídricos, Perú, Cel: 051-969370551.

^bInstituto Hidrología Aplicada y Medio Ambiente (IHAMA), Lima, Perú.

Abstract.- In this study, three methods were analyzed (SPI, Run, extreme values) it was observed that the meteorological and hydrological drought, are directly related, given that, if there is not enough rainfall, there is no surface runoff. The SPI, represents the number of standard deviations of the precipitation fall over a period, with respect to the average; for which historical precipitation is first standardized; all successive negative values indicate the intensity and magnitude of the drought. Run method or succession analysis, has been proposed as an objective method, to identify periods of drought. The truncation series (D_t) was first obtained by deciding that this series would be formed by the arithmetic average of the water supply variable X_t (annual flow of the river Ilave). What we standardize and the negative values that are below the average (0) are associated as droughts, allowing us to determine the intensity and magnitude of this event. Extreme value method, the minimum flows were analyzed, being adjusted to the distribution functions Log Normal, Pearson type III and Gamma.

Keywords: rainfall; drought analysis; hydrometeorological droughts.

Comparación de tres métodos en el análisis de sequías hidrometeorológicas en la cuenca del Río Ilave Puno – Perú

Resumen.- En este estudio, se emplearon tres métodos (SPI, Run, valores extremos) para el análisis de las sequías, observándose que las de tipo meteorológica e hidrológica, están relacionadas directamente, dado que, de no existir de manera suficiente precipitaciones pluviales, no hay escurrimiento superficial. El SPI, representa el número de desviaciones estándar de la precipitación caída a lo largo de un período, respecto a la media; para lo cual la precipitación histórica primeramente se estandariza; posteriormente, todos los valores negativos sucesivos indican la intensidad y magnitud de la sequía. El método del run o análisis de sucesiones, ha sido propuesto como un método objetivo, para identificar los períodos de la sequía. Se obtuvo primeramente la serie de truncación (D_t), decidiendo que esta serie estaría formada por el promedio aritmético de la variable de la oferta de agua X_t (caudal anual del río Ilave). Lo cual fue estandarizado y los valores negativos que están por debajo del promedio (0) son asociados como sequías, permitiendo determinar la intensidad y magnitud de este evento. Por último, respecto al método de valores extremos, se analizaron los caudales mínimos, siendo ajustado a las funciones de distribución Log Normal, Pearson tipo III y Gamma.

Palabras claves: precipitación pluvial; análisis de sequías; sequías hidrometeorológicas.

Recibido: 02 febrero 2018

Aceptado: 25 febrero 2019

1. Introducción

Las sequías son fenómenos de relativa complejidad que afectan de manera importante el desarrollo y aprovechamiento de los recursos hídricos en

una región, entendiéndose como sequía a períodos prolongados de escasez de recursos hídricos capaces de provocar efectos adversos sobre la sociedad o los sistemas productivos [1]. Tienen la particularidad de ser, de lento desarrollo y amplia cobertura espacial, lo que hace difícil precisar con exactitud su duración y extensión, dificultando la adopción oportuna de medidas concretas para prevenir sus efectos. La creciente demanda de agua y la pérdida de calidad del recurso, hacen que se presente especial atención a su uso óptimo, y por lo tanto que se estudien también cuidadosamente

*Autor para correspondencia:

Correo-e:lorenzocieza@hotmail.com (Lorenzo G. Cieza Coronel)

los caudales mínimos, para garantizar en el abastecimiento de agua a poblaciones, industria y agricultura, generación de hidroelectricidad, etc.; en el establecimiento de la relación entre los usos indicados y los eventos mínimos no bastan las técnicas estadísticas tradicionales (análisis de valores mínimos y curva de duración), más bien se requiere de predicciones sobre la probabilidad de ocurrencia de los eventos extremos mínimos de diferentes duraciones, creyendo conveniente hacer un análisis profundo de estos eventos para mitigar pérdidas económicas en la región y por ende al país.

En el Perú, el efecto negativo de las sequías, se deja sentir principalmente en dos regiones: la región de la costa norte, especialmente en los departamentos de Piura y Lambayeque, y la región sur, en el departamento de Puno.

La presencia de fuertes sequías en los últimos años en dichas regiones, han dado lugar a estudios y evaluaciones de este evento con el fin de prevenir estas anomalías, que tienen un impacto negativo en la economía regional y nacional.

2. Métodos

2.1. Identificación de variables

Los parámetros que se requieren en el análisis de sequías hidrometeorológicas son los siguientes:

- Caudal o volumen mínimo, mensual y anual de una serie de años.
- Precipitaciones mínimas, estación meteorológica Ilave.

Las variables seleccionadas son las precipitaciones promedio mensuales y los caudales anuales, que aplicados a modelos mencionados permiten obtener la variable dependiente.

2.2. Análisis de la información pluviométrica

La estación meteorológica considerada en el estudio ha sido seleccionada a partir de la información disponible por su longitud de su registro, así como su distribución espacial. El objetivo corresponde con utilizar las series de mayor longitud y abarcar la mayor área posible.

El período de análisis se definió desde el año 1957 hasta el 2015.

Se realizó el análisis exploratorio de la información pluviométrica y volumétrica, buscando la homogenización de la información histórica.

En la investigación se planteó usar tres métodos, con la finalidad de conocer, el método que mejor se ajuste a la realidad del altiplano.

2.3. Método del índice de precipitación estandarizada (SPI)

Para el cálculo del SPI, en la cuenca del río Ilave, se ha partido de la serie histórica acumulada de precipitaciones mensuales.

Para realizar el análisis del índice de precipitación estandarizada, se analizaron la suma de precipitaciones anuales desde 1957 hasta 2015, que hace un total de 58 años de datos; tomando como sequías de la serie de datos analizados los que se ubican por debajo del promedio de la serie original (0).

Se utilizó un ajuste de los datos de precipitación a través de la función de distribución de probabilidad tipo Gama. Este ajuste se realiza, para precipitación acumulada en diversas escalas de tiempo (3, 4 y 12 meses). Esto se realiza para cada sitio de la región de estudio. Posteriormente, la función es transformada en una distribución normal estandarizada y el valor obtenido corresponde al SPI.

Los valores positivos del SPI, indican una precipitación superior a la media y los valores negativos indican precipitaciones inferiores a la media. Dado que el SPI está normalizado, tanto los períodos húmedos como los secos se pueden representar de la misma manera, y aplicando este índice se puede hacer un seguimiento de cualquier período.

Según lo indicado, un período de sequía se establece cuando el SPI presenta una secuencia continua de valores negativos tales que estos sean iguales o menores a -1 , si bien se considera que este evento no llega a su fin hasta el momento en que dicho índice vuelva a tomar su valor positivo. Esta definición permite caracterizar cada período seco de acuerdo a su duración, intensidad y magnitud. La duración del evento lo determina la longitud del

período, en el que los valores del SPI cumplen las condiciones requeridas por dicha definición. La intensidad del mismo viene determinada, de la precipitación, por el máximo valor negativo a partir de -1, que el SPI alcance dentro del período seco analizado; finalmente, su magnitud, viene dada por la suma de los valores del SPI correspondientes a todos los meses comprendidos dentro del período seco considerado.

2.4. Método del Run

Para facilidad del análisis, es necesario adoptar una definición objetiva de sequía basado en los runs, lo cual permite una identificación clara de los índices de definición, una vez que las series de abastecimiento y demanda de agua son dadas.

Seleccionando un valor arbitrario de demanda D_t , la serie discreta de abastecimiento es truncada y dos nuevas series de desviaciones positivas y negativas son formadas. La secuencia de desviaciones negativas consecutivas, es llamada run negativo y este es asociado con una sequía; la secuencia de desviaciones positivas consecutivas es llamada run positivo y puede ser asociado con demasías [2].

Con referencia a la sequía meteorológica e hidrológica, en la aplicación de estos tres métodos para su análisis, los parámetros que serán medidos y definidos en forma individualizada son los siguientes:

1. Magnitud: el déficit acumulado de caudal o precipitación para la duración del período seco; o lo que es lo mismo la suma del run negativo, que es la suma de déficit individual, para una duración ininterrumpida de sequía [3, 4].
2. Duración: llamado también longitud del run negativo, es definido como el número de intervalos de tiempo consecutivos (tiempo total), durante el cual la serie histórica es negativa comparada con la demanda.
3. Intensidad: llamado también severidad de la sequía, mide la relación entre el caudal promedio y el caudal mínimo en una serie de años, se determina de acuerdo con la ecuación (1).

$$I = \frac{M}{D}, \quad (1)$$

donde:

I : intensidad(unidades).

D : duración(tiempo).

M : magnitud(unidades).

Los runs, de la secuencia de una variable estocástica, o una combinación de componentes, determinísticas y estocásticas, pueden ser definidos considerando básicamente el abastecimiento y las demandas.

El proceso de abastecimiento puede ser la precipitación, las descargas, humedad en el suelo, almacenamiento de aguas en un acuífero o reservorio y similares variables hidrológicas, los que son procesos estocásticos estacionarios dependientes o independientes en el tiempo.

El proceso de demanda o nivel de truncamiento; puede ser de propósito simple de uso de agua, tal como agua potable, industrias, agricultura, energía, etc. o puede ser de propósito múltiple que resulta combinando dos o más usos de agua. Sea X_t , una serie de abastecimiento de agua anual, con $t = 1, 2, 3, \dots, n$; siendo n , el número de años de la serie [2].

2.5. Nivel de truncamiento

La selección del nivel de truncación es de crucial importancia, ya que de este parámetro depende la longitud y magnitud de la sequía crítica.

En la mayoría de los casos, el nivel de truncación es tomado igual a la media del proceso histórico de análisis, lo cual tiene mucha ventaja [5]. En otros casos se utiliza la mediana, o también una proporción de la media del abastecimiento, y en otros es considerado como una función de la media y desviación estándar del abastecimiento según la ecuación (2).

$$D_t = \bar{X} + \alpha S, \quad (2)$$

donde:

D_t : nivel de truncación de la serie.

\bar{X} : media del abastecimiento.

S : desviación estándar de X_t

$\alpha = -0,2$

2.5.1. Análisis de la sequía crítica

El método del run, en esta oportunidad se está aplicando al caudal total anual del río Ilave, donde se analiza la serie histórica, que está por debajo del promedio, y lo asociamos como sequía, de donde identificamos la sequía crítica, en un determinado período de tiempo; para el análisis se ha seguido el siguiente orden.

1. El abastecimiento de agua (X_t), representado por el caudal total anual (m^3/s), se estandariza a partir de la ecuación (3).

$$Z = \frac{X_t - \bar{X}}{S}, \quad (3)$$

donde:

Z : Serie del abastecimiento anual estandarizado, vale decir con media cero y desviación estándar la unidad

X_t : Abastecimiento (m^3/s).

\bar{X} : Promedio del abastecimiento anual (m^3/s).

S : desviación estándar del abastecimiento (m^3/s).

2. Se fija el nivel de demanda de agua anual, optando por la media del abastecimiento, según la ecuación (4):

$$D_t = \bar{X}_t, \quad (4)$$

donde:

D_t : nivel de truncamiento de la serie.

3. El abastecimiento estandarizado, así como la demanda se grafican, ubicando en el eje de las ordenadas al abastecimiento y la demanda y el tiempo en años, se ubica en el eje de las abscisas, obteniendo los runs positivos y negativos (sequías)
4. De la figura se determina las características de la sequía crítica que son:

- Duración de la sequía crítica (D_C), lo cual es igual a la longitud máxima del run negativo en años.
- Magnitud o severidad de la sequía crítica (M_C) que es igual a la suma total del run negativo en la longitud máxima determinada.
- Intensidad de la sequía crítica (I_C) que viene a ser la relación existente entre la magnitud crítica y la duración crítica.

2.5.2. Modelamiento matemático

El desarrollo de modelos matemáticos para la descripción de series hidrológicas y la estimación de parámetros de estos modelos, según la primera hipótesis de Yevjevich [6] que dice: “una serie hidrológica continua en el tiempo está conformada por componentes determinísticos en la forma de parámetros periódicos o constantes y de una componente estocástica”, se representa a través de la ecuación (5):

$$X_t = m_x + S_x \cdot Z_t, \quad (5)$$

donde:

X_t : serie hidrológica anual sin saltos ni tendencias en el año t .

m_x : promedio general de la serie.

S_x : desviación estándar de la serie.

Z_t : componente estocástica dependiente o independiente.

$t = 1, 2, \dots, n$, n es el número total de años del registro.

La componente estocástica (Z_t), es la estandarización de la serie hidrológica, puede ser dependiente o independiente; se dice que el proceso Z_t es linealmente dependiente si sus valores sucesivos están relacionados por cualquier modelo matemático lineal [6].

2.5.3. Cálculo de la componente estocástica (Z_t)

La componente estocástica o residual Z_t es obtenida restando el promedio y dividiendo por la desviación estándar, obteniendo la expresión en la ecuación (6):

$$Z_t = \frac{X_t - m_t}{S_t}. \quad (6)$$

Este proceso estandarizado (media cero y desviación estándar la unidad) puede o no ser independiente.

2.5.4. Prueba de independencia de Z_t

Para probar la independencia de Z_t , se utiliza el análisis de correlograma. El correlograma se define como una función entre los coeficientes de correlación serial ρ_k como ordenadas y el retardo o desfase k como abscisas. La función

de auto correlación es definida como la expresión matemática que describe analíticamente a las secuencias de valores continuos o de valores discretos y es usada para determinar la dependencia entre los valores sucesivos de la serie [6].

El coeficiente de auto correlación se define como la razón de la covarianza poblacional y la raíz cuadrada del producto de dos varianzas poblacionales, según la ecuación (7) [6].

$$\rho_k = \frac{COV(Z_t Z_{t \pm k})}{VAR(Z_t) VAR(Z_{t \pm k})^{1/2}}, \quad (7)$$

donde:

Z_{tk} = significa un desfase de k periodos, hacia adelante (+) o hacia atrás (-)

En este caso es necesario representar la dependencia de la componente estocástica Z_t , para lo cual utilizaremos los modelos auto regresivo o Markovianos de un orden adecuado [2].

2.5.5. Generación de descargas

La aplicación del modelo, según la ecuación (5), permite generar series de descargas anuales, siendo necesario utilizar parámetros de la serie de datos históricos: media y desviación estándar y valores de la variable estocástica independiente: números aleatorios normales (0,1)

2.6. Método de valores extremos

Si se puede demostrar que una muestra de sequías se distribuye normalmente, entonces sería posible extrapolar para obtener estimaciones de frecuencia de sequías en el extremo inferior del rango. Este método no es tan confiable para calcular valores exactos.

Esta técnica asume que la serie de caudales mínimos disponibles constituye una muestra de una población desconocida formada por todos los valores extremos pasados y futuros. Por lo tanto, parte del criterio que dicha muestra, siempre que sea de una longitud suficiente, posee la misma función de distribución de frecuencia que la población a la que se supone pertenece. De este modo se adapta una distribución teórica a la empírica de la serie observada, la misma que se usa a posteriori para extrapolaciones a eventos de probabilidades deseadas, de excedencia o no

excedencia. Otra condición básica para el uso de este tipo de modelos viene a ser la independencia de los valores observados, lo cual se cumple normalmente en series anuales o bianuales [7].

Cuando se usa la serie anual en el modelo de probabilidades existen una relación directa entre la probabilidad de excedencia y el período de retorno, quedando expresado a través de las ecuaciones (8) y (9).

$$P = 1 - P_e = \frac{1}{T}, \quad (8)$$

$$T = \frac{1}{P} = \frac{1}{1 - P_e}, \quad (9)$$

donde:

P : probabilidad de no excedencia

P_e : probabilidad de excedencia

T : periodo de retorno.

2.6.1. Selección de la variable aleatoria

En este caso se toma como variable aleatoria a los valores de caudal más pequeños dentro de un intervalo determinado (año, semestre, mes). Otras veces se escoge como eventos extremos al promedio mínimo de períodos mayores que un día (períodos secos de diferentes duraciones)

El procedimiento más indicado para construir la variable, consiste en tomar durante la estación seca de cada año los promedios móviles para el período deseado y extraer el más pequeño de ellos, el mismo que será la variable aleatoria (X).

2.6.2. Funciones de distribución de frecuencia

Las funciones de distribución de probabilidades que se usan en el análisis de frecuencia de los caudales mínimos, son en gran parte las mismas que se utilizan para el caso de los caudales máximos. Sin embargo, se recomienda elegir aquellas que solo toman valores iguales o mayores que cero, porque caudales negativos no tienen sentido físico. Lo que más interesa es la rama izquierda de la función [7].

2.6.3. Distribución empírica

Para el caso de eventos mínimos, como es el caso de sequías la más comúnmente usada es la función

de Weibull, dado por las ecuaciones (10) y (11):

$$P_e = \frac{m}{n + 1}, \quad (10)$$

$$P = \frac{n - m + 1}{n + 1}, \quad (11)$$

donde:

m: número de orden de la serie ordenada en forma creciente.

n: tamaño de la muestra (número de datos de la serie).

P: probabilidad de no excedencia.

P_e: probabilidad de excedencia.

2.6.4. Funciones teóricas de distribución de frecuencias

Las distribuciones más usadas en el análisis de frecuencia de los caudales mínimos son: Log – Normal, Pearson tipo III, Gamma, y de valores extremos tipo III.

3. Resultados

Los resultados obtenidos al aplicar la metodología (Precipitación estandarizada, método del run, y método de valores extremos) descrita en el desarrollo del trabajo consisten en:

3.1. Índice de precipitación estandarizada (SPI)

Para el análisis de esta metodología se utilizó como variables independientes las precipitaciones de 1,3, 6, 9 y 12 meses. Para lo cual se siguió el siguiente procedimiento:

- Primeramente, se homogeneizó la información, haciendo el respectivo análisis de consistencia, tanto en la media como en la desviación estándar
- Los datos históricos se ajustaron a una distribución teórica:

Este índice se calculó restando a la precipitación total de un determinado período, la media aritmética de ese período y dividiendo el resultado por la desviación típica. La estandarización de los valores, permite que los resultados presenten una distribución normal. Aunque este método permite

establecer comparaciones entre todo tipo de climas, se presentan problemas en aquellas regiones con una elevada variabilidad pluviométrica de tal forma que, si la media aritmética es inferior a la desviación típica, el índice nunca podrá alcanzar el valor -1. Tal es el caso en los valores anuales de regiones desérticas.

En la Figura 1, se aprecian las desviaciones estándar de la cantidad de precipitaciones pluviales de la estación Ilave desde 1 mes hasta 12 meses.

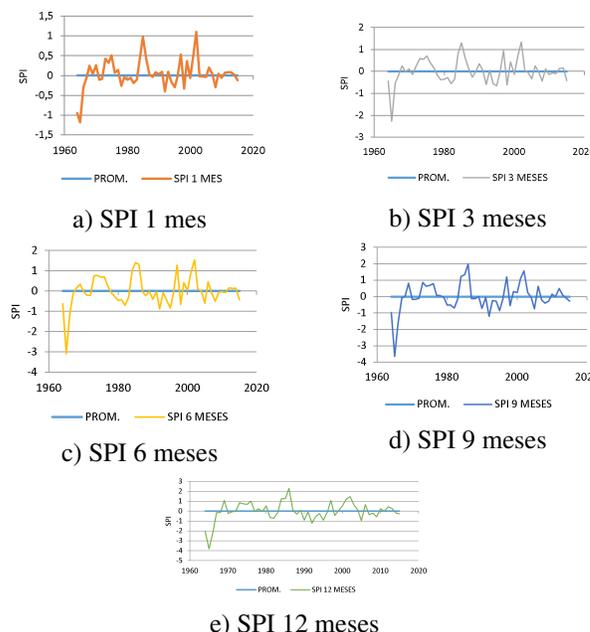


Figura 1: Variación del SPI, estación Ilave.

Los autores que diseñaron este índice, establecieron también el criterio para definir un período de sequía, según el cual, se dice que tiene lugar un período seco siempre y cuando el SPI presente una secuencia continua de valores negativos, tales que estos sean iguales o inferiores a -1, si bien se considera que este evento no llega a su fin hasta el momento en que dicho índice vuelva a tomar un valor positivo. Esta definición nos permite caracterizar cada período seco en la cuenca en estudio de acuerdo a su duración, intensidad y magnitud.

Las características de la sequía aplicando el método SPI, se aprecia en las Tablas 1, 2, 3 y 4.

En el método de índice de precipitación estandarizada (SPI) se analizaron las precipitaciones para 1 mes, 3 meses, 9 meses y 12 meses, la intensidad

Tabla 1: Características de la sequía, Método SPI 1 mes, estación Ilave.

| | Años | | | |
|------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 1964 | 1978 | 1994 | 2003 |
| | - | - | - | - |
| | 1967 | 1983 | 1996 | 2005 |
| Duración (años) | 4 | 6 | 3 | 3 |
| Magnitud (uni) | -2,47 | -0,77 | -0,49 | -0,09 |
| Intensidad (uni) | -1,18 | -0,26 | -0,17 | -0,04 |
| Int. Media (uni) | -0,61 | -0,13 | -0,60 | -0,03 |

Tabla 4: Características de la sequía, Método SPI 12 meses, estación Ilave.

| | Años | | | | |
|------------------|------|-------|------|------|------|
| | 1964 | 1970 | 1981 | 1990 | 2007 |
| | - | - | - | - | - |
| | 1968 | 1972 | 1983 | 1996 | 2009 |
| Duración (años) | 5 | 3 | 3 | 7 | 3 |
| Magnitud (uni) | 8,31 | 0,29 | 1,53 | 4,06 | 1,30 |
| Intensidad (uni) | 3,81 | 0,22 | 0,72 | 1,21 | 0,57 |
| Int. Media (uni) | 1,66 | 0,096 | 0,51 | 0,58 | 0,37 |

Tabla 2: Características de la sequía, Método SPI 3 mes, estación Ilave.

| | Años | | | |
|------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 1964 | 1998 | 1994 | 2010 |
| | - | - | - | - |
| | 1967 | 1983 | 1996 | 2012 |
| Duración (años) | 4 | 6 | 3 | 3 |
| Magnitud (uni) | -3,42 | -2,11 | -1,10 | 0,30 |
| Intensidad (uni) | -0,54 | -0,56 | -0,65 | -0,14 |
| Int. Media (uni) | -0,85 | -0,35 | -0,41 | -0,10 |

Tabla 5: Intensidad de la sequía y categoría según el índice (SPI) para precipitaciones con 1 mes, 9 meses y 12 meses.

| Años | Meses | | | Sequía |
|-------------|-------|-------|-------|----------|
| | 1 | 9 | 12 | |
| 1964 - 1967 | -1,18 | | | moderada |
| 1964 - 1967 | | -3,66 | | extrema |
| 1990 - 1996 | | -1,21 | | moderada |
| 1964 - 1968 | | | -3,81 | extrema |
| 1990 - 1996 | | | -1,21 | moderada |

Tabla 3: Características de la sequía, Método SPI 9 meses, estación Ilave.

| | Años | | | | |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1964 | 1970 | 1979 | 1990 | 2007 |
| | - | - | - | - | - |
| | 1967 | 1972 | 1983 | 1996 | 2009 |
| Duración (años) | 4 | 3 | 5 | 7 | 3 |
| Magnitud (uni) | -6,38 | -0,44 | -1,93 | -3,49 | -0,88 |
| Intensidad (uni) | -3,66 | -0,17 | -0,52 | -1,21 | -0,57 |
| Int. Media (uni) | -1,59 | -0,14 | -0,38 | -0,50 | -0,29 |

3.2. Método del run

Después de un análisis de las series históricas de caudales totales anuales del río Ilave, primeramente, la serie se homogeneizó y estandarizó, dando como resultado nuevas series de datos asociados como run negativo y run positivo; en este trabajo nos interesa analizar los runes negativos, que son los asociados a las sequías. Se analizó la serie histórica desde 1957 hasta el 2015, donde se ha podido apreciar seis eventos de sequías con características diferentes (Tabla 6), lo que se refleja en la Figura 2.

Con la aplicación del modelo, ecuación (5), se genera series de caudales futuros, se aprecia en la Tabla 7 y Figura 3.

3.2.1. Modelamiento matemático sequía crítica

La sequía es crítica cuando tiene mayor longitud; aplicando el modelo matemático, ecuación (5), para la serie de caudales anuales del río Ilave, se obtiene la ecuación (12):

de la sequía y la categoría según el índice (SPI), se aprecia en el Tabla 5.

Tabla 6: Características de las sequías históricas, método del run.

| | Años | | | | | |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 1957 | 1964 | 1975 | 1989 | 2003 | 2007 |
| | - | - | - | - | - | - |
| | 1961 | 1967 | 1983 | 2000 | 2005 | 2010 |
| Duración (años) | 5 | 4 | 5 | 8 | 3 | 4 |
| Magnitud (unidades) | 2,45 | 3,68 | 4,18 | 3,37 | 1,54 | 1,57 |
| Intensidad (unidades) | 0,49 | 0,92 | 0,83 | 0,67 | 0,51 | 0,39 |

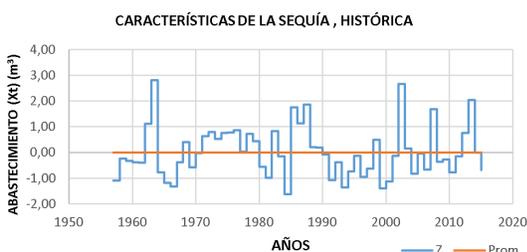


Figura 2: Determinación de la sequía, método del run.

Tabla 7: Característica de la sequía, en caudales generados, método del run.

| | Años | | | |
|-----------------------|------|------|------|------|
| | 1957 | 1966 | 1981 | 2010 |
| | - | - | - | - |
| | 1960 | 1969 | 1986 | 2014 |
| Duración (años) | 4 | 4 | 6 | 5 |
| Magnitud (unidades) | 2,52 | 2,83 | 3,61 | 4,75 |
| Intensidad (unidades) | 0,63 | 0,71 | 0,60 | 0,95 |

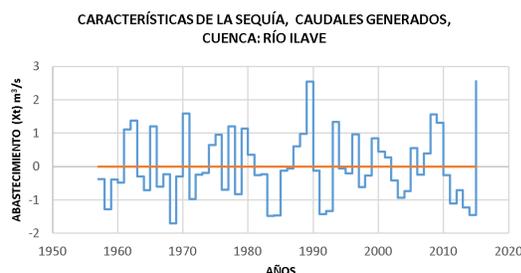


Figura 3: Determinación de la sequía, caudales generados, método del run.

$$X_t = 414,54 + 217,23Z_t \quad (12)$$

De acuerdo a la prueba de independencia de la variable estocástica Z_t , es independiente, por lo tanto, se generó una serie de caudales sin necesidad del modelo de Markov. Los parámetros, para el caudal generado son:

$$\text{Media anual} = 402,88 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Desviación estándar anual} = 223,37 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Coeficiente de variación} = 0,5544$$

3.3. Método de valores extremos

Los resultados de implementar el método de valores extremos se muestran en la Tabla 8, y han sido obtenidos de la aplicación de las ecuaciones (8),(9) y (10).

4. Conclusiones

De la aplicación de los tres métodos para determinar las características de las sequías hidrometeorológicas en la cuenca del río Ilave – Puno, se obtiene lo siguiente:

En cuanto a la relación que existe entre sequía meteorológica y sequía hidrológica; esta última depende directamente de la primera; al disminuir las precipitaciones pluviales, también disminuye el escurrimiento superficial y la recarga subterránea, disminuyendo el caudal del río en estudio.

En lo relativo a la relación que existe entre sequía meteorológica y sequía hidrológica; esta última depende directamente de la primera; al disminuir las precipitaciones pluviales, también disminuye el escurrimiento superficial y la recarga subterránea, disminuyendo el caudal del río en estudio.

Comparando los resultados de los métodos utilizados en el presente trabajo, los indicadores de sequías del método de Precipitación estandarizada (SPI), el método del run y el método de valores extremos, indican presencia de sequías en el tiempo y espacio obtenidos en los resultados; cada uno de los métodos reflejan presencia de eventos mínimos (sequías)

En el método del run luego de analizar los caudales totales del río Ilave; se encontró que los caudales tuvieron una tendencia de disminución por debajo de la demanda, en

Tabla 8: Caudales mínimos río Ilave.

| Años | Datos Históricos (m ³ /s) | Datos Generados (m ³ /s) | Probabilidad (%) | Periodo de retorno (años) |
|------|--------------------------------------|-------------------------------------|------------------|---------------------------|
| 1 | 60,55 | 80,81 | 2,7 | 5 |
| 2 | 110,36 | 107,45 | 5,4 | 4 |
| 3 | 116,22 | 127,15 | 0,8 | 4 |
| 4 | 124,77 | 143,44 | 10 | 3 |
| 5 | 156,20 | 157,64 | 13 | 3 |
| 6 | 166,95 | 170,40 | 16 | 3 |
| 7 | 177,81 | 182,12 | 18 | 3 |
| 8 | 182,43 | 193,03 | 21 | 2 |
| 9 | 200,49 | 203,31 | 24 | 2 |
| 10 | 202,00 | 213,06 | 27 | 2 |
| 11 | 208,26 | 22,39 | 29 | 2 |
| 12 | 233,84 | 231,37 | 32 | 2 |
| 13 | 245,53 | 240,05 | 35 | 2 |
| 14 | 245,88 | 248,48 | 37 | 2 |
| 15 | 252,71 | 256,69 | 40 | 2 |
| 16 | 267,63 | 264,73 | 43 | 2 |
| 17 | 271,81 | 272,61 | 45 | 2 |
| 18 | 276,98 | 280,37 | 48 | 1 |
| 19 | 288,89 | 288,03 | 51 | 1 |
| 20 | 289,82 | 29,62 | 54 | 1 |
| 21 | 327,31 | 303,17 | 56 | 1 |
| 22 | 328,93 | 310,69 | 59 | 1 |
| 23 | 329,38 | 318,21 | 20 | 1 |
| 24 | 312,37 | 325,32 | 64 | 1 |
| 25 | 337,00 | 33,32 | 67 | 1 |
| 26 | 343,53 | 340,97 | 70 | 1 |
| 27 | 354,92 | 348,72 | 72 | 1 |
| 28 | 362,18 | 356,61 | 75 | 1 |
| 29 | 378,78 | 364,67 | 78 | 1 |
| 30 | 379,44 | 372,97 | 81 | 1 |
| 31 | 384,01 | 381,58 | 83 | 1 |
| 32 | 384,57 | 390,60 | 86 | 1 |
| 33 | 397,40 | 400,18 | 89 | 1 |
| 34 | 402,93 | 410,57 | 91 | 1 |
| 35 | 407,50 | 422,23 | 94 | 1 |
| 36 | 412,18 | 436,24 | 97 | 1 |

el mismo periodo de escasas de precipitación, demostrándonos con ello, la relación de ambas sequías (meteorológica e hidrológica), entonces existe una relación directa entre la precipitación pluvial y el caudal de los ríos. Con este método, se determinaron las características objetivas de la sequía: magnitud, duración e intensidad (ver Tablas 1, 2, 3 y 4).

5. Referencias

[1] M. Bais. Caracterización de sequías hidrológicas en cuencas de la Patagonia de la República Argentina.

In *Congreso Nacional del Agua CONAGUA*, Córdoba, Argentina, 2017.

- [2] A. Aliaga. Análisis de las características de Sequías por el Método Experimental “Teoría del Run”. Tesis para optar el grado de magister scientiae, Universidad Agraria La Molina, Lima – Perú, 1980.
- [3] J. Keyantash and J. A. Dracup. The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices . *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), August 2002.
- [4] L. Vicario. Evaluación de Sequías Hidro – Meteorológicas, en la Estación San Roque. Informe Interno INA - CIRSA, Córdoba, 2018.
- [5] J. Salas. *Modelamiento Estocástico de Series Hidrológicas*. Publicación Nº 67. PUBLI DRAT. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima – Perú, 1979.
- [6] V. Yevjevich. *Probability and Statistics in Hydrology*. Fort Collins, Colorado U.S.A., 1972.
- [7] E. Guevara-Pérez. Métodos hidrológicos para el análisis de sequías. *Revista Ingeniería UC*, 1(1), 1992.

Effect of mineral compounds of sands on acid gases generation at steam injection conditions

Yefrenck Castro^{*,a,b}, Diego Sánchez^a, Alfredo Viloria^{b,c}

^aPDVSA Intevep. Gerencia técnica estudios de yacimientos, Los Teques 1201, Venezuela.

^bFacultad de Ingeniería UCV, Caracas, 1053, Venezuela.

^cEscuela de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad Yachay, Urcuquí, 170522, Ecuador

Abstract.- Venezuela has the largest accumulation of heavy oil in the world at an estimated 297MMbbls, located in the Orinoco Oil Belt. The Venezuelan oil industry has the task to develop technologies in order to exploit the heavy and extra-heavy oil reservoirs based on oil viscosity reduction. Actually, thermal processes in improved oil recovery as steam injection, was selected as main heavy oil exploitation technology for massification in venezuelan fields. In this kind of technologies, a series of reactions occur between water, heavy oil in presence of reservoir minerals that involves breaking up large hydrocarbon molecules into smaller (in some cases) and acid gases. These reactions are called aquathermolysis. The main objective in this work was to evaluate the effect of four Mineral sands from four different blocks of Orinoco oil belt on aquathermolysis reactions under steam injection conditions. The evaluation was conducted using batch reactors and a sand water oil system at 240-280 °C at steam injection conditions. The results indicate that the percentages of Hydrogen sulfide are above 3000 ppm. In the case of carbon dioxide, samples were obtained in the order of approximately 10,000 ppm. In general, a variable trend can be observed among the main elements present in lithology, catalyze the production of acid gases.

Keywords: aquathermolysis; heavy oil, steam injection; acid gases; thermal recovery.

Efecto de composición mineral de arenas sobre generación de gases ácidos en crudos pesados a condiciones de inyección de vapor

Resumen.- Venezuela posee la mayor acumulación de hidrocarburos pesados del planeta, ubicada en la faja petrolífera del Orinoco, por el orden de los 297 MMbbls. La industria petrolera venezolana tiene la tarea de desarrollar tecnologías para explotar eficientemente los yacimientos de crudos pesados, basadas en la reducción de su viscosidad. Los procesos térmicos de recuperación mejorada, por ejemplo la inyección de vapor, está visualizado para la explotación de este tipo de yacimientos, donde las reacciones de aquatermolisis en el petróleo tienen como consecuencia directa la producción de gases ácidos. El objetivo principal de este trabajo es evaluar el efecto de los minerales de cuatro arenas provenientes de la faja petrolífera del Orinoco en la reacción de aquatermolisis en condiciones de inyección de vapor. La evaluación se realizó utilizando reactores por carga para el sistema arena/agua/petróleo entre 240-280°C en una atmósfera de vapor de agua. Los resultados indican que los porcentajes de gases encontrados fueron elevados en cuanto a producción de sulfuro de hidrógeno, por encima de 3000 ppm en el caso muestra bloque Ayacucho. En el caso de producción de dióxido de carbono, se verificaron muestras por el orden de 10000 ppm en el bloque Carabobo aproximadamente. De manera general, se observó una tendencia variable entre los principales elementos presentes en la litología, donde estos minerales compuestos por metales de transición (principalmente hierro) catalizan significativamente la producción de gases ácidos.

Palabras claves: aquatermolisis; crudos pesados; inyección de vapor; gases ácidos; recuperación térmica.

Recibido: 23 octubre 2018

Aceptado: 28 enero 2019

1. Introducción

La explotación eficiente y el aumento del factor de recobro en yacimientos de crudos pesados es uno de los principales retos de la industria petrolera venezolana. La masificación de tecnologías para recuperación mejorada térmica como la inyección de vapor, es parte de los planes de PDVSA y

*Autor para correspondencia:

Correo-e: castroye@pdvsa.com (Yefrenck Castro)

se espera aumentar la cuota de producción hasta alcanzar un 20 % de factor de recobro como se reporta en la certificación de reservas de la faja petrolífera del Orinoco Hugo Chávez Frías. La implementación de proyectos de inyección de vapor en sus diferentes configuraciones como inyección alterna de vapor (IAV), inyección continua de vapor (ICV), drenaje gravitacional asistido con vapor (SAGD), drenaje gravitacional en un pozo simple (SW SAGD), tienen grandes probabilidades de éxito en yacimientos venezolanos ya que se dispone de amplia experiencia en inyección de vapor con aplicaciones en el occidente de Venezuela (Tía Juana, Bachaquero, Lagunillas) y en el oriente (Campo Bare, Jobo y Melones). Las aplicaciones en campo de tecnologías de inyección de vapor traen efectos colaterales que deben tomarse en cuenta como la formación de emulsiones múltiples, manejo de grandes porcentajes de agua, unidades separadoras agua-líquido y una de las más importantes: la generación de gases ácidos, como el sulfuro de hidrógeno y el dióxido de carbono, por efecto de la aquatermolisis entre el crudo-arena y agua.

La faja petrolífera del Orinoco (FPO) consta de una extensión de 55,314 km² y un área de explotación actual de 11,593 km², ubicada al sur de los estados Guárico, Anzoátegui y Monagas. Esta se divide en cuatro grandes áreas, siendo estas de este a oeste: Carabobo, Ayacucho, Junín y Boyacá y a su vez segmentado en 29 bloques de 500 km² cada uno aproximadamente [1]. Cada bloque cuenta con estudios geológicos y de yacimientos bien establecidos donde es de vital importancia desarrollar metodologías que permitan la predicción de los volúmenes de gases ácidos a manejar en superficie y fondo de pozo, factor clave por seguridad tanto de la integridad del personal como para el resguardo de instalaciones de superficie por efectos de corrosión.

Se define aquatermolisis como una serie de reacciones entre los compuestos sulfurados en el petróleo, los minerales de la roca y el vapor de agua, que consisten en la ruptura de enlaces químicos por efecto térmico del vapor y por ende, generación de gases ácidos e hidrocarburos menos complejos [2]. Estas reacciones compiten e

influyen la viscosidad de los crudos pesados en direcciones opuestas. Una vez las especies reactivas son generadas por la ruptura aquatermolítica de las estructuras sensitivas de los diversos enlaces carbono-azufre, pueden polimerizar y aumentar la viscosidad, o iniciar una serie de reacciones consecutivas que resultan en la generación de productos que pueden reducir la viscosidad. De esta manera se define la polimerización ácida como aquella reacción en cadena que es posible debido a la conexión entre los compuestos reactivos generados durante la aquatermolisis. Estos compuestos reactivos son radicales libres que reaccionan con moléculas insaturadas en el crudo, generando nuevos intermediarios que a su vez reaccionan en cadena con otras moléculas insaturadas hasta que se produzca la unión entre dos cadenas carbonadas insaturadas, o aparezca una impureza que detenga el mecanismo. Estas reacciones traen consigo un severo aumento en el peso molecular promedio y la viscosidad del crudo [3].

Por otro lado, existe la posibilidad de iniciar un conjunto de reacciones que estimulan la generación de compuestos de menor peso molecular, cuya aparición en el crudo conduce a un efecto de mejora en cuanto a la reducción de su viscosidad. En dicho conjunto de reacciones intervienen procesos de descarboxilación que producen monóxido y dióxido de carbono (CO y CO₂ respectivamente). Adicionalmente se genera hidrógeno, que posteriormente, promueve reacciones de hidrogenación y desulfuración [3].

Estas reacciones de desulfuración de crudo generan sulfuro de hidrógeno (H₂S), a partir de compuestos como los tioéteres y tiofenos. Esto es debido a que a temperaturas mayores de 200 °C, se suministra una cantidad de energía que es capaz de estimular la ruptura de ciertos enlaces, como lo es el enlace C-S.

Algunos autores han hecho estudios en las reacciones de aquatermolisis para ubicar el azufre con el fin de realizar balances de masa y poder esclarecer el origen de los gases ácidos y diseñar eficientemente estrategias de control de su emisión. Se ha determinado que el azufre está presente en 3 fases (petróleo-arenas-gas); en la fase orgánica

(petróleo) como los saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos, en la fase inorgánica (roca) en minerales como la pirita y en la fase gaseosa como el sulfuro de hidrógeno (H₂S) [4]. En otras investigaciones se ha determinado que el azufre está distribuido en las arenas productoras en fases inorgánicas y orgánicas (esta última en mayor proporción). La fase orgánica indica que el azufre se encuentra enlazado a la matriz del hidrocarburo, presente bajo la forma de sulfuros, disulfuros, tioles y tiofenos simples y complejos. Mientras que en la fase inorgánica se encuentran sulfuros inorgánicos, la mayoría bajo la forma de sulfuros de hierro (FeS₂ o pirita) y de sulfatos inorgánicos (sulfatos de calcio y de hierro).

Se observa que el azufre del crudo asociado, después de la aquatermolisis es mayor que el del crudo original. El azufre presente en los asfaltenos del crudo después de la aquatermolisis es mayor que el del crudo original y por último el azufre de las resinas de los crudos asociados, después de la aquatermolisis es menor que el presente en el crudo original. Este comportamiento en la distribución del azufre puede ser atribuido a la desorción de la fase orgánica residual adsorbidas sobre el medio poroso [5].

El tratamiento a nivel de superficie y en fondo de pozo de estos gases efluentes ricos en concentraciones de sulfuro de hidrógeno (H₂S) y dióxido de carbono (CO₂) es de vital importancia, tanto para seguridad del personal que labora en campo como para la integridad de la infraestructura de superficie. Existen tratamientos clásicos como unidades de endulzamiento, basados en diferentes tecnologías y la adición de aditivos en las líneas de flujo o cabezal de pozo para garantizar el manejo de gas a concentraciones permisibles. Este trabajo de investigación se basa principalmente en el estudio de generación de gases ácidos en muestras características de los cuatro diferentes bloques de la faja petrolífera del Orinoco contrastando la producción de gases ácidos de acuerdo a las reacciones de aquatermolisis.

2. Metodología

En la Figura 1 se muestra un esquema general

de la metodología empleada en esta investigación, la cual se basa principalmente en caracterización de los componentes de la reacción y pruebas en estático a condiciones de inyección de vapor en muestras características de los cuatro bloques de la faja petrolífera del Orinoco. En la Tabla 1 se muestran las principales propiedades de las muestras según cada bloque de la faja del Orinoco y valores promedios utilizados para calcular las proporciones correctas para la realización de pruebas experimentales en reactores por carga.

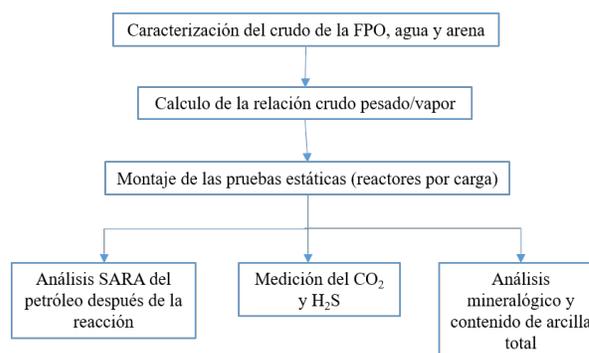


Figura 1: Metodología planteada para el desarrollo de la investigación.

Tabla 1: Propiedades petrofísicas generales de las muestras de yacimientos de la faja petrolífera del Orinoco [6].

| | Carabobo | Ayacucho | Junín | Boyacá |
|--------------|----------|----------|-------|--------|
| Φ (%) | 33 | 27 | 28 | 40 |
| k (Darcy) | 9670 | 7000 | 17000 | 10102 |
| So (%) | 90 | 73 | 93,7 | 89,5 |
| RGP (BN/PCN) | 98 | 79 | 84 | 150 |
| Py (psi) | 1400 | 870 | 443 | 800 |
| Ty (°C) | 56 | 47 | 46 | 46 |

Donde, Φ es porosidad (%), k es permeabilidad absoluta (darcy), So es saturación de petróleo (%), RGP es relación gas petróleo (BN/PCN), Py es presión de yacimiento (psi) y Ty es temperatura de yacimiento (°C).

2.1. Materiales y equipos

2.1.1. Reactivos

Muestras de crudo extrapesado y núcleos provenientes de los cuatro bloques de la faja petrolífera del Orinoco, agua destilada, diclorometano, tubos colorimétricos para detección de sulfuro de hidrógeno (H_2S) y dióxido de carbono (CO_2).

2.1.2. Equipos

En las pruebas de simulación física de inyección de vapor se utilizaron reactores por carga como se muestra en la Figura 2, provistos de chaqueta de calentamiento con controlador de temperatura y manómetro. La temperatura de reacción fue $247^\circ C$ y la presión de operación 550 psi de acuerdo a condiciones reales de inyección de vapor en campo.

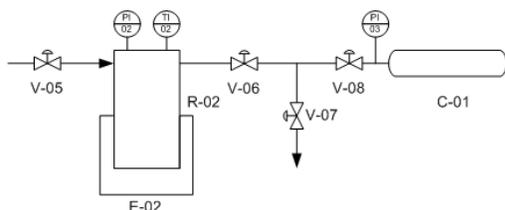


Figura 2: Diagrama de las pruebas de inyección de vapor.

El procedimiento para cada evolución experimental fue el siguiente: se ubican los componentes en el vaso del reactor R-02, se coloca la tapa y se ajusta en ensamblaje de acuerdo a la Figura 2 [7]. Se inyecta nitrógeno (N_2) a R-02 hasta que la lectura del indicador de presión PI-02 sea la presión inicial. Se alcanzan las condiciones de vapor (550 psi y $247^\circ C$), se espera el tiempo de reacción (24 horas), se enfría el gas y luego se caracterizan los componentes de la reacción por separado. El sistema consta de válvulas (V-05, V-06, V-07 y V-08) para inyectar y desalojar gases del reactor luego de la reacción para su posterior caracterización. Adicionalmente en la etapa de caracterización de los componentes de reacción se utilizaron diferentes técnicas y metodologías.

2.2. Técnicas experimentales

A continuación se presenta un resumen de las técnicas experimentales utilizadas en la

caracterización de los componentes de la reacción. Los ensayos se realizaron por duplicado.

2.2.1. Petróleo pesado

Viscosidad. Se determinó la viscosidad dinámica mediante el uso de un reómetro. El equipo mide el momento necesario para hacer girar un elemento, el husillo, en un fluido. Dicho husillo se mueve por medio de un motor síncrono a través de un muelle calibrado, donde los valores de momento de torsión, esfuerzo de cizalla y viscosidad como número aparecen en una pantalla digital. Se midió la deformación del petróleo a $T = 50^\circ C$, a velocidad de corte de $20\ s^{-1}$ [2].

Gravedad API. La gravedad API y la densidad relativa, se calcula según la norma ASTM D 70-03, donde este método aplica para materiales bituminosos semi-sólidos, asfaltos y cementos mediante el uso de un picnómetro. El principio se basa en la determinación de la masa correspondiente a un volumen fijo de un fluido a $T = 15,56^\circ C$ [8].

Análisis SARA. En este análisis se separaron las muestras de crudo en sus diferentes grupos constituyentes: saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos a partir de una muestra de maltenos, empleando HPLC (*high precision liquid chromatography*). El principio analítico de la técnica es cromatografía en capa fina acoplado a un detector de ionización de llama [9].

Contenido de azufre. Esta prueba cubre los procedimientos para la determinación del azufre total en productos derivados del petróleo, incluidos los aceites lubricantes que contienen aditivos y en concentrados de aditivos. Este método es aplicable a muestras con una temperatura de ebullición superior a $177^\circ C$ y que contienen una fracción masiva de azufre entre 0,22% y 24,2%. Estos procedimientos utilizan espectroscopia de emisión atómica de plasma de acoplamiento inductivo (ICP) [2].

2.2.2. Arena del yacimiento

Esta evaluación se realizó a través del método de polvo cristalino, donde la muestra se pulveriza lo más finamente posible y se coloca en una cámara.

En esta cámara un haz monocromático de rayos X pasa a través de un colimador dentro de un cilindro de metal en el centro del cual se encuentra la muestra de polvo. Los haces difractados al incidir sobre la muestra se registran en una delgada película fotográfica localizada en el interior de la pared del cilindro. Cada mineral tiene su propio diagrama de polvo característico diferente del de cualquier otro [10].

2.2.3. Gas del reactor

Tubos colorimétricos. Este método se basa en utilizar tubos compuestos de sales orgánicas que tienen escalas calibradas para cuantificar la composición de gas a analizar. Para dicha medición, se emplea una bomba de muestreo de gases modelo la cual permite coleccionar con precisión un volumen de muestra, así como tubos colorimétricos. Los rangos de aplicación para la medición de concentración de H₂S está entre 100 - 4000 ppm y para el CO₂ entre 0,5 - 20 % [11].

Cromatografía de gases. Consiste en la determinación de la composición por medio de cromatografía gaseosa. Los gases no condensables, H₂S, CO₂ y C1 hasta C5 son reportados individualmente, mientras que para los hidrocarburos C6+ se emplea un solo compuesto. Este método posee un rendimiento cuantitativo del 0,1 - 99,9 en porcentaje molar para un solo componente o para un compuesto, a excepción del sulfuro de hidrógeno que posee un rendimiento entre 0,1 y 25 en porcentaje molar [12].

3. Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en el trabajo realizado, acompañados de la correspondiente discusión.

3.1. Caracterización de los componentes de ensayo

3.1.1. Petróleo del yacimiento

En la Tabla 3 se muestran los resultados de la caracterización del petróleo proveniente de los diferentes yacimientos característicos de los cuatro bloques de la faja petrolífera del Orinoco. Estos

hidrocarburos se clasifican como “extrapesados” debido a que la gravedad API es menor a 10 grados en la escala estipulada por el *american petroleum institute*. Los rangos de viscosidad de los fluidos fueron bien amplios, con valores desde 7890 hasta 20340 mPa.s para el caso de la división Boyacá, siendo estos los valores más altos medidos en Venezuela y por lo tanto se ratifica el reto de explotación de estos tipos de yacimientos con tecnologías de estimulación aplicando temperatura. La composición de saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos se encuentran en el mismo orden, comparando estos resultados con valores publicados de crudo pesado [2], observándose alto contenido de resinas y aromáticos (entre 30 y 50 % respectivamente). Estudios verifican la teoría de la presencia de compuestos azufrados que generan la producción de sulfuro de hidrógeno en las fracciones más pesadas como las resinas y asfaltenos [13].

Tabla 2: Caracterización del petróleo proveniente de la faja petrolífera del Orinoco.

| Propiedad | Carabobo | Ayacucho | Junín | Boyacá |
|--------------------|----------|----------|-------|--------|
| ° API | 7,9 | 8,9 | 8,8 | 6,5 |
| Viscosidad (mPa s) | 10070 | 7890 | 10243 | 20340 |
| Saturados (%) | 14,1 | 9,5 | 18,0 | 19,1 |
| Aromáticos (% p/p) | 36,1 | 36,5 | 42,0 | 51,9 |
| Resinas (% p/p) | 39,5 | 37 | 32,1 | 20,6 |
| Asfaltenos (% p/p) | 9,9 | 17 | 8,2 | 8,3 |
| Azufre (% p/p) | 3,73 | 3,36 | 3,52 | 3,58 |

El contenido de azufre es un parámetro importante de comparación entre las muestras de petróleo, se observaron valores por encima de 3,5 % p/p. La muestra del bloque Carabobo evidenció mayor contenido de azufre total, con un 3,7 %. Este azufre total engloba todos los componentes azufrados de los hidrocarburos responsables de la formación de sulfuro de hidrógeno. En el crudo, el azufre puede encontrarse en diversas formas, como sulfatos, tioles o mercaptanos, tiofenos y benzotiofeno y dibenzotiofeno [5], por

lo tanto debido a la presencia de estos compuestos azufrados se puede atribuir la producción de sulfuro de hidrógeno por implementación de tecnologías de inyección de vapor en yacimientos de petróleo pesado. Sería recomendable determinar experimentalmente la composición específica de los compuestos azufrados en el petróleo para reproducir las reacciones de producción de sulfuro de hidrógeno en estudios posteriores.

3.1.2. Arena del yacimiento

Tabla 3: Composición roca total de las muestras de rocas de los diferentes bloques de le FPO.

| | Carabobo | Ayacucho | Junín | Boyacá |
|-------------------------------|----------|----------|-------|--------|
| Cuarzo (%) SiO ₂ | 93 | 92 | 96 | 84 |
| Feldespato K (%) | 0 | 0 | 4 | 9 |
| Calcita (%) | 0 | 1 | 0 | 1 |
| Dolomita (%) | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Pirita (%) FeS ₂ | 1 | 1 | 0 | 0 |

Tabla 4: Composición de arcillas en muestras de rocas de los diferentes bloques de le FPO.

| | Carabobo | Ayacucho | Junín | Boyacá |
|-----------------------|----------|----------|-------|--------|
| Caolinita (%) | 100 | 79 | 0 | 86 |
| Ilita (%) | 0 | 21 | 0 | 7 |
| Ilita-Esmectita (%) | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Esmectita (%) | 0 | 0 | 0 | 1 |

En las Tablas 4 y 5 se reporta las composiciones de la arena del yacimiento (roca total y arcillas), luego de ser separada del núcleo por extracción tipo soxhlet con diclorometano y antes de su incorporación a los sistemas de ensayo en las pruebas de inyección de vapor. La composición general de las muestras de roca se basa en óxido de silicio (sílice) mineral que se encuentra mayoritariamente en las formaciones de areniscas, característico de la faja petrolífera del Orinoco. En las muestras provenientes de la división Junín y Boyacá se reportó contenido de feldespato potásico (K₂OAl₂O₃₄SiO₂), que se traduce en contenido de potasio. En las muestras provenientes de los bloques Carabobo y Ayacucho se cuantificó pirita,

hierro y azufre. Se observó contenido de calcita (CaCO₃) en muestras de bloque Ayacucho y Boyacá. El magnesio se identificó en la muestra de Boyacá en forma de dolomita (CaMg(CO₃)₂).

En la Tabla 5 se presenta la composición de arcillas presentes en las muestras de arenas. Se observa la presencia de caolinita (Al₂₂O₃₂SiO₂ · 2 H₂O) en la mayoría de las muestras y en algunos casos ilita (KAl₂O₃₄SiO₂) y esmectita (Al₂O₃₄SiO₂H₂O). La presencia de estos minerales verifica que existen reacciones entre el crudo, vapor de agua, en presencia de iones como el aluminio y el potasio y éstos a su vez catalizan en cierto grado las reacciones de aquatermolisis [14].

3.2. Gases ácidos generados por pruebas de inyección de vapor

3.2.1. Balance de masa contenido de Azufre en fase petróleo

La Tabla 6 muestra el contenido de azufre antes y después de reacción con el fin de realizar el balance de masa y poder visualizar, a su vez, cual es el aporte del sistema crudo-vapor-arena en la producción de sulfuro de hidrógeno comparado con un sistema solo fluidos (petróleo-vapor de agua). La presencia de minerales en el sistema hace que por encima de un 92 % de los compuestos azufrados presentes en el hidrocarburo reaccionen y se conviertan en sulfuro de hidrógeno. Cuando se agregó mineral al sistema, se produjeron más gases, ya que el mineral puede acelerar la termólisis del petróleo y, por lo tanto, liberar más gases. Esto es consistente con los resultados de otros investigadores como Fan que obtuvo altas producciones de gases usando minerales a base cuarzo y feldespato potásico entre otros [14]. Existe una diferencia del contenido de azufre antes y después de la reacción en el balance de masa que se puede atribuir al proceso de separación entre la arena y el petróleo para medir el contenido de azufre por el método de espectrometría de emisión atómica, o a la apreciación del método, a pesar de esto se obtuvo diferencias por debajo del 5 %.

Tabla 5: Balance de masa en azufre en fase hidrocarburo para el grupo de pruebas.

| Concentración (% p/p) | Carabobo | Ayacucho | Junín | Boyacá |
|--|----------|----------|-------|--------|
| Azufre inicial | 3,73 | 3,36 | 3,52 | 3,58 |
| H ₂ S sistema crudo-vapor | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,007 |
| H ₂ S sistema crudo-vapor-arena | 0,32 | 0,4 | 0,15 | 0,9 |
| % Aporte | 98,6 | 98,8 | 97,0 | 92,2 |
| Azufre Final | 3,32 | 2,92 | 3,2 | 2,52 |
| Diferencia (%) | 2,4 | 1,2 | 4,8 | 4,5 |

3.2.2. Generación de gases ácidos a condiciones de inyección de vapor

En las Tabla 7 se muestra los resultados obtenidos en cuanto a generación de gases ácidos por el efecto de la aquatermolisis del petróleo pesado por presencia de minerales. Las evaluaciones efectuadas con óxido de silicio (sílice) como blanco en comparación con pruebas realizadas con muestras de la división Ayacucho muestran que los minerales en la arena de yacimiento son los responsables de la generación de gases ácidos por efecto de la inyección de vapor [1]. Se visualizan valores bajos en los sistemas evaluados con la muestra blanco, verificando la hipótesis planteada.

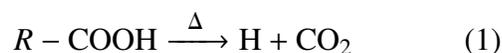
Tabla 6: Concentración de dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno luego de las pruebas.

| | Concentración | | | | |
|------------------------|---------------|----------|-------|--------|--------|
| | Carabobo | Ayacucho | Junín | Boyacá | Blanco |
| H ₂ S (ppm) | 3200 | 4000 | 1500 | 850 | 140 |
| CO ₂ (ppm) | 10000 | 5000 | 9800 | 3200 | 600 |

Los porcentajes de gases encontrados fueron elevados en cuanto a producción de sulfuro de hidrógeno para los casos de las muestras provenientes de los bloques Carabobo y Ayacucho, resultando estar por encima de 3000 ppm. Este par de muestras contienen pirita, que está compuesta por hierro y funciona como catalizador de la

reacción. En el caso de producción de dióxido de carbono, se verificó en las muestras de la división Junín y Carabobo (10000 ppm aproximadamente). Se verifica que las reacciones de desulfuración se deben a la temperatura, composición del crudo pesado y efecto catalítico por los minerales que contienen metales de transición (hierro) en las rocas, como ocurrió con las muestras provenientes de los bloques Carabobo y Ayacucho [5].

La producción de dióxido de carbono es debida, principalmente, a la reacción de descarboxilación de ácidos nafténicos en el petróleo (ecuación 1) [15]:



También se debe tomar en cuenta la reacción de desplazamiento agua-gas (ecuación (2)) y finalmente los carbonatos contenidos en la mineralogía.



3.3. Fracciones Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos (SARA)

La Tabla 8 resume los valores de composición en peso de fracciones de saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos luego de la reacción de aquatermolisis. Se verifica el mecanismo propuesto por Hynes [3] que menciona que las reacciones generan hidrocarburos de menor masa molecular. Esto refleja un aumento en la fracción de hidrocarburos saturados y aromáticos mientras que las resinas y asfaltenos disminuyen [16]. Estas variaciones fueron observadas durante las 24 horas de experimentación y puede ser atribuido al rompimiento de enlaces débiles (entre el carbono y el azufre) en la fracción más pesada del crudo (resinas y asfaltenos) verificando el mecanismo propuesto por varios autores [17].

4. Conclusiones

Se verificó experimentalmente que los minerales ejercen un efecto catalítico en la aquatermolisis de petróleo pesado proveniente de la faja petrolífera del Orinoco.

Tabla 7: Composición de saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos luego de la reacción de aquatermolisis.

| | Saturados (% p/p) | Aromáticos (% p/p) | Resinas (% p/p) | Asfaltenos (% p/p) |
|----------|----------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| Carabobo | 16,8 | 40,5 | 33,7 | 9 |
| Ayacucho | 14,4 | 39,3 | 33,1 | 13,2 |
| Junín | 22,8 | 41,6 | 27,8 | 7,8 |
| Boyacá | 24,7 | 48,6 | 18,6 | 8,1 |

La arena de yacimiento aporta por encima del 92 % del H₂S generado por reacción de aquatermolisis en inyección del vapor.

Se observó un aporte catalítico del hierro contenido en la Pirita (FeS₂) para la producción de ácido sulfúrico (H₂S) y una contribución en la formación de dióxido de carbono (CO₂) proveniente de los carbonatos presentes en la arena.

La aquatermolisis de crudo pesado aumenta la cantidad de hidrocarburos saturados y aromáticos, disminuir la cantidad de resina y asfaltenos.

5. Referencias

- [1] T. Villarroel and R. Hernández. Technological developments for enhancing extra heavy oil productivity in fields of the faja petrolifera del Orinoco (FPO). In *AAPG 2013 Annual Convention and Exhibition*, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, may 2013.
- [2] Y. Castro, B. Arteaga y N. Viloría. Mitigación del H₂S en la tecnología de inyección de vapor mediante el uso de formulaciones con aminas de origen natural. Informe Técnico INT-13350, PDVSA Intevep, Venezuela, 2010.
- [3] K. Sánchez. Evaluación de aditivos en el tratamiento aquatermolítico de crudo extrapesado como método de recuperación mejorada. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Venezuela, 2009.
- [4] A. Viloría, S. Parisi, E. Martínez y R. Rodríguez. Caracterización y distribución de azufre en arenas productoras de yacimientos de crudos pesados sometidos a inyección de vapor. *Revista Técnica INTEVEP*, 4(2):145–151, 1984.
- [5] A. Viloría, S. Parisi y E. Martínez. Efectos de la inyección de vapor sobre la calidad de un crudo extrapesado de la Faja petrolífera del Orinoco. *Revista Técnica INTEVEP*, 5(1):69–72, 1985.
- [6] Y. Castro. Efecto de la litología de diferentes campos de crudos pesados en venezuela sobre la reacción de aquatermolisis en condiciones de inyección de vapor. In *LXV Convención Anual de AsoVAC.*, Venezuela, 2015. AsoVAC.
- [7] B. Arteaga. Mitigación del H₂S en la tecnología de inyección con vapor mediante el uso de formulaciones con aminas de origen natural. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Venezuela, 2010.
- [8] ASTM. D 70 – 03 Standard test method for density of semi-solid bituminous materials (pycnometer method), 2003.
- [9] ASTM. D6156-97 standard practice for use of reversed-phase high performance liquid chromatographic systems, 1997.
- [10] M. Cosgrove and A. Sulaiman. A rapid method for the determination of quartz in sedimentary rocks by X-ray diffraction incorporating mass absorption correction. *Clay Minerals*, 10(1):51–55, 1973.
- [11] ASTM. D 1998 - 91 Standard test method for mercaptans in natural gas using length-of-stain detector tubes, 2000.
- [12] ASTM. ASTM D2650 - 99 Standard test method for chemical composition of gases by mass spectrometry, 1999.
- [13] P. Clark and J. Hyne. Steam-oil chemical reactions: mechanisms for the aquathermolysis of heavy oils. *AOSTRA Journal of Research*, 1(1):15–20, 1984.
- [14] H. Fan, Y. Zhang, and Y. Lin. The catalytic effects of minerals on aquathermolysis of heavy oils. *Fuel*, 83(14-15):2035–2039, 2004.
- [15] Y. Castro y N. Viloría. Factibilidad técnica de aditivos a base de aminas biogénicas para control de gases ácidos a fondo de pozo en procesos de inyección de vapor. In *XI Congreso de Ciencias Químicas, Tecnología e Innovación, Resúmenes*, Cuba, 2015. Sociedad Cubana de Química.
- [16] V. Lamoureux-Var and F. Lorant. H₂S artificial formation as a result of steam injection for EOR: a compositional kinetic approach. In *SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium*, pages 1–4, Canada, 2005. Society of Petroleum Engineers.
- [17] A. Méndez, A. Agüero, E. Manrique y C. Ovalles. Cambios en la composición química de crudos medianos en procesos térmicos de recuperación mejorada. *Revista Sociedad Venezolana de Química*, 24(2):24–35, 2001.

Metaheuristics-based frameworks to solve the knapsack problem

Isele Jiménez-Castellano, Betania Hernández-Ocaña, José Hernández-Torruco, Oscar Chávez-Bosquez*

División Académica de Informática y Sistemas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Cunduacán, Tabasco, México.

Abstract.- Software frameworks allow the reuse of code designed for diverse problem-solving. Frameworks implementing metaheuristics for optimization problem solving are among the most interesting ones. The Knapsack Problem is one of the classic optimization examples commonly used as a benchmark as it is a simple yet complex problem: it belongs to the NP-Complete complexity class, considered more difficult than NP problems in general. In this paper, we implemented algorithms from three metaheuristics frameworks of different families in order to solve a form of the problem: the Knapsack Problem 0-1. The selected frameworks were JACOF (Ant Colony Optimization), JAMES (Trajectory-based Algorithms), and MOEA (Evolutionary Algorithms). We develop a software prototype including the most representative algorithms of each framework to solve a public benchmark set of the problem. We designed one stop criteria for all algorithms, and we perform 30 runs per algorithm to conclude that JAMES obtained the best results, although with higher standard deviation. However, MOEA is the most easy-to-implement framework, since it requires fewer lines of code to solve the problem.

Keywords: heuristics; optimization; software.

Frameworks basados en metaheurísticas para resolver el problema de la mochila

Resumen.- Actualmente existen frameworks que permiten reutilizar código diseñado ex profeso para resolver diversos problemas, entre los que destacan aquellos que implementan metaheurísticas para resolver problemas de optimización. El problema de la mochila es uno de los ejemplos de optimización clásicos usado a menudo como problema de prueba debido a su sencillez y al mismo tiempo su complejidad: pertenece a la categoría de problemas NP-Completos, considerados difíciles computacionalmente. En este artículo se implementaron los algoritmos de tres frameworks de metaheurísticas de diferentes familias para resolver una variante del problema: el problema de la mochila 0-1. Los frameworks seleccionados fueron: JACOF (Algoritmos de Colonia de Hormigas), JAMES (Algoritmos basados en Trayectoria), y MOEA (Algoritmos Evolutivos). Se desarrolló un prototipo de software incluyendo las metaheurísticas más representativas de cada framework y se utilizaron como benchmark un conjunto de instancias públicas del problema. Se diseñó un factor de finalización común para los algoritmos de cada framework, y a partir del diseño experimental se ejecutaron 30 pruebas por algoritmo cuyos resultados demuestran que JAMES obtienen mejores soluciones, aunque con mayor desviación estándar. Sin embargo, MOEA es el framework más sencillo de implementar, ya que implica menos líneas de código necesarias para resolver el problema.

Palabras claves: heurísticas; optimización; software.

Recibido: 20 diciembre 2018

Aceptado: 04 marzo 2019

1. Introducción

Las metaheurísticas surgen con la motivación de mejorar los procesos de búsqueda en optimización, las cuales son métodos de aproximación

matemática que permiten encontrar más de una solución a un problema en poco tiempo sin tener que transformar el modelado matemático o el dinamismo del problema [1]. Aunque distintos autores sugieren diferentes clasificaciones, en este artículo se manejan estas tres categorías de metaheurísticas:

- los Algoritmos Evolutivos (AE), basados en la evolución natural de las especies [2].
- los Algoritmos de Inteligencia Colectiva (AIC), que simulan el comportamiento de

*Autor para correspondencia:

Correo-e: oscar.chavez@ujat.mx (Oscar Chávez-Bosquez)

ciertas especies simples e inteligentes en la búsqueda de alimento o refugio [3]

- los Algoritmos basados en Trayectoria (AT), que utilizan solamente una solución durante el proceso de búsqueda, describiendo una trayectoria desde la solución inicial hasta la solución final.

Los más populares son los AE debido a su éxito en la solución de problemas de optimización, entre los cuales destacan los Algoritmos genéticos, Estrategias evolutivas y Evolución diferencial. Sin embargo, algunas propuestas de AIC han tomado relevancia en estos últimos años tales como el Algoritmo de optimización mediante cúmulos de partículas, Colonia de hormigas, y el Algoritmo de optimización basado en el forrajeo de bacterias. Con respecto a los AT, la Búsqueda tabú, el Recocido simulado y la Búsqueda local iterativa constituyen los algoritmos más representativos [4].

Dada la popularidad de las metaheurísticas para resolver problemas de optimización de manera aproximada en tiempos razonables, se han desarrollado bibliotecas o frameworks que implementan un conjunto de algoritmos con el objetivo de encontrar una solución factible al problema y con los cuales se busca reducir el tiempo en que se desarrolla un software con código existente [5]. En la web se encuentran frameworks tanto de uso libre (aquellos en los que el código fuente se encuentra disponible al público) como de acceso limitado (en los cuales no todas las funciones son gratuitas o el código fuente no está disponible). Estos pueden ser implementados y adaptados por el usuario final para resolver problemas de optimización específicos.

Ahora bien, un problema interesante desde el punto de vista computacional lo constituye el problema de la mochila. Este problema ha sido estudiado exhaustivamente, encontrando soluciones tanto con AE como AIC y AT [6, 7, 8], entre otras muchas técnicas.

En este trabajo se seleccionaron tres frameworks de metaheurísticas de vanguardia, de libre licencia y con versiones *out-of-the-box* de metaheurísticas, es decir, sin necesidad de instalación

o configuración previa. Estos tres frameworks: JACOF, JAMES y MOEA incluyen algoritmos de inteligencia Colectiva, evolutivos, y basados en trayectoria (respectivamente), lo cual les hace interesantes de comparar.

Los algoritmos más relevantes de cada framework se implementaron en un prototipo que denominamos *Lanzador de Frameworks de Metaheurísticas* (Prototipo LFM), con el objetivo de resolver un conjunto de instancias del problema de la mochila y así comparar su desempeño y la calidad de sus soluciones.

2. El problema de la mochila

El problema de la mochila (KP, por las siglas en inglés *Knapsack Problem*), es un problema clásico de Optimización combinatoria que pertenece a la familia de problemas NP-Completo. Se puede decir que esta clase de problemas (también conocidos informalmente como “intratables”), son los más difíciles de resolver, ya que un algoritmo de fuerza bruta para problemas NP-Completo utiliza tiempo exponencial con respecto al tamaño de la entrada. Se desconoce si hay mejores algoritmos, por lo cual es necesario utilizar diferentes enfoques que permitan obtener una solución adecuada en un tiempo razonable [9].

El KP consiste en un conjunto de elementos con un peso y valor específicos, que son seleccionados para maximizar el valor obtenido y el peso total de los elementos elegidos sin exceder la capacidad de la mochila [10]. Existen diversas variantes del problema estándar:

- **Multidimensional:** consiste en encontrar un subconjunto de objetos que maximicen el beneficio total mientras se satisfacen ciertas restricciones. Se trata de una variación computacionalmente más dura que el problema estándar [11].
- **Múltiple:** surge de la generalización del problema estándar cuando se tienen varias mochilas. Es usado en problemas de carga y programación de operaciones [12].

- Cuadrático: esta variante maximiza una función objetivo cuadrática sujeta a una restricción de capacidad lineal o binaria [13].
- Suma de subconjuntos: en esta variante el beneficio es igual al peso de cada elemento, $w_j = x_j$, y todas las mochilas tienen la misma capacidad. Esto no implica que el beneficio (o peso) sea el mismo para cada uno de los elementos [14].

De las variantes presentadas, el problema de la mochila 0-1 es considerado clásico en la literatura [15].

2.1. El problema de la mochila 0-1 (KP 0-1)

El KP 0-1 [16] constituye uno de los problemas más simples de la programación lineal. Aparece como subproblema en otros problemas más complejos y tiene diversas aplicaciones prácticas en la toma de decisiones del mundo real, tales como la búsqueda de patrones de corte para materias primas que generen el menor desperdicio posible [17], la selección de inversiones de capital y portafolios financieros [12] o la optimización de recursos computacionales [18]. Matemáticamente se expresa como [19]:

$$\text{maximizar } \sum_{j=1}^n w_j x_j, \quad (1)$$

$$\text{sujeto a } \sum_{j=1}^n w_j x_j \leq c, \quad (2)$$

$$\text{tal que } x_j \in \{0, 1\}, j = 1, \dots, n \quad (3)$$

donde:

- x_j : Variables de decisión,
- w_j : Peso w del ítem j ,
- c : Capacidad total de la mochila,
- n : Número de ítems.

El modelo matemático define que cada elemento corresponde a una variable x_j cuyo valor puede ser 1 si el elemento j se introduce a la mochila y 0 si se descarta. Además, se debe considerar que un elemento puede ser elegido si no se ha excedido el peso w_j .

2.2. Instancias de prueba

Al ser un problema vigente de optimización, existen múltiples instancias del problema de la mochila, específicamente del KP 0-1. Estas instancias se encuentran mayormente en archivos con formato de texto plano y varían en dificultad dependiendo el número de ítems a colocar en la mochila.

En este artículo se utiliza un conjunto de instancias disponibles en línea como `instances_01_KP` (adaptadas de David Pisinger's problems) [20]. Estas instancias son usadas como benchmark para comparar el desempeño de diferentes algoritmos. El conjunto consiste de 21 instancias con diferente cantidad de ítems, de los cuales se seleccionó un subconjunto de 7 instancias que pueden considerarse representativo del total.

Cada instancia (archivo de texto) se compone de valores enteros separados por espacios en blanco y saltos de línea. El formato es como sigue:

```
[Número de ítems] [Capacidad de la mochila]
[Peso del ítem 1] [Ganancia del ítem 1]
...
[Peso del ítem n] [Ganancia del ítem n]
```

La primera línea del archivo contiene el número total de ítems y la capacidad máxima de la mochila. Las líneas subsecuentes contienen el peso y la ganancia de cada ítem. Cabe mencionar que existen otros formatos comúnmente utilizados en la literatura, pero todos incluyen de alguna manera los datos mostrados. Las características de las instancias seleccionadas son:

- KP1: 100 ítems, 995 de capacidad máxima,
- KP2: 200 ítems, 1008 de capacidad máxima,
- KP3: 500 ítems, 2543 de capacidad máxima,
- KP4: 1000 ítems, 5002 de capacidad máxima,
- KP5: 2000 ítems, 25016 de capacidad máxima,
- KP6: 5000 ítems, 10011 de capacidad máxima,
- KP7: 10000 ítems, 49877 de capacidad máxima.

3. Metaheurísticas

Las metaheurísticas son estrategias para diseñar y mejorar los procedimientos heurísticos orientados a obtener un alto rendimiento. El término metaheurística fue introducido por Fred Glover [21] en 1986 y desde entonces se han presentado nuevas propuestas como alternativas de solución a problemas. Estos algoritmos son una clase de métodos aproximados que están diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria, en donde las heurísticas clásicas no son efectivas [22].

Las metaheurísticas constituyen un campo disciplinar de gran auge en la Inteligencia Artificial. Han alcanzado un alto prestigio, como demuestran la amplia gama de problemas a los que se han aplicado con éxito en la literatura, así como el gran número de revistas, libros y conferencias dedicados a este tema. Además, proporcionan un marco general en la creación de nuevos algoritmos híbridos, combinando conceptos de áreas como: biología, matemáticas, neurología, física, entre otras [23]. A continuación se describen las metaheurísticas empleadas en esta investigación.

3.1. Algoritmos Evolutivos (AE)

Los AE están basados en la evolución biológica, incluyendo elementos como la reproducción, la mutación, la recombinación y la selección. Se trata de métodos de optimización y búsqueda estocásticos inspirados en la teoría de la evolución de Darwin. Estos algoritmos a menudo realizan soluciones aproximadas y utilizan la evolución simulada para explorar soluciones en problemas complejos del mundo real [24]. Los AE son una herramienta muy popular para buscar, optimizar y proporcionar soluciones a problemas complejos [25].

3.2. Optimización basada en Colonias de Hormigas (OCH)

La OCH, también conocida como ACO por las siglas en inglés de *Ant Colony Optimization*, es una técnica que pertenece a los AIC y fue introducida como herramienta para la solución de problemas complejos [26]. Esta técnica es utilizada

principalmente para solucionar problemas que buscan los mejores caminos o rutas en grafos, aunque puede adaptarse en general para cualquier problema de optimización. Las hormigas se comunican a través de sus feromonas, las cuales son sustancias que les permiten encontrar los caminos más cortos entre su nido y la fuente de alimentos. OCH es una metaheurística basada en el comportamiento real de este insecto [27].

3.3. Algoritmos basados en Trayectoria (AT)

Los AT, también conocidos como TBM por las siglas en inglés de *Trajectory-based Metaheuristics* inician con una solución y buscan en el espacio de soluciones candidatas (el espacio de búsqueda) por una mejor solución. Si la encuentran, reemplaza su solución actual por la nueva y continúa con el proceso hasta que se encuentre una solución óptima [28]. Se caracterizan por partir de un punto específico para mejora continua de la solución actual mediante la inspección de un vecindario. En general, la búsqueda finaliza cuando se alcanza un número máximo de iteraciones y se encuentra una solución con una calidad aceptable, o se detecta un estancamiento del proceso [29].

4. Frameworks de Metaheurísticas

Un framework (definido de manera general como entorno o marco de trabajo) es un conjunto de prácticas empleadas en el desarrollo de software para resolver problemas de forma sencilla y segura. Los frameworks mantienen un comportamiento útil, definido e identificable, lo que les permite proporcionar funcionalidades específicas [30].

Existen frameworks para multitud de rutinas y algoritmos en prácticamente cualquier lenguaje de programación, el caso de las metaheurísticas no es la excepción. Con los frameworks se busca utilizar y reutilizar el código existente, agilizar el proceso de desarrollo de software y promover mejores prácticas de programación [5].

Los frameworks de metaheurísticas existentes implementan gran variedad de algoritmos heurísticos de diferente tipo. A continuación se presentan los frameworks seleccionados para resolver el KP 0-1, los cuales se escogieron

principalmente por su madurez, actualización reciente, buena documentación, multiplataforma, desarrollados bajo la plataforma Java y de licencia libre.

4.1. *Java Ant Colony Framework (JACOF)*

JACOF es un framework para la OCH que implementa las variantes más importantes de esta categoría: *Ant System (AS)*, *Elitist Ant System (EAS)*, *Ant Colony System (ACS)*, *Rank-based Ant System (ASRank)*, y el *Max-Min Ant System - MMAS*.

Esta compuesto por la especificación de algoritmos junto con su implementación, colección de problemas clásicos en la literatura y compatibilidad con bibliotecas que incluyen instancias para estos problemas.

Para utilizar JACOF se elige un problema, una variante de OCH y se ejecuta el algoritmo. La documentación y los archivos de descarga son distribuidos en la plataforma GitHub con licencia de uso libre.

4.2. *Java Metaheuristics Search framework (JAMES)*

JAMES es un framework que utiliza AT y proporciona guías de implementación para un conjunto de problemas. En este framework se puede analizar fácilmente el rendimiento de los algoritmos y la influencia de los valores de los parámetros. Una manera sencilla de hacerlo es definir el problema, seleccionar una estrategia de optimización adecuada y aplicar un algoritmo de búsqueda para encontrar la mejor solución.

JAMES está compuesto de tres módulos: principal, extensiones y ejemplos. El primer módulo proporciona una amplia variedad de metaheurísticas como: *Parallel Tempering*, *Variable Neighbourhood Search*, *Random Descent*, entre otros.

El segundo módulo tiene herramientas adicionales para la especificación de problemas (permutación y análisis automático). El tercer módulo proporciona ejemplos de problemas y soluciones con diferentes algoritmos.

El código fuente está bajo Licencia Permisiva de Apache 2.0, la documentación y el sitio

web se encuentran publicados bajo la Licencia Internacional Creative Commons Attribution 4.0.

4.3. *MultiObjective Evolutionary Algorithms (MOEA)*

MOEA es un framework para desarrollo y experimentación con algoritmos evolutivos multi-objetivo (MOEAs). Su objetivo es proporcionar una colección completa de algoritmos y herramientas para la optimización de objetivos únicos y multi-objetivos.

MOEA incluye múltiples variantes de algoritmos genéticos, entre las que destacan: *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)*, *Reference-Point Based Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-III)*, *Genetic Algorithm with Elitism (Single Objective) (GA)*, *Vector Evaluated Genetic Algorithm (VEGA)*. Además, es posible incluir algoritmos de los frameworks JMetal y PISA.

MOEA es de código abierto, proporciona herramientas para el diseño rápido, desarrollo, ejecución y estadísticas de prueba en algoritmos de optimización. Adicionalmente, cuenta con un módulo de descargas que proporciona los recursos necesarios para el desarrollo de aplicaciones y una guía de inicio rápido con los pasos para configurar y ejecutar ejemplos de problemas. La documentación y el sitio web son publicados bajo la licencia GNU Lesser General.

5. Prototipo LFM

El prototipo LFM (“Lanzador de Frameworks de Metaheurísticas”) fue desarrollado bajo la plataforma Java (Open JDK 7) usando exclusivamente bibliotecas de licencia libre. El prototipo resuelve el KP 0-1 utilizando los algoritmos mencionados de cada uno los tres frameworks.

La Figura 1 muestra el diagrama de clases del Prototipo LFM. Las clases principales son:

- **Main**: clase principal que consiste de la ventana principal del Prototipo.
- **Framework**: clase abstracta que contiene la solución (número de ítems en la mochila, peso

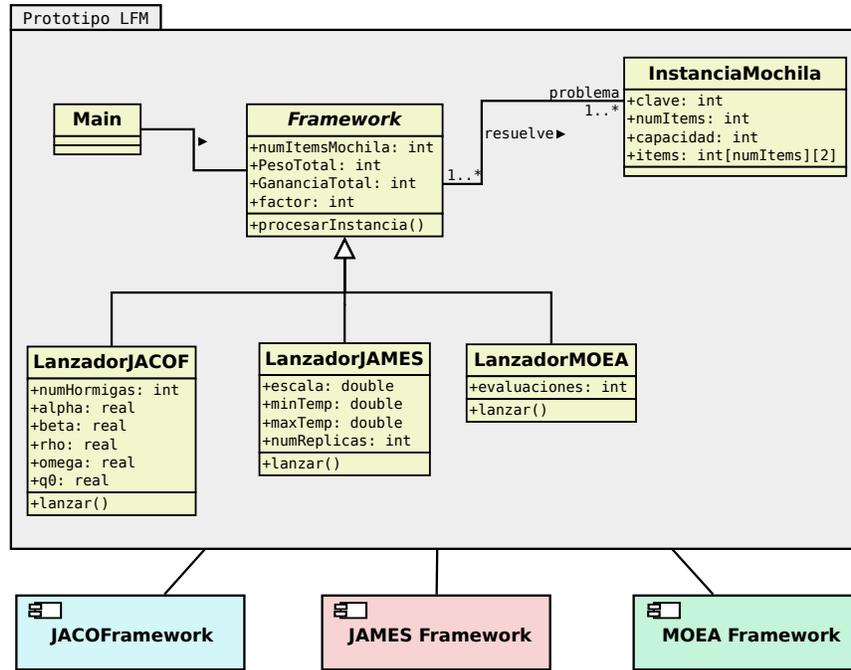


Figura 1: Diagrama de clases

y ganancia totales), así como el factor (criterio de finalización) de cada algoritmo.

- **InstanciaMochila:** representa una instancia particular del KP 0-1. Incluye los datos del problema: total de ítems, capacidad de la mochila, y una matriz con el peso y ganancia de cada ítem.
- **LanzadorMOEA:** hereda de Framework, incluye el número de evaluaciones y los métodos `convertir()` para traducir una instancia al formato requerido por MOEA y el método `lanzar()` para ejecutar uno de los AE.
- **LanzadorJAMES:** hereda de Framework, incluye los atributos escala, temperatura mínima, temperatura máxima, número de réplicas (atributos requeridos por el algoritmo de *Parallel Tempering*). Incorpora los métodos `convertir()` para traducir una instancia al formato requerido por JAMES y el método `lanzar()` para ejecutar un AT.
- **LanzadorJACOF:** hereda de Framework, incluye el número de hormigas, el rastro de feromona, las iteraciones, alfa, beta y la tasa de evaporación. Incorpora los métodos

`convertir()` para traducir una instancia al formato requerido por JACOF y el método `lanzar()` para ejecutar un algoritmo de OCH.

La clase Main utiliza la clase genérica Framework para ejecutar las metaheurísticas seleccionadas por el usuario. A su vez, la clase Framework utiliza la clase InstanciaMochila para resolver una instancia particular del KP 0-1. Las clases LanzadorJACOF, LanzadorJAMES y LanzadorMOEA invocan los algoritmos de los frameworks JACOF, JAMES y MOEA, respectivamente.

En la Figura 2 se muestra la interfaz del Prototipo LFM, la cual contiene los siguientes elementos que describirán a detalle en la siguiente sección:

- Elección de la instancia del KP 0-1 a resolver.
- Factor (criterio de finalización) de cada algoritmo.
- Selección del framework o de los algoritmos individualmente a ejecutar.
- Panel de salida que muestra el resultado obtenido por cada algoritmo y módulo de ayuda.

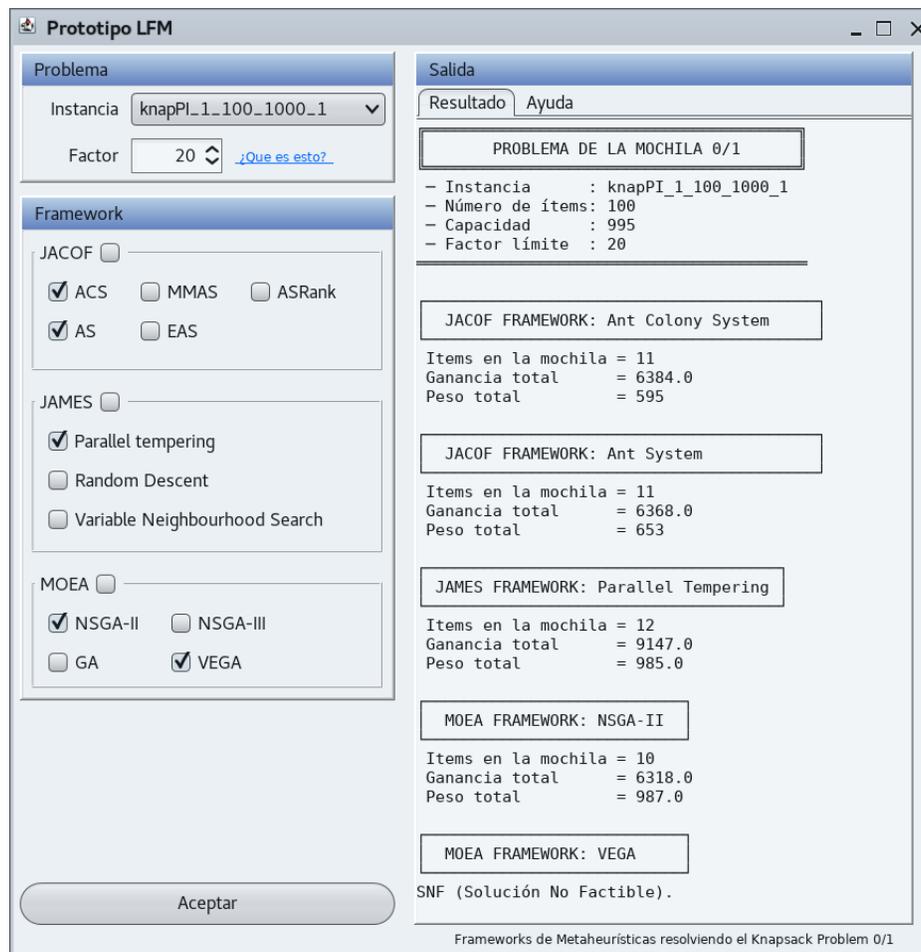


Figura 2: Prototipo LFM (Lanzador de *Frameworks* de Metaheurísticas)

El prototipo LFM es software libre y se encuentra disponible en la plataforma GitHub.

6. Pruebas y resultados

6.1. Diseño experimental

El prototipo LFM se desarrolló y probó en una computadora portátil Alienware M17x Intel Core i7-2670QM CPU @ 2.20GHz bajo el sistema operativo Ubuntu 16.04.3 LTS de 64-bits. Se realizaron 30 ejecuciones independientes para cada framework usando los mismos valores en los parámetros. La sintonización de parámetros del Prototipo LFM usada fue:

MOEA : Los 4 algoritmos genéticos de este framework tienen la misma configuración de parámetros:

- Evaluaciones: $\text{factor} \times 100000$, evalúa la aptitud de cada individuo en la población, los individuos más aptos son seleccionados y el genoma de cada individuo es modificado para formar una nueva generación.

JAMES : El algoritmo *Parallel Tempering* tiene los siguientes parámetros:

- $temp_{min}$: Temperatura mínima que muestra una región más pequeña y puede quedar en mínimos locales.
- $temp_{max}$: Temperatura máxima donde la temperatura más alta intercambia soluciones con la temperatura más baja y puede muestrear una mayor cantidad de espacio.

Tabla 1: Resultados de los algoritmos de JACOF.

| Instancia | Métrica | ACS | | | AS | | | ASRank | | | MMAS | | | EAS | | |
|----------------|---------|-------|---------|------|-------|---------|------|--------|---------|------|-------|---------|------|-------|---------|------|
| | | Ítems | G | Peso | Ítems | G | Peso | Ítems | G | Peso | Ítems | G | Peso | Ítems | G | Peso |
| KP1 | Mejor | 11 | 6384 | 595 | 11 | 6384 | 595 | 11 | 6384 | 595 | 11 | 6384 | 595 | 11 | 6384 | 595 |
| Ítems: 100 | Mediana | 11 | 6384 | 595 | 11 | 6368 | 629 | 11 | 6251.5 | 608 | 11 | 6361 | 595 | 11 | 6279 | 623 |
| Capacidad: 995 | Peor | 11 | 6198 | 639 | 10 | 6059 | 617 | 11 | 5996 | 662 | 10 | 5943 | 550 | 11 | 6142 | 630 |
| | Media | - | 6369.36 | - | - | 6305.16 | - | - | 6243.66 | - | - | 6311.16 | - | - | 6287.63 | - |
| | STD | - | 40.75 | - | - | 86.13 | - | - | 110.87 | - | - | 97.91 | - | - | 74.73 | - |
| KP2-KP5 | | SNF | | | SNF | | | SNF | | | SNF | | | SNF | | |
| KP6-KP7 | | EMI | | | EMI | | | EMI | | | EMI | | | EMI | | |

G: Ganancia

SNF: Solución no factible

EMI: Error de memoria insuficiente

- Número de réplicas: Tiene un valor de 10 y se ordena de acuerdo a la temperatura.

JACOF : Dependiendo la variante de OCH, los valores de los parámetros son:

- *numHormigas*: 10,
- α : 1.0 Factor de influencia de feromonas,
- β : 2.0 Información heurística,
- ρ : 0.1 Coeficiente de evaporación de feromonas,
- ω : 0.1 Parámetro local de decaimiento de feromonas,
- Q_0 : 0.9. Parámetro adicional que corresponde al nivel de exploración de las hormigas.

La variable denominada factor representa el criterio de finalización de cada framework. En el caso de JACOF equivale al número de iteraciones de cada algoritmo de OCH; para JAMES equivale al número de segundos de ejecución de cada AT; en MOEA equivale al número de evaluaciones multiplicado por 100000. Esta configuración del criterio de finalización fue calculada a partir de pruebas empíricas, ejecutando todos los algoritmos para definir un criterio de finalización justo dependiendo el framework.

6.2. Resultados

Se realizaron 30 ejecuciones de cada uno de los 12 algoritmos seleccionados para resolver las

7 instancias del KP 0-1 y así identificar qué framework contiene los algoritmos más eficientes.

Las Tablas 1, 2, y 3 muestran los resultados obtenidos por los algoritmos de cada framework en las 7 instancias del problema de la mochila. La Tabla 4, muestra los resultados del mejor algoritmo de cada framework en cada una de las 7 instancias. El formato de las cuatro tablas es el mismo: en la primera columna se muestran las características de cada instancia (número de ítems y capacidad), la segunda columna contiene las métricas utilizadas (mejor solución, peor, media, mediana y desviación estándar), y finalmente se muestra el número de ítems en la mochila, la ganancia y el peso, por cada algoritmo. Los algoritmos se muestran ordenados de izquierda a derecha de acuerdo a la mejor solución obtenida.

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos por las 5 variantes de OCH incluidas en JACOF, en las 7 instancias del problema. Como se puede observar, los 5 algoritmos basados en colonia de hormigas únicamente resuelven la instancia más sencilla del problema, el KP1. En cuanto a las instancias KP6 y KP7, consideradas las más difíciles, los 5 algoritmos lanzan una `OutOfMemoryException`, que ocurre cuando la máquina virtual de Java carece de la memoria suficiente para instanciar nuevos objetos. Cabe mencionar que no se realizó ninguna configuración adicional para ejecutar el Prototipo, se utilizó la memoria que utiliza de manera predeterminada la máquina virtual de Java.

La Tabla 2 contiene los resultados obtenidos por

Tabla 2: Resultados de los algoritmos de JAMES.

| Instancia | Métrica | Parallel Tempering | | | Random Descent | | | Variable Neighbourhood Search | | |
|---|---------|--------------------|-----------|-------|----------------|----------|-------|-------------------------------|----------|--------|
| | | Ítems | Ganancia | Peso | Ítems | Ganancia | Peso | Ítems | Ganancia | Peso |
| KP1 Ítems: 100 Capacidad: 995 | Mejor | 12 | 9147 | 985 | 8 | 6919 | 981 | 8 | 6871 | 959 |
| | Mediana | 12 | 9147 | 985 | 8 | 6895 | 975.5 | 7 | 6150 | 965.5 |
| | Peor | 12 | 9147 | 985 | 7 | 6295 | 970 | 6 | 5429 | 972 |
| | Media | - | 4268.6 | - | - | 900.13 | - | - | 410 | - |
| | STD | - | 0 | - | - | 304.84 | - | - | 1019.64 | - |
| KP2 Ítems: 200 Capacidad: 1008 | Mejor | 16 | 11238 | 987 | 11 | 9245 | 998 | 12 | 9738 | 1004 |
| | Mediana | 16 | 11238 | 987 | 11 | 9245 | 998 | 11 | 9134 | 1000.5 |
| | Peor | 16 | 11238 | 987 | 11 | 9245 | 998 | 10 | 8530 | 997 |
| | Media | - | 1123.8 | - | - | 308.16 | - | - | 608.93 | - |
| | STD | - | 0 | - | - | 0 | - | - | 854.18 | - |
| KP3 Ítems: 500 Capacidad: 2543 | Mejor | 42 | 28857 | 2543 | 40 | 35844 | 5001 | | SNF | |
| | Mediana | 42 | 28857 | 2543 | 40 | 35844 | 5001 | | SNF | |
| | Peor | 42 | 28857 | 2543 | 40 | 35844 | 5001 | | SNF | |
| | Media | - | 3847.6 | - | - | 1194.8 | - | | SNF | |
| | STD | - | 0 | - | - | 0 | - | | SNF | |
| KP4 Ítems: 1000 Capacidad: 5002 | Mejor | 81 | 54403 | 4998 | | SNF | | | SNF | |
| | Mediana | 77 | 53894 | 4998 | | SNF | | | SNF | |
| | Peor | 71 | 52653 | 4998 | | SNF | | | SNF | |
| | Media | - | 8937.56 | - | | SNF | | | SNF | |
| | STD | - | 842.66 | - | | SNF | | | SNF | |
| KP5 Ítems: 2000 Capacidad: 10011 | Mejor | 153 | 109759 | 10011 | | SNF | | | SNF | |
| | Mediana | 153 | 109759 | 10011 | | SNF | | | SNF | |
| | Peor | 153 | 109759 | 10011 | | SNF | | | SNF | |
| | Media | - | 3658.63 | - | | SNF | | | SNF | |
| | STD | - | 0 | - | | SNF | | | SNF | |
| KP6 Ítems: 5000 Capacidad: 25016 | Mejor | 287 | 239149 | 25009 | | SNF | | | SNF | |
| | Mediana | 271 | 228332 | 24955 | | SNF | | | SNF | |
| | Peor | 26 | 14070 | 14926 | | SNF | | | SNF | |
| | Media | - | 16051.7 | - | | SNF | | | SNF | |
| | STD | - | 126942.09 | - | | SNF | | | SNF | |
| KP7 Ítems: 10000 Capacidad: 49877 | Mejor | 503 | 432592 | 49868 | | SNF | | | SNF | |
| | Mediana | 296 | 273071 | 49314 | | SNF | | | SNF | |
| | Peor | 45 | 23026 | 22170 | | SNF | | | SNF | |
| | Media | - | 24289.63 | - | | SNF | | | SNF | |
| | STD | - | 206443.6 | - | | SNF | | | SNF | |

SNF: Solución no factible.

los 3 algoritmos de JAMES en las 7 instancias del problema. En primer lugar, el algoritmo de *Parallel Tempering* resuelve efectivamente las 7 instancias del problema, resaltando el hecho que la desviación estándar es igual a 0 para las primeras 5 instancias, pero muy alta para las otras 2 instancias, consideradas más difíciles. Por otra parte, el algoritmo *Random Descent* resuelve únicamente las 3 primeras instancias del problema, eso sí, con desviación estándar igual a 0. Para el caso del algoritmo *Variable Neighbourhood Search*, éste resuelve únicamente las 2 primeras instancias y con alta variabilidad, como lo demuestra su desviación estándar.

Los resultados obtenidos por los AE de MOEA se muestran en la Tabla 3. Los 4 algoritmos

seleccionados fueron ejecutados con el mismo número de evaluaciones, de los cuales solamente el NSGA-II y NSGA-III encuentran soluciones para las primeras 4 instancias del problema. GA solamente resuelve 2 instancias, mientras que VEGA no encontró solución para ninguna de las instancias. En cuanto a las instancias KP5 a KP7, ninguno de los algoritmos encontró una solución válida.

En la Figura 3 se muestra el gráfico con las mejores soluciones para el KP 0-1 obtenidas por el mejor algoritmo de cada framework, derivado de las 30 ejecuciones por instancia. En general, JAMES obtiene los mejores resultados. Aunque MOEA supera a JAMES en la instancia KP3, éste no encuentra soluciones a partir de la instancia

Tabla 3: Resultados de los algoritmos de MOEA.

| Instancia | Métrica | NSGA-II | | | NSGA-III | | | GA | | | VEGA | | |
|---------------------------------------|---------|---------|----------|-------|----------|----------|--------|-------|----------|------|-------|----------|------|
| | | Ítems | Ganancia | Peso | Ítems | Ganancia | Peso | Ítems | Ganancia | Peso | Ítems | Ganancia | Peso |
| KP1 Ítems: 100 Capacidad: 995 | Mejor | 11 | 6384 | 993 | 11 | 6384 | 993 | 11 | 6384 | 993 | SNF | | |
| | Mediana | 11 | 6368 | 989 | 10.5 | 6251.5 | 977 | 10 | 6318 | 981 | SNF | | |
| | Peor | 11 | 6116 | 992 | 9 | 5753 | 962 | 10 | 6132 | 973 | SNF | | |
| | Media | - | 6334.76 | - | - | 6210.03 | - | - | 6310 | - | SNF | | |
| | STD | - | 75.60 | - | - | 160.04 | - | - | 62.81 | - | SNF | | |
| KP2 Ítems: 200 Capacidad: 1008 | Mejor | 18 | 10463 | 993 | 18 | 10463 | 993 | 17 | 10001 | 996 | SNF | | |
| | Mediana | 18 | 10390 | 997.5 | 18 | 10263.5 | 1000 | 16 | 9196 | 985 | SNF | | |
| | Peor | 17 | 10021 | 1005 | 16 | 9926 | 1001 | 15 | 8080 | 847 | SNF | | |
| | Media | - | 10337.46 | - | - | 10250.46 | - | - | 9148.63 | - | SNF | | |
| | STD | - | 139.33 | - | - | 182.60 | - | - | 457.36 | - | SNF | | |
| KP3 Ítems: 500 Capacidad: 2543 | Mejor | 13 | 29505 | 2537 | 42 | 29217 | 2540 | SNF | | | SNF | | |
| | Mediana | 42 | 29315 | 2537 | 42 | 28481.5 | 2534.5 | SNF | | | SNF | | |
| | Peor | 41 | 28868 | 2510 | 40 | 27774 | 2541 | SNF | | | SNF | | |
| | Media | - | 29271.63 | - | - | 28445.96 | - | SNF | | | SNF | | |
| | STD | - | 162.500 | - | - | 340.73 | - | SNF | | | SNF | | |
| KP4 Ítems: 1000 Capacidad: 5002 | Mejor | 71 | 44484 | 5001 | 64 | 36642 | 4963 | SNF | | | SNF | | |
| | Mediana | 68 | 40919.5 | 4936 | 61 | 32339 | 4939 | SNF | | | SNF | | |
| | Peor | 64 | 36663 | 4827 | 50 | 23164 | 4889 | SNF | | | SNF | | |
| | Media | - | 40915.4 | - | - | 30475.76 | - | SNF | | | SNF | | |
| | STD | - | 2026.91 | - | - | 2867.59 | - | SNF | | | SNF | | |
| KP5 - KP7 | | SNF | | | SNF | | | SNF | | | SNF | | |

SNF: Solución no factible.

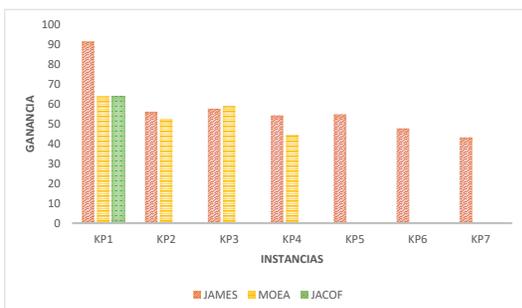


Figura 3: Mejores resultados por instancia

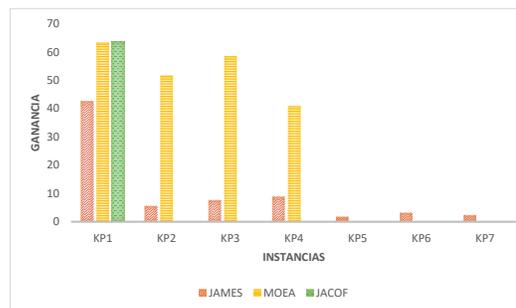


Figura 4: Media de los resultados por instancia

KP5. En el caso de JACOF, solo encuentra solución para la primera instancia del problema con el mismo resultado que MOEA.

En la Figura 4 se presenta la media de los resultados del mejor algoritmo de cada framework. Se puede observar que, a pesar de que el framework JAMES obtuvo los mejores resultados, MOEA sobresale en la distribución de la media aritmética.

7. Conclusiones

Resolver problemas de optimización de forma eficiente es una tarea compleja. Afortunadamente,

existen algoritmos e implementaciones de terceros que pueden apoyar en esta situación.

En este artículo se utilizaron tres frameworks de metaheurísticas integrados por diferentes familias de algoritmos para resolver el problema de la mochila 0-1. Los frameworks empleados fueron (en orden alfabético) JACOF, JAMES y MOEA. En JAMES se seleccionaron 3 metaheurísticas basadas en trayectoria de acuerdo al número de trabajos en los que han sido abordados en la literatura. En MOEA se seleccionaron 4 variantes de algoritmos genéticos nativos del framework, sin considerar algoritmos que pueden incluirse a partir

Tabla 4: Resultados generales.

| Instancia | Métrica | Parallel Tempering (JAMES) | | | NSGA-II (MOEA) | | | ACS (JACOF) | | |
|---|---------|----------------------------|-----------|-------|----------------|----------|-------|-------------|----------|------|
| | | Ítems | Ganancia | Peso | Ítems | Ganancia | Peso | Ítems | Ganancia | Peso |
| KP1 Ítems: 100 Capacidad: 995 | Mejor | 12 | 9147 | 985 | 11 | 6384 | 993 | 11 | 6384 | 595 |
| | Mediana | 12 | 9147 | 985 | 11 | 6368 | 989 | - | 6384 | - |
| | Peor | 12 | 9147 | 985 | 11 | 6116 | 992 | 11 | 6198 | 639 |
| | Media | - | 4268.6 | - | - | 6334.76 | - | - | 6369.36 | - |
| | STD | - | 0 | - | - | 75.60 | - | - | 40.75 | - |
| KP2 Ítems: 200 Capacidad: 1008 | Mejor | 16 | 11238 | 987 | 18 | 10463 | 993 | - | SNF | - |
| | Mediana | 16 | 11238 | 987 | 18 | 10390 | 997.5 | - | SNF | - |
| | Peor | 16 | 11238 | 987 | 17 | 10021 | 1005 | - | SNF | - |
| | Media | - | 1123.8 | - | - | 10337.46 | - | - | SNF | - |
| | STD | - | 0 | - | - | 139.33 | - | - | SNF | - |
| KP3 Ítems: 500 Capacidad: 2543 | Mejor | 42 | 28857 | 2543 | 43 | 29505 | 2537 | - | SNF | - |
| | Mediana | 42 | 28857 | 2543 | 42 | 29315 | 2537 | - | SNF | - |
| | Peor | 42 | 28857 | 2543 | 41 | 28868 | 2510 | - | SNF | - |
| | Media | - | 3847.6 | - | - | 29271.63 | - | - | SNF | - |
| | STD | - | 0 | - | - | 162.50 | - | - | SNF | - |
| KP4 Ítems: 1000 Capacidad: 5002 | Mejor | 81 | 54403 | 4998 | 71 | 44484 | 5001 | - | SNF | - |
| | Mediana | 77 | 53894 | 4998 | 68 | 40919.5 | 4936 | - | SNF | - |
| | Peor | 71 | 52653 | 4998 | 64 | 36663 | 4827 | - | SNF | - |
| | Media | - | 8937.56 | - | - | 40915.4 | - | - | SNF | - |
| | STD | - | 842.66 | - | - | 2026.91 | - | - | SNF | - |
| KP5 Ítems: 2000 Capacidad: 10011 | Mejor | 153 | 109759 | 10011 | - | SNF | - | - | SNF | - |
| | Mediana | 153 | 109759 | 10011 | - | SNF | - | - | SNF | - |
| | Peor | 153 | 109759 | 10011 | - | SNF | - | - | SNF | - |
| | Media | - | 3658.63 | - | - | SNF | - | - | SNF | - |
| | STD | - | 0 | - | - | SNF | - | - | SNF | - |
| KP6 Ítems: 5000 Capacidad: 25016 | Mejor | 287 | 239149 | 25009 | - | SNF | - | - | EMI | - |
| | Mediana | 271 | 228332 | 24955 | - | SNF | - | - | EMI | - |
| | Peor | 26 | 14070 | 14926 | - | SNF | - | - | EMI | - |
| | Media | - | 16051.7 | - | - | SNF | - | - | EMI | - |
| | STD | - | 126942.09 | - | - | SNF | - | - | EMI | - |
| KP7 Ítems: 10000 Capacidad: 49877 | Mejor | 503 | 432592 | 49868 | - | SNF | - | - | EMI | - |
| | Mediana | 296 | 273071 | 49314 | - | SNF | - | - | EMI | - |
| | Peor | 45 | 23026 | 22170 | - | SNF | - | - | EMI | - |
| | Media | - | 24289.63 | - | - | SNF | - | - | EMI | - |
| | STD | - | 206443.6 | - | - | SNF | - | - | EMI | - |

SNF: Solución no factible.

EMI: Error de memoria insuficiente

de otros frameworks. De JACOF se incluyeron las 5 variantes de OCH presentes en el framework.

Estos algoritmos se implementaron en un Prototipo multiplataforma denominado LFM: “Lanzador de Frameworks de Metaheurísticas”, con el objetivo de contar con una interfaz de usuario adecuada para resolver el problema. El Prototipo LFM es software libre disponible en línea.

Para medir la eficiencia de los frameworks se realizaron 30 ejecuciones independientes de cada algoritmo en el prototipo LFM, resolviendo un subconjunto de 7 instancias públicas del KP 0-1. Los resultados obtenidos se compararon de acuerdo a la ganancia total, ya que el objetivo es maximizar este valor con los ítems disponibles.

El comportamiento de cada framework es

distinto, y dado que cada algoritmo tiene una configuración de parámetros distinta, esto influye en el desempeño de cada uno de los frameworks analizados. JAMES inicia con una solución y realiza modificaciones locales para mejorarla, por lo que encuentra soluciones rápidamente. Sin embargo, su solución final depende de la solución inicial. MOEA simula la evolución natural, donde existe un conjunto de entidades que representan posibles soluciones, se mezclan y compiten entre sí. Las más aptas son capaces de prevalecer durante más tiempo, evolucionando hacia mejores soluciones. JACOF emula el comportamiento de las hormigas cuando están en busca de un camino entre la colonia y una fuente de alimentos.

En los resultados experimentales de la Tabla 4

se observa que el algoritmo de *Parallel Tempering* de JAMES resuelve las 7 instancias del problema, a diferencia del NSGA-II de MOEA que resuelve únicamente 4 instancias del problema y el ACS de JACOF que solo resuelve la instancia KPI. Sin embargo, aunque JAMES obtuvo los mejores resultados al resolver todas las instancias del problema, MOEA tiene una mejor distribución de la media, es decir, no hay mucha desviación entre el mejor y el peor resultado. En otras palabras, JAMES en algunas ejecuciones no encontró una solución factible, mientras que MOEA en todas las ejecuciones logró encontrar una solución válida (en 4 instancias del problema).

Por otro lado, para medir la usabilidad de los frameworks se consideró la facilidad de codificación para implementar cada algoritmo seleccionado. Con respecto al uso, los algoritmos de MOEA son los más fáciles de implementar de acuerdo con el número de líneas de código que se emplean, seguido por el JACOF que solo diferencia en la configuración de parámetros de cada algoritmo. No obstante JAMES es el más complicado de implementar debido al número de líneas de código que requiere la implementación de cada metaheurística.

De cierta manera, los resultados obtenidos fueron los esperados, ya que los algoritmos basados en colonias de hormigas son generalmente los de menor rendimiento y los algoritmos genéticos no son tan eficientes en comparación con los basados en Trayectoria. Como trabajo futuro se tiene contemplado realizar pruebas con otros frameworks que incluyan metaheurísticas de distintas familias.

8. Referencias

- [1] P. Siarry and Z. Michalewicz. *Advances in Metaheuristic methods for hard optimization*. Springer, 2008.
- [2] Z. Michalewicz and D. B. Fogel. *How to solve it: modern heuristics*. Springer, 2 edition, 2004.
- [3] A. P. Engelbrecht. *Fundamentals of computational swarm intelligence*. John Wiley & Sons, 1 edition, 2006.
- [4] S. Luke. *Essentials of Metaheuristics*. Lulu, 2 edition, 2013. Available for free at <https://cs.gmu.edu/~sean/book/metaheuristics/>.
- [5] J. M. Galindo-Haro. Diseño e implementación de un marco de trabajo (framework) de presentación para aplicaciones JEE. Trabajo Especial de Grado, Universitat Oberta de Catalunya, España, 2010.
- [6] X. Kong, L. Gao, H. Ouyang, and S. Li. A simplified Binary Harmony Search algorithm for large scale 0-1 knapsack problems. *Expert Systems with Applications*, 42(12):5337–5355, 2015.
- [7] Y. Kim, J-H. Kim, and K-H. Han. Quantum-inspired multiobjective evolutionary algorithm for multiobjective 0/1 knapsack problems. In *IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2006. CEC 2006*, pages 2601–2606. IEEE, 2006.
- [8] H. Shi. Solution to 0/1 knapsack problem based on improved Ant Colony Algorithm. In *Information Acquisition, 2006 IEEE International Conference on*, pages 1062–1066. IEEE, 2006.
- [9] T. Cormen, C. Leiserson, R. Rivest, and C. Stein. *Introduction to Algorithms*. The MIT Press & McGraw Hill, 2 edition, 2001.
- [10] A. Fuentes-Penna, D. Vélez-Díaz, S. Moreno-Gutiérrez, M. Martínez-Cervantes y O. Sánchez-Muñoz. Problema de la mochila (*Knapsack problem*). *XIKUA Boletín Científico de la Escuela Superior de Tlahuelilpan*, 3(6), 2015.
- [11] D. Soto, W. Soto y Y. Pinzón. Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas Multiobjetivo aplicado al problema de la mochila multidimensional. *Revista Programación Matemática y Software*, 3(2):20–31, 2012.
- [12] H. Kellerer, U. Pferschy, and D. Pisinger. *Introduction to NP-Completeness of Knapsack Problems*. Springer Berlin Heidelberg, 2004.
- [13] D. Pisinger. The quadratic knapsack problem—a survey. *Discrete applied mathematics*, 155(5):623–648, 2007.
- [14] R. M. Karp. Reducibility among combinatorial problems. In *Complexity of computer computations*, pages 85–103. Springer, 1972.
- [15] S. Martello, D. Pisinger, and P. Toth. New trends in exact algorithms for the 0-1 knapsack problem. *European Journal of Operational Research*, 123(2):325–332, 2000.
- [16] B. Silva y L. Torres. Acerca de una versión dinámica del problema de la mochila. *Revista Politécnica*, 34(1):142, 2014.
- [17] P. Gilmore and R. Gomory. A linear programming approach to the cutting stock problem. *Operations research*, 9(6):849–859, 1961.
- [18] R. Parra-Hernandez, D. Vanderster, and N. Dimopoulos. Resource management and knapsack formulations on the grid. In *Grid Computing, 2004. Proceedings. Fifth IEEE/ACM International Workshop on*, pages 94–101. IEEE Computer Society, 2004.
- [19] E. Balas and E. Zemel. An algorithm for large zero-one knapsack problems. *Operations Research*, 28(5):1130–

- 1154, 1980.
- [20] C. Cobos, H. Dulcey, J. Ortega, M. Mendoza, and A. Ordoñez. A Binary Fisherman Search Procedure for the 0/1 Knapsack Problem. In O. Luaces, J.A. Gámez, E. Barrenechea, A. Troncoso, M. Galar, H. Quintián, and E. Corchado, editors, *Advances in Artificial Intelligence*, pages 447–457, Cham, 2016. Springer International Publishing.
 - [21] F. Glover. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & Operations Research*, 13(5):533–549, 1986. Applications of Integer Programming.
 - [22] I. Osman and J. Kelly. *Metaheuristics: Theory and Applications*. Springer, US., 1 edition, 1996.
 - [23] O. Suarez. Una aproximación a la heurística y metaheurísticas. *INGE UAN-Tendencias en la Ingeniería*, 1(2), 2011.
 - [24] D. E. Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley Publishing Co, Reading, Massachusetts, 1 edition, 1989.
 - [25] P. A. Vikhar. Evolutionary algorithms: A critical review and its future prospects. In *2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTS-PICC)*, pages 261–265. IEEE, 2016.
 - [26] M. Dorigo and C. Blum. Ant Colony Optimization Theory: A Survey. *Theoretical Computer Science*, 344(2-3):243–278, 2005.
 - [27] C. Robles-Algarín. Optimización por colonia de hormigas: aplicaciones y tendencias. *Revista Ingeniería Solidaria*, 6(10):83–89, 2010.
 - [28] J. Shi and Q. Zhang. A new cooperative framework for parallel trajectory-based metaheuristics. *Applied Soft Computing*, 65:374 – 386, 2018.
 - [29] N. Alancay, S.M. Villagra y N.A. Villagra. Metaheurísticas de trayectoria y poblacional aplicadas a problemas de optimización combinatoria. *Informes Científicos-Técnicos UNPA*, 8(1):202–220, 2016.
 - [30] D. Riehle. *Framework Design: A Role Modeling Approach*. PhD thesis, Universidad de Hamburgo, Zurich, Suiza, 2000.

Design, construction and evaluation of the performance of a load reactor sequential for treatment of residual waters of tanneries

Estefania Freytez^{*,a}, Adriana Márquez^b, María Carolina Pire^a, Edilberto Guevara^b, Sergio Pérez^b

^aUniversidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Programa de Ingeniería Agroindustrial.

^bCentro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales, Universidad de Carabobo, Venezuela.

Abstract.- This research deals with, the design, construction and evaluation of the operation of a sequencing batch reactor (SBR) for wastewater treatment of tanneries. The experimental phase of SBR operated with granular biomass and suspended biomass was executed in the following stages: 1) construction of SBR, 2) selection of the substrate, 3) acclimatization of the biomass, 4) experimental design, 5) evaluation of the performance of SBR under aerobic and anaerobic conditions, 6) statistical analysis, 7) comparison of results. The cycle duration factor assigned in the 12 and 24 hour design tends to be included within the low test frequencies, making it distinctive. It is concluded that the rate of removal of the COD in an SBR for cycle lengths of 6, 12 and 24 hours using granular biomass under aerobic conditions was 2 times higher than the rate of removal of the suspended biomass. In terms of granular biomass, a gradient of COD removal was found under the condition of 25 % anaerobic-75 % aerobic, less than the gradient of COD removal with respect to the purely aerobic condition.

Keywords: sequencing batch reactor; granular biomass; suspended biomass.

Diseño, construcción y evaluación del desempeño de un reactor de carga secuencial para tratamiento de aguas residuales de tannerías

Resumen.- En este artículo se presenta el diseño, construcción y evaluación del desempeño de un reactor de carga secuencial (SBR, en inglés) para tratamiento de aguas residuales de tannerías. La fase experimental del SBR operado con biomasa granular y con biomasa suspendida se ejecutó en las siguientes etapas: 1) construcción del SBR, 2) selección del sustrato, 3) aclimatación de la biomasa, 4) diseño experimental, 5) evaluación del desempeño del SBR bajo condiciones aerobias y anaerobias, 6) análisis estadístico de los resultados, 7) comparación de resultados. El factor duración del ciclo asignado en el diseño de 12 y 24 h tiende a estar incluido dentro de las frecuencias bajas de pruebas, haciéndolo distintivo. Se concluye que la tasa de remoción de la DQO en un SBR para duraciones de ciclo de 6, 12 y 24 horas usando biomasa granular bajo condiciones aerobias resultó 2 veces superior a la tasa de remoción de la biomasa suspendida. En cuanto a la biomasa granular se encontró un gradiente de remoción de DQO, bajo condición de 25 % anaerobia-75 % aerobia, menor del correspondiente a la remoción de DQO en la condición netamente aerobia.

Palabras claves: reactor de carga secuencial; biomasa granular; biomasa suspendida.

Recibido: 16 septiembre 2018

Aceptado: 14 diciembre 2018

1. Introducción

El tratamiento biológico de las aguas residuales es un proceso de oxidación en el cual la materia orgánica biodegradable es descompuesta por la acción de los microorganismos en un medio

controlado que puede ser aeróbico o anaeróbico, formando compuestos o productos estables de composición más sencilla [1]. Este tipo de tratamiento biológico constituye una importante alternativa para la depuración de las aguas residuales domésticas.

Los procesos de cultivo en suspensión se pueden llevar a cabo en diferentes tipos de reactores; la mayoría son sistemas de flujo continuo en los que los reactantes entran y los productos son extraídos de forma continua. Los reactores continuos de mezcla completa tienen

*Autor para correspondencia:

Correo-e: estefaniafreytez@gmail.com (Estefania Freytez)

una corriente de alimentación y una de salida; se consideran como una mezcla perfecta porque están lo suficientemente agitados; es decir mezcla homogénea e instantánea de modo que cualquier reactante que entra en el reactor con el alimento es dispersado.

Los tratamientos biológicos pueden clasificarse como procesos biológicos de soporte sólido (filtros percoladores) y procesos de cultivo en suspensión (biomasa suspendida y biomasa granular); en estos últimos se suele recurrir a una decantación y recirculación de la biomasa, siendo los más comunes los lodos activados, las lagunas aireadas y el lagunaje [2].

El reactor por carga secuencial o SBR por sus siglas en inglés (*Sequencing Batch Reactor*), es un sistema de lodos activados para tratamiento del agua residual que utiliza ciclos de llenado y descarga. En este sistema el agua residual entra en una tanda a un reactor único, recibe el tratamiento para remover componentes indeseables y luego se descarga. En este reactor único se logran la homogenización de caudales, la aireación y la sedimentación. Para optimizar el desempeño del sistema, se utilizan dos o más reactores en una secuencia de operación predeterminada. Los sistemas SBR han sido utilizados con éxito para tratar aguas residuales, tanto municipales, como industriales; son especialmente efectivos para caso de caudales reducidos o intermitentes.

Los procesos unitarios que intervienen en un sistema SBR son idénticos a los de un proceso convencional de lodos activados. En ambos sistemas intervienen la aireación y la sedimentación-clarificación; no obstante, existe una importante diferencia. En el caso de los lodos activados, los procesos se llevan a cabo simultáneamente y en forma continua en tanques separados; mientras que en SBR los procesos tienen lugar en el mismo tanque [1] funcionando de forma discontinua en ciclos de llenado y vaciado que permiten la selección y enriquecimiento de la biomasa durante el tratamiento biológico, adecuándose al tratamiento de efluentes altamente contaminados, como son las aguas residuales de las tenerías, usado para la eliminación conjunta de materia orgánica y nutrientes [3].

El uso de biomasa granular tiene ventajas en comparación con el sistema de lodos activados y ha resultado factible debido a que reduce la cantidad de lodos producidos por dos posibles vías; menor cantidad en peso de lodo producido y/o menor volumen del lodo [4]. Los tratamientos biológicos convencionales como lodos activados con biomasa suspendida poseen desventajas adicionales debido a los fenómenos de flotación, sedimentación y formación de espuma ocasionados por la presencia de organismos filamentosos, que generan un flóculo filamentosos y difícil de sedimentar en el tiempo adecuado; además, presentan la dificultad de la baja eficiencia de retención de biomasa en el interior del reactor, lo que hace necesario implementar una unidad de sedimentación para que el lodo seleccionado por gravedad sea recirculado. Lo mencionado ha dado paso al proceso de granulación de biomasa en condiciones aerobias, como alternativa para solucionar el problema de flotación del lodo o bulking que es común en dichos tratamientos [5].

Kreuk [6] define la biomasa granular como agregados de origen microbiano que no coagulan bajo condiciones de fuerzas de estrés reducidas y que sedimentan significativamente más rápido que los flóculos de los lodos activados. El uso de biomasa granular posee ciertas ventajas sobre el uso de biomasa suspendida en cuanto a que el proceso de sedimentación del sólido (biomasa) y la fase líquida (efluente clarificado) son mucho mejores en un sistema granular [4].

El propósito de esta investigación es evaluar el funcionamiento de un reactor de carga secuencial en el tratamiento biológico de aguas residuales usando biomasa suspendida y otro con biomasa granular; con un diseño experimental basado en tres factores experimentales: a) tiempo de llenado, b) duración del ciclo y c) secuencia de aireación. Las variables de respuesta empleadas para evaluar el funcionamiento son: en el caso de la biomasa granular: la DQO en el afluente y efluente. En el caso de la biomasa suspendida: DQO, NTK y NH_4^+ en el afluente y efluente al SBR

2. Materiales y métodos

La metodología del trabajo consta de las siguientes etapas:

1. Construcción del SBR.
2. Selección del sustrato.
3. Aclimatación de la biomasa.
4. Diseño experimental.
5. Evaluación del desempeño del SBR bajo condiciones aerobias y anaerobias.
6. Análisis estadístico.
7. Comparación de resultados.

1) *Construcción del SBR.* Se fabricó un recipiente en forma cilíndrica de 50 cm de alto por 10 cm de diámetro, de 3 litros de capacidad cuyo volumen útil fue de 2 litros, construido de material acrílico transparente (polimetilmetacrilato, PMMA), como se puede observar en la Figura 1. El reactor posee tres ojivas, una en la parte alta a 34 cm del fondo por donde se realiza la carga del agua residual y dos ojivas en la parte inferior, una ubicada a 8 cm del fondo por donde se descarga el efluente tratado y la otra en la parte más baja del reactor y que se usa como drenaje para la limpieza del sistema. El reactor opera de manera automatizada mediante el uso de temporizadores digitales (Marca Exceline, Venezuela) que activan y desactivan cada uno de los componentes electrónicos utilizados durante el tratamiento del efluente industrial. La carga del reactor se realiza mediante la activación de una válvula solenoide 1/4 (ASCO, México) que permite la carga por gravedad del efluente y para la descarga del agua residual se cuenta con una bomba peristáltica (Easy Load II, Masterflex L/S, Cole Parmer, EEUU) que permite la salida del efluente luego del tratamiento [7].

El segundo reactor por carga secuencial fue un dispositivo cilíndrico de vidrio cuyas dimensiones fueron similares a los reactores por carga (14,5 cm de diámetro y 26 cm de alto). Se mantuvo el volumen de trabajo en 2 L (30 % biomasa y 70 % agua residual). El SBR funcionó de manera automatizada por medio de temporizadores digitales (Thomas Scientific, EUA) que controlaban los equipos que integran el sistema de tratamiento a escala de laboratorio.

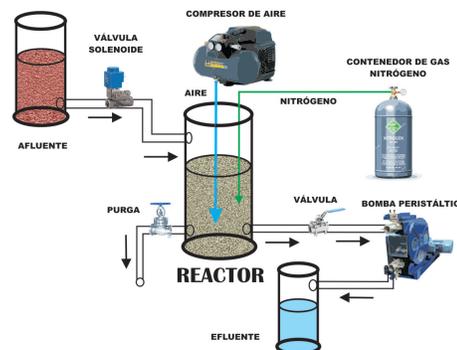


Figura 1: Esquema del reactor por carga secuencial SBR usado durante la investigación (N_2 se usó sólo para los tratamientos anaeróbicos/óxicos).

Se emplearon bombas peristálticas (Easy Load II, Masterflex L/S, Cole Parmer, EUA) para cargar y descargar el agua residual en el SBR [8].

2) *Selección del sustrato.* El sustrato está constituido por el efluente de una tenería cuyas características fisicoquímicas se indican en la Tabla 1. El agua residual contiene una concentración de 5584,74 mg/L de DQO y 80,18 mg/L de NH_4^+ [7]. Durante el experimento con biomasa suspendida los valores de las variables medidas a los efluentes de los procesos de pelambre, curtido, teñido, pelambre-teñido, curtido-teñido y agua residual almacenada en la laguna se pueden observar en la Tabla 2 [8]. La tenería de la que proviene el agua residual para ambos estudios se ubica en la antigua carretera Barquisimeto-Carora del Estado Lara, Venezuela; la empresa trabaja con pieles frescas de origen vacuno y caprino produciendo un agua residual altamente contaminante, con elevado contenido de DQO, nitrógeno, cromo y otras sales inorgánicas [9]. La variación del porcentaje de remoción de materia orgánica y nitrógeno usando agua residual y variación del porcentaje de remoción de materia orgánica y nitrógeno usando agua sintética.

3) *Aclimatación de la biomasa al sustrato.* la biomasa granular utilizada se obtuvo de un reactor biológico a escala de laboratorio que procesaba efluentes sintéticos con características similares a

Tabla 1: Caracterización del agua residual cruda de la tenería.

| Parámetros | Concentración (mg/L) | Límites máximos o rangos [10] |
|--------------------------------|----------------------|-------------------------------|
| pH | 9,28 ± 0,28 | 6 a 9 |
| Alcalinidad | 20,850 ± 597,22 | |
| NT | 260,40 ± 39,10 | 40 mg/L |
| N-NH ₄ ⁺ | 80,83 ± 13,22 | |
| N-NO ₃ ⁻ | 2 ± 0 | Nitrato+Nitrito: 10 mg/L |
| N-NO ₂ ⁻ | 2 ± 0 | Nitrato+Nitrito: 10 mg/L |
| DQO | 5.584,74 ± 680,36 | 350 mg/L |
| DBO | 2027,39 ± 765,92 | 60 mg/L |
| Cloruros | 58.804,00 ± 101,82 | 1000 mg/L |
| Cromo Total | 3 ± 0 | 2 mg/L |
| Conductividad | 4.190 ± 677,41 | -- |

Fuente: Freytez [7].

Tabla 2: Caracterización del agua residual cruda de la tenería.

| Variable | Método N° |
|-------------------------------|------------------------------|
| pH | 4500 HB |
| DBO _{5,20} | 5210 |
| DBO _U | Mínimos cuadrados y Fujimoto |
| DQO _t | 5220-C |
| DQO _s | 5220-C ¹ |
| Sólidos suspendidos totales | 2540 D |
| Sólidos suspendidos volátiles | 2540 E |
| Alcalinidad | 2320 B |
| Acidez | 2310 B |
| Nitrógeno Kjeldahl | 4500-N _{org} B |
| Nitrógeno Amoniacal | 4500-NH ₃ D |
| Nitratos | - 4500- NO ₃ |
| Nitritos | - 4500- NO ₂ B |
| Ortofosfatos | 4500-P E |
| Cromo total | 3111 B y ICP-MS |

Fuente: Pire [9].

la de la tenería [9]. Para el segundo experimento la biomasa suspendida utilizada se encontraba aclimatada a las características del efluente que mostró las mejores características de tratabilidad (menor concentración de DQOBT), ya que se obtuvo de las purgas realizadas durante la prueba

de fraccionamiento de la DQO [8].

4) *Diseño experimental.* El experimento para el reactor biológico añadiendo biomasa granular constituye un diseño factorial regular de dos factores, duración del ciclo y secuencia de aireación con dos niveles de prueba cada uno; el primero fue fijado en 6 y 24 horas; el segundo comprende secuencias anaeróbico-óxico y solamente óxico, respectivamente. Como tratamiento experimental se estableció un total de cuatro condiciones de operación identificadas como T1, T2, T3 y T4 (ver Tabla 3). La variable a medir fue la DQO tanto en su forma total como soluble [7].

Tabla 3: Caracterización del agua residual cruda de la tenería.

| Factores | Tratamientos | | | |
|---------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ |
| Duración ciclo (h) | 24 | 6 | 24 | 6 |
| Secuencia aireación | Ox | Ox | An/Ox | An/Ox |

| Etapas: | Tratamientos | | | |
|---------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ |
| Llenado (min) | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Reacción (min) | 1430 | 350 | 1430 | 350 |
| Sedimentación (min) | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Descarga (min) | 5 | 5 | 5 | 5 |

Fuente: Freytez [7].

El diseño factorial para el reactor con biomasa suspendida implica un plan estadístico utilizado para la evaluación de la eficiencia de remoción de DQO y nitrógeno; se utilizó un arreglo factorial de dos factores con un total de 12 tratamientos; el primero, tiempo de llenado (T_{LL}) con tres niveles, rápido (R), lento (L) y por etapas (E); y el segundo, la secuencia de aireación con cuatro niveles, aireación intermitente (AI), nitrificación-desnitrificación convencional (NDC), nitrificación-desnitrificación simultánea (NDS), pre-desnitrificación (PD). Las variables de respuesta o dependientes en los experimentos son tres: las remociones de la demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total Kjeldahl (NTK) y nitrógeno amoniacal (NH₄⁺) (ver Tabla 4) [8].

Tabla 4: Condiciones experimentales para la evaluación del funcionamiento del reactor SBR bajo diferentes características de llenado y secuencia de aireación.

| Tratamientos | Factores experimentales | | Variables de respuesta |
|-----------------|-------------------------|---------------------|------------------------|
| | Tiempo de llenado | Secuencia aireación | DQO |
| T ₁ | L | AI | 770,8 |
| T ₂ | R | AI | 781,9 |
| T ₃ | E | AI | 926,8 |
| T ₄ | L | NDC | 739,85 |
| T ₅ | R | NDC | 831,13 |
| T ₆ | E | NDC | 861 |
| T ₇ | L | NDS | 660 |
| T ₈ | R | NDS | 725,8 |
| T ₉ | E | NDS | 715,8 |
| T ₁₀ | L | PD | 722 |
| T ₁₁ | R | PD | 710 |
| T ₁₂ | E | PD | 714,6 |

Fuente: Pire [9].

5) Evaluación del desempeño del SBR bajo condiciones aerobias y anaerobias.

- Bajo condiciones aerobias: las condiciones aerobias se lograron mediante el suministro de aire a través de un difusor de burbujas finas colocado en el fondo del reactor conectado a un compresor marca Elite 801 (Hagen inc, China) de 3 PSI, 2,5 watt/h y flujo de 2.500 cc/min, con el cual se mantuvo en el sistema una concentración mínima de oxígeno de 2 mg L⁻¹ durante la fase óxica (ver Figura 1). Para el experimento desarrollado por Pire [8] el suministro de aire se realizó mediante un difusor de burbujas finas colocado en el fondo del reactor conectado a un compresor marca Elite 801 (Hagen inc, China) de 3 PSI, 2,5 watt/h y flujo de 2.500 cc/min.
- Bajo condiciones anaerobias: para los tratamientos que incluían fases anaeróbicas se burbujeó nitrógeno gaseoso desde el fondo del reactor mediante el uso de otro difusor de burbujas finas que permitió desplazar el oxígeno disuelto presente en el licor mezcla. Los tratamientos se espaciaron durante una

semana para la adaptación a las nuevas condiciones de operación del SBR. Durante la investigación se seleccionaron dos puntos de muestreo: agua residual cruda en el punto de alimentación del SBR y agua residual tratada en la salida del SBR. La frecuencia de los muestreos fue de dos veces por semana con un total de ocho repeticiones en el tiempo para cada tratamiento [7].

6) *Análisis estadístico de resultados.* En el SBR con biomasa granular los resultados se sometieron al análisis de varianza (ANOVA) y a la prueba de comparación de medias de Tukey (Statistix versión 8.0) [7]. El plan estadístico utilizado en el experimento de Pire [8] para la evaluación de la eficiencia de remoción de DQO y nitrógeno consistió en un diseño completamente al azar con un arreglo factorial de dos factores como fueron el tiempo de llenado (T_{LL}) y la secuencia de aireación. El primer factor con tres niveles (R, L, E) y el segundo con cuatro (AI, NDC, NDS, PD) para un total de 12 tratamientos. (Tabla 4). Los resultados de las remociones de DQO, NTK, NT y las eficiencias de nitrificación y desnitrificación se compararon mediante un análisis de varianza y separación de medias a través de la prueba de Tukey, utilizando el programa estadístico Statistix versión 8.0.

7) *Comparación de resultados.* La comparación de resultados se llevó a cabo en un proceso de tres fases: recolección de la información, procesamiento de datos y presentación de resultados.

- **Recolección de información:** la información fue obtenida mediante la investigación y el análisis del estado del arte acerca de los procesos de cultivo en suspensión, como reactores por carga secuencial utilizados para la remoción de materia orgánica y nutrientes como nitrógeno, tratando de encontrar similitudes en cuanto a las condiciones experimentales como, secuencia de aireación, temperatura, tipo de sustrato entre otras, utilizadas en la presente investigación.
- **Procesamiento de datos:** los datos obtenidos se clasificaron según los parámetros comunes

y se comparan según las condiciones experimentales y los factores experimentales fijados de los procesos de cultivo en suspensión; así se obtuvieron los rangos de parámetros comunes como volumen del reactor, duración de ciclo, tiempo de llenado y temperatura de trabajo. Finalmente se realizó una comparación del desempeño de los reactores biológicos de cultivo en suspensión clasificando los estudios analizados de la siguiente manera:

1. Autores que trabajaron con reactores por carga secuencial SBR y aquellos que utilizaron otros reactores como lodos activados y lecho de lodo anaeróbico de flujo ascendente (UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket).
 2. Efecto de la secuencia de aireación en la remoción de materia orgánica y nitrógeno: secuencia de aireación aerobia, anaerobia o mixta.
 3. Tipo de biomasa utilizada: eficiencia de remoción obtenida usando biomasa granular y eficiencia de remoción obtenida usando biomasa suspendida.
- Presentación de resultados Los resultados se presentan en tablas y gráficos en los que se evidencian los parámetros estudiados DQO inicial y porcentaje de remoción de la DQO como indicadores para medir y establecer las condiciones que favorecen la mayor remoción de dicho contaminante.

3. Resultados y discusión

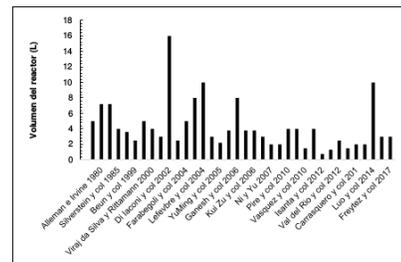
Los resultados de la comparación del desempeño en las etapas del tratamiento biológico del reactor por carga secuencial se enfocan en dos aspectos: 1) evaluación del funcionamiento de los reactores por carga secuencial y 2) evaluación del desempeño de los reactores por carga secuencial.

La base de datos de estos dos estudios mencionados [7, 8] será combinada para hacer una modelación dinámica del SBR y por lo tanto, mediante este estudio se pretende delimitar las condiciones de contorno o frontera bajo las cuales la modelación estará basada y en ese sentido

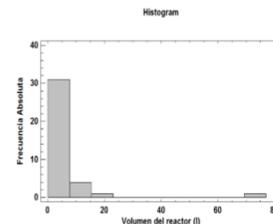
poder destacar las características particulares que harán novedoso al modelo matemático para el diseño de reactores generado. Por lo tanto, son el objeto de estudio y comparación con los demás trabajos experimentales mencionados en la presente investigación.

3.1. Evaluación del funcionamiento del reactor por carga secuencial

a. Comparación de los factores experimentales entre reactores por carga secuencial SBR a escala de laboratorio:



a) Comparación del volumen de trabajo de los SBRs a nivel de laboratorio.

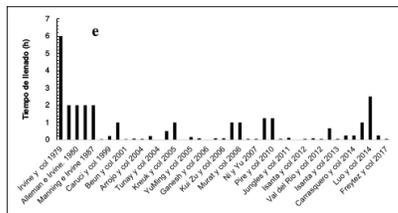


b) Histograma de comparación del volumen de trabajo de los SBRs a nivel de laboratorio.

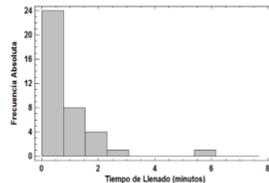
Figura 2: Volumen de trabajo de los SBRs a nivel de laboratorio.

- Volumen del reactor: al comparar el volumen del reactor utilizado en las investigaciones de Pire [8] y Freytez [7] cuyo valor fue de 3 L, con otras investigaciones se tiene que el reactor con la mayor capacidad fue de 16 L [11] mientras que el menor fue 0,75 L [12] (Figura 2 a). Basado en una muestra de 37 estudios de reactores SBR a escala de laboratorio, se han encontrado los siguientes estadísticos para el volumen usado en los reactores: media 6,2 L y desviación estándar 11,35 L. En el histograma de la Figura 2 b, con un sesgo de los valores hacia la izquierda;

en 31 casos, los volúmenes de reactor usados varían entre 0 y 7,7 L; siendo la frecuencia de ocurrencia más alta, seguido de 4 veces entre 7,7 y 15,4 L, una vez entre 15,4 y 23 L, una vez entre 69 y 73 L. El volumen de reactor usado por Pire [8] y Freytez [7] se encuentra en el rango de mayor frecuencia de ocurrencia en los estudios a escala de laboratorio.



a) Comparación del tiempo de llenado de los SBRs a nivel de laboratorio.



b) Histograma de comparación del tiempo de llenado de los SBRs a nivel de laboratorio.

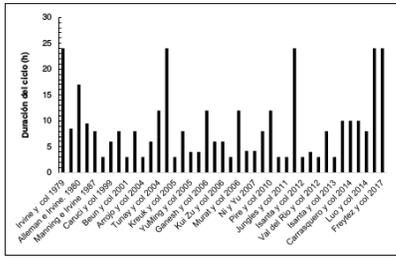
Figura 3: Tiempo de llenado de los SBRs a nivel de laboratorio.

- **Tiempo de llenado:** al comparar el tiempo de llenado utilizado en las investigaciones de Pire [8] con un tiempo de llenado que varió en rápido 0,083 h, lento 1 h y por etapas 0,333, 0,25, 0,25 y 0,166 h y Freytez [7] cuyo valor fue de 0,05 h con otras investigaciones se tiene que el mayor tiempo de llenado fue 6 h [13], mientras que el menor tiempo reportado fue de 0,033 h [14, 15] (Figura 3a). Basado en una muestra de 38 estudios de reactores SBR a escala de laboratorio, se han encontrado los siguientes estadísticos para el tiempo de llenado establecido: la media de es 0,7498 h y la desviación estándar es de 1,127 h. En el histograma de la Figura 3b se observa sesgo de los valores hacia la izquierda, la duración del ciclo aplicada a los reactores SBR varía entre 0 y 0,77 horas con frecuencia de ocurrencia del 63 %, entre 0,77 y 1,54 horas del 21 %,

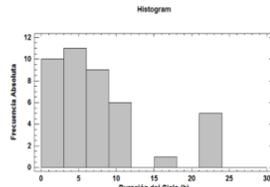
entre 1,54 y 2,31 horas del 10 %, entre 2,31 y 3,08 horas del 2,63 %, entre 5,39 y 6,16 horas del 2,63 %. El tiempo de llenado asignado por Pire [8] y Freytez [7] tiende a estar incluido dentro de la frecuencia de pruebas alta.

Al comparar el volumen del reactor y el tiempo de llenado utilizado en las investigaciones de Pire [8], Freytez [7] con otras investigaciones se observó que ambos factores se encuentran en el rango de mayor frecuencia de ocurrencia en los estudios a escala de laboratorio. Durante la etapa de llenado, el afluente se añade a la biomasa ya presente en el reactor, en la misma no hay presencia de mezcla ni aireación, lo cual significa que se tendrá una alta concentración de sustrato una vez se inicie la mezcla. El llenado puede ser: llenado estático, llenado con mezclado y llenado con aireación. Durante el llenado estático no se tiene ni mezcla ni aireación, lo cual significa que se tendrá una alta concentración de sustrato una vez que se inicie la mezcla. Las condiciones de llenado estático favorecen a los organismos que hacen almacenamiento interno de productos durante condiciones de alta concentración de sustrato, lo cual es un requisito para la remoción biológica de nutrientes [16]. De allí surge la necesidad de variar el tiempo de esta etapa y así probar la ventaja en la remoción conjunta de materia orgánica y nutriente.

- **Duración del ciclo:** al comparar el factor duración del ciclo utilizado en las investigaciones de Pire [8] y Freytez [7] cuyo valor fue de 12 horas y de 6 y 24 horas respectivamente, con otras investigaciones se tiene que el reactor con el mayor tiempo de duración de ciclo fue de 24 h [13, 17, 7] mientras que el menor fue 3 h [14, 15, 18, 19, 20, 21, 12, 22] (Figura 4a). Basado en una muestra de 42 estudios de SBRs a escala de laboratorio, se han encontrado los siguientes estadísticos para la duración de ciclo establecida en los reactores: la media es de 8,65 h y la desviación estándar es de 6,56 h. En el histograma de la Figura 4b se observa sesgo de los valores hacia la izquierda, la duración del ciclo aplicada a SBRs varía



a) Comparación de la duración del ciclo de los SBRs a nivel de laboratorio.



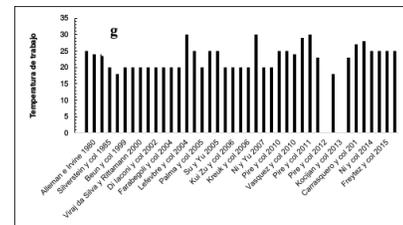
b) Histograma de comparación de la duración del ciclo de los SBRs a nivel de laboratorio.

Figura 4: Duración de ciclo de los SBRs a nivel de laboratorio.

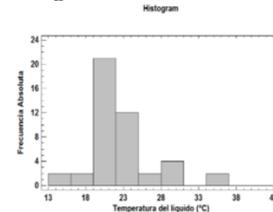
entre 0 y 3 horas con frecuencia de ocurrencia del 24 %, entre 3 y 6 horas del 26 %, entre 6 y 9 horas del 21 %, entre 9 y 12 horas del 14 %, entre 15 y 18 horas del 2,38 %, entre 21 y 24 horas del 12 %.

Al comparar el factor duración del ciclo utilizado con otras investigaciones se tiene que la duración del ciclo asignada por estos investigadores está clasificada y tiende a estar incluida dentro de las frecuencias de pruebas baja, haciéndolo distintivo. En la investigación de Freytez [7] los ciclos de 24 horas favorecieron la actividad de los microorganismos de degradar la materia orgánica presente en el agua residual de tenería. Resultados similares fueron reportados en la investigación de Lefebvre [23] cuando trataron biológicamente efluentes de tenería en un SBR con biomasa suspendida, ciclos de 24 horas completamente aerobio, obteniendo remociones de 95 % para la DQO y llegando a la conclusión que la tecnología de los SBRs puede ser una solución adecuada para el tratamiento de las aguas residuales de tenería. Ganesh [24], trabajaron con efluentes de tenería pre-tratado, una secuencia de aireación totalmente óxica y aplicaron ciclos de 12 y 24 horas. Obtuvieron porcentajes de remoción de

alrededor de 80 %, superiores a los obtenidos durante la investigación de Freytez [7] en similares condiciones, lo cual se debe principalmente a las características iniciales del efluente crudo cuyos valores de DQO fueron superiores a los reportados por estos autores, ya que la composición del agua residual de tenería varía según el proceso utilizado y los químicos empleados. A su vez investigaciones realizadas por Carucci [25], Di Iaconi [11] y Farabegoli [3], quienes trabajaron con efluentes de tenería, con duraciones de ciclo entre 8 y 6 horas y una secuencia de aireación anaerobia/oxica, reportan porcentajes de remoción entre 70-95 %.



a) Comparación de la temperatura de trabajo de los SBRs a nivel de laboratorio.



b) Histograma de comparación de la temperatura de trabajo de los SBRs a nivel de laboratorio.

Figura 5: Temperatura de trabajo de los SBRs a nivel de laboratorio.

- Temperatura: comparar la temperatura utilizada durante las investigaciones de Pire [8] y Freytez [7] cuyo valor fue de 27°C con otras investigaciones se tiene que el reactor con la máxima temperatura fue de 30°C [23, 26, 9] mientras que la mínima fue 15°C [27, 22] (Figura 5a). Basado en una muestra de 45 estudios de SBRs a escala de laboratorio, se han encontrado los siguientes estadísticos para la temperatura establecida en los reactores: la media de es 23,02°C y la desviación estándar 4,61°C. En el histograma de la Figura 5b se observa que hay tendencia de los valores

hacia una medida central, la temperatura del líquido en el SBR varía entre 13 y 19 °C con frecuencia de ocurrencia del 4,44 %, entre 19 y 22 °C del 47 %, entre 22 y 25 °C del 27 %, entre 25 y 28 °C del 4,44 %, entre 28 y 31 °C del 9 %, entre 34 y 37 °C del 4,44 %.

La temperatura del líquido ajustada por Pire [8] y Freytez [7] tiende a estar incluida dentro de las frecuencia de pruebas media. Finalmente al comparar la temperatura utilizada durante las investigaciones de estos autores con otras investigaciones se tiene que la temperatura del líquido ajustada por estos investigadores tiende a estar incluida dentro de las frecuencia de pruebas media. Estos valores estuvieron dentro de los rangos recomendados para realizar procesos biológicos [1]. La importancia de la temperatura de trabajo en los reactores por carga secuencial SBR viene dada porque los cambios en la temperatura del agua residual pueden modificar la velocidad de las reacciones que interviene en el proceso de lodos activados. La dependencia de la temperatura en la constante de velocidad de la reacción biológica es muy importante a la hora de evaluar la eficacia total del tratamiento biológico. La temperatura no solo influye en las actividades metabólicas sino que tienen un profundo efecto en factores tales como: las tasas de transferencia de gases y características de sedimentación de sólidos biológicos. Este parámetro es importante debido al efecto que ejerce sobre la actividad microbiana. La rata de reacción bioquímica en las células aumenta con la temperatura hasta un valor óptimo, a un incremento de la temperatura adicional, la rata de actividad disminuye ocurriendo la desnaturalización de las enzimas. el proceso de nitrificación es fuertemente dependiente de la temperatura, normalmente el proceso ocurre en un amplio rango de 4 a 45 °C, siendo la temperatura óptima para los Nitrosomas igual a 35 °C y un rango óptimo entre 35 a 42 °C para las Nitrobacter [1, 16].

3.2. Evaluación del desempeño del reactor por carga secuencial

Los resultados del desempeño de los reactores por carga secuencial analizados: en términos de

DQO y NH_4^+ en el afluente y efluente, se indican en Figura 6.

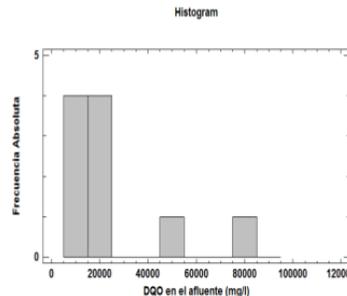


Figura 6: Histograma de comparación de DQO del afluente de los SBRs a nivel de laboratorio.

Resultados de la DQO y el NH_4^+ para reactores por carga secuencial:

- Demanda química de oxígeno del afluente: al comparar el valor de la DQO de entrada al reactor reportado en las investigaciones de Pire [8] con 1546 mg/L y Freytez [7] cuyo valor fue de 5584 mg/L, con otras investigaciones se tiene que la mayor concentración de la DQO fue de 83000 mg/L [14] mientras que la menor fue 158 mg/L [28]. Basado en una muestra de 38 estudios de SBRs, se han encontrado los siguientes estadísticos para la demanda química de oxígeno: la media es de 7728,37 mg/L y la desviación estándar es de 16233,5 mg/L. En el histograma de la Figura 6 se observa sesgo de los valores hacia la izquierda. La concentración de la DQO reportada por Pire [8] y Freytez [7] se encuentra en el rango de mayor frecuencia de ocurrencia en los estudios a escala de laboratorio.
- Demanda química de oxígeno del efluente: en cuanto a la DQO a la salida del reactor los valores obtenidos en los estudios de Pire [8] con 303 mg/L y Freytez [7] con 2819,92 mg/L, al compararlos se tiene que la mayor concentración de la DQO a la salida del reactor fue 38500 mg/L [21], mientras que el menor fue 15 mg/L [29]. Basado en una muestra de 38 estudios de SBRs, se han encontrado los siguientes estadísticos para la

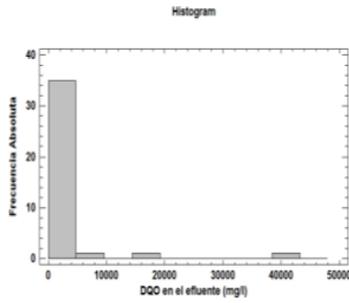
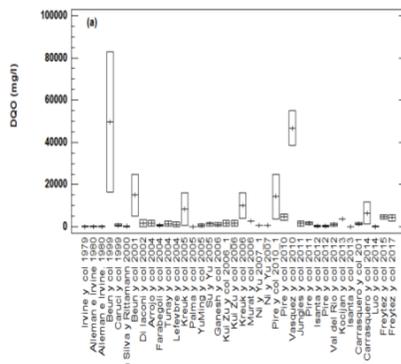
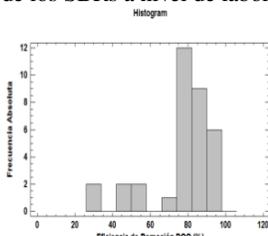


Figura 7: Histograma de comparación de DQO del efluente de los SBRs a nivel de laboratorio.

demanda química de oxígeno: la media es de 2470,9 mg/L y la desviación estándar es de 6659,42 mg/L. En el histograma de la Figura 7, donde se observa sesgo de los valores hacia la izquierda. La concentración de la DQO reportada por Pire [8] y Freytez [7] se encuentra en el rango de mayor frecuencia de ocurrencia en los estudios a escala de laboratorio.



a) Histograma de comparación de la remoción de la DQO de los SBRs a nivel de laboratorio.



b) Comparación de la remoción de la DQO de los SBRs a nivel de laboratorio.

Figura 8: Remoción de la DQO de los SBRs a nivel de laboratorio.

- Remoción de la demanda química de oxígeno: en cuanto al porcentaje de remoción de la

demanda química de oxígeno reportado en los estudios de Pire [8] y Freytez [7] con 80 y 57 % respectivamente, al compararlos se tiene que el mayor porcentaje de remoción fue 97 % [11], mientras que el menor fue 30 % [21] (Figura 8a). Basado en una muestra de 40 estudios de SBRs, se han encontrado los siguientes estadísticos para el porcentaje de remoción de la DQO: la media es de 80,08 % y la desviación estándar es de 13,76 %. En el histograma de la Figura 8b se observa sesgo de los valores hacia la izquierda. La remoción de la DQO reportada por Pire [8] se encuentra en el rango de las más altas frecuencia de ocurrencia en los estudios a escala de laboratorio mientras que la de Freytez [7] se encuentra en el rango de baja frecuencia.

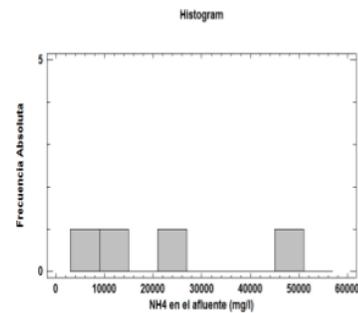


Figura 9: Histograma de comparación de NH_4^+ del afluente de los SBRs a nivel de laboratorio.

- Nitrógeno amoniacal del afluente: comparar el valor del NH_4^+ a la entrada del reactor reportado en la investigación de Pire [8], cuyo valor fue de 121 mg/L, con otras investigaciones se tiene que la mayor concentración de la NH_4^+ fue de 50000 mg/L [30] mientras que el menor fue 8,18 mg/L [20]. Basado en una muestra de 30 estudios de SBRs, se han encontrado los siguientes estadísticos para la concentración de NH_4^+ : la media es de 3430,3 mg/L y la desviación estándar es de 10188,4 mg/L. En el histograma de la Figura 9 se observa sesgo de los valores hacia la izquierda. La concentración del NH_4 reportada por Pire [8] se encuentra en el rango de mayor frecuencia

de ocurrencia en los estudios a escala de laboratorio.

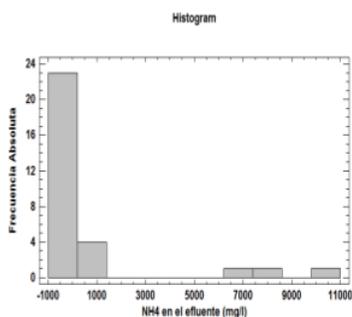
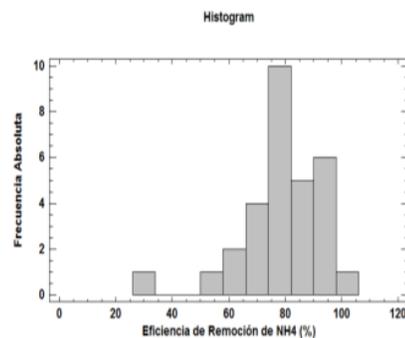
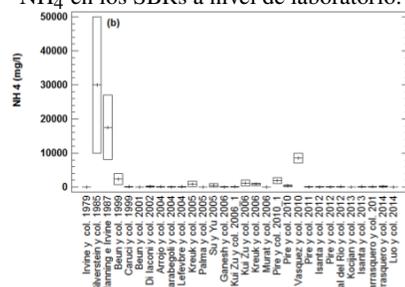


Figura 10: Histograma de comparación de NH_4^+ del efluente de los SBRs a nivel de laboratorio.

- **Nitrógeno amoniacal del efluente:** al comparar el valor del NH_4^+ a la salida del reactor reportado en la investigación de Pire [8], cuyo valor fue de 0,5 mg/L, con otras investigaciones se tiene que la mayor concentración de la NH_4^+ fue de 10000 mg/L [31] mientras que el menor fue 0 mg/L [12]. Basado en una muestra de 30 estudios de SBRs, se han encontrado los siguientes estadísticos para la concentración de NH_4^+ : la media es de 946,75 mg/L y la desviación estándar es de 2558,66 mg/L. En el histograma de la Figura 10 se observa sesgo de los valores hacia la izquierda. La concentración del NH_4^+ reportada por Pire [8] se encuentra en el rango de mayor frecuencia de ocurrencia en los estudios a escala de laboratorio.
- **Remoción del nitrógeno amoniacal:** en cuanto al porcentaje de remoción del nitrógeno amoniacal en el reactor reportado en el estudio de Pire [8], cuyo valor fue de 99,6%, y al compararlo se tiene que el mayor porcentaje de remoción fue 100% [12], mientras que el menor fue 30% [21] (Figura 11a). Basado en una muestra de 30 estudios de SBRs, se han encontrado los siguientes estadísticos para el porcentaje de remoción de NH_4^+ : la media es de 79,94% y la desviación estándar es de 14,60%. En el histograma de la Figura 11b se observa sesgo de los valores hacia la izquierda.



a) Histograma de comparación de remoción de NH_4 en los SBRs a nivel de laboratorio.

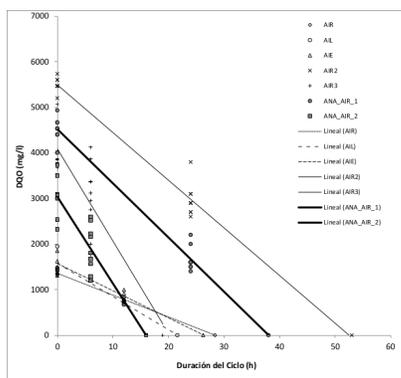


b) Comparación de la remoción del NH_4^+ de los SBRs a nivel de laboratorio.

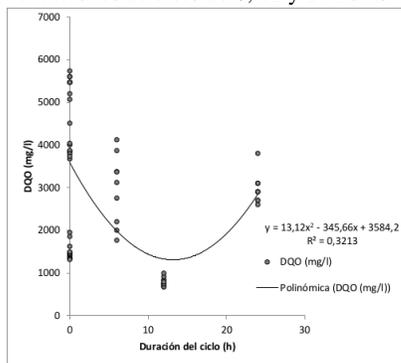
Figura 11: Remoción del NH_4^+ de los SBRs a nivel de laboratorio.

El porcentaje de remoción del NH_4^+ reportada por Pire [8] se encuentra en el rango de menor frecuencia de ocurrencia en los estudios a escala de laboratorio.

La tasa de remoción de la DQO en un SBR para duraciones de ciclo de 6, 12 y 24 horas usando biomasa suspendida Pire [8] y biomasa granular Freytez [7] se muestra en la Figura 12a y Figura 12b, donde se observa que el gradiente de remoción de la biomasa suspendida y un tiempo de duración del ciclo de 12 horas expresado en términos de mg/L-h, bajo condiciones de tiempos de llenado rápido (-48), lento (-73) y por etapas (-60) es más pequeño que la tasa de remoción de la biomasa granular bajo condiciones aerobias y una combinación de 25% anaerobias y 75% aerobias para tiempos de duración de ciclo de 24 y 6 horas, como sigue en secuencia: en el primero: (-105, -203); en el segundo: (-119, -190), encontrando un gradiente ligeramente menor en el gradiente de remoción de la biomasa granular bajo condición combinada 25% anaerobia y 75% aerobia con



a) Remoción de la DQO en un SBR para duraciones de ciclo de 6, 12 y 24 horas.

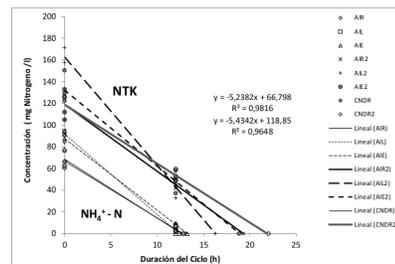


b) Perfil de Remoción de DQO dentro del ciclo de SBR para duraciones de ciclos de 6 y 24 horas.

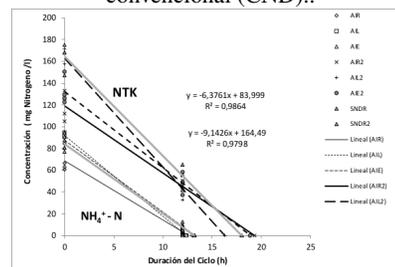
Figura 12: Tasa de remoción de la DQO en un SBR para duraciones de ciclo de 6, 12 y 24 horas usando biomasa suspendida y biomasa granular.

respecto a la condición aerobia. De lo expuesto se infieren los dos principales aspectos siguientes: 1) la biomasa granular tanto bajo condiciones aerobias como anaerobias tiene un desempeño en la remoción de DQO variando entre 1,5 y 2 veces superior al desempeño de la biomasa suspendida bajo condiciones aerobias, 2) la biomasa granular ha mostrado un gradiente de remoción para una duración de ciclo de 6 horas en el orden de 2 veces mayor el gradiente de remoción para una duración de ciclo de 24 horas, este hecho se podría explicar suponiendo que para el primero se está encontrando la tasa de remoción para materia orgánica carbonatada; mientras que en el segundo los microorganismos podrían haber removido la totalidad de la materia orgánica biodegradable carbonatada y estar procesando el amonio como uno de los productos de la síntesis de la materia orgánica; por lo que se

podría afirmar que una duración de ciclo de 24 horas está abarcando las dos etapas de remoción consecutivas materia orgánica carbonatada seguido de nitrificación-desnitrificación del amonio como forma nitrogenada derivada de la síntesis de la materia orgánica biodegradable, como se discute en [1].



a) Utilizando nitrificación-desnitrificación convencional (CND)..



b) Utilizando nitrificación-desnitrificación simultánea (SND).

Figura 13: Tasa de Remoción de Amonio (NH_4^+) dentro del ciclo de SBR para duraciones de ciclos de 12 horas en las etapas de remoción de materia orgánica carbonatada (aireación) y nitrificación-desnitrificación aplicando tiempos de llenado lento (L), rápido (R) y por etapas (E).

El perfil de remoción de DQO dentro del ciclo del SBR para duraciones de ciclos de 6, 12 y 24 horas se muestra en la Figura 12a, observando que la magnitud máxima de la concentración de sustrato en términos de DQO ocurre durante el tiempo de llenado; el cual varía entre 0,05 horas y 1 hora, seguidamente las etapas de mezcla y aireación que han sido monitoreadas para una duración de 6 horas y 24 horas; observando que ocurre un mínimo para tiempos de duración de ciclo próximos a 12 horas y luego se observa una disminución de la tasa de remoción, este perfil permite suponer con una alta posibilidad que el punto mínimo esté ocurriendo cuando se

ha completado la remoción de la materia orgánica carbonatada y el ligero incremento de la DQO es debido a la producción de productos nitrogenados como amonio y nitrito como consecuencia de la síntesis de la materia orgánica biodegradable siendo microorganismos como las nitrosomonas y nitrobacter, los encargados de usar el oxígeno transferido por la aireación o por reacciones de óxido-reducción orgánica en el caso de las condición combinada 25 % anaerobia y 75 % aerobia, de lograr la transformación hacia formas de alta oxidación nitrogenadas como NO_3^- por encima de 24 horas y la remoción total de la DQO y el amonio, como se indica en la Figura 13a y Figura 13b.

La tasa de remoción de la forma nitrogenada amonio ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) y el nitrógeno total Kjendhal (NTK) en un SBR para duraciones de ciclo de 12 horas usando biomasa suspendida en las etapas de remoción de materia orgánica carbonatada (aireación) y nitrificación-desnitrificación simultánea (SND, en inglés) aplicando tiempos de llenado lento (L), rápido (R), por etapas (E) [8] se muestra en la Figura 13b, donde se observa que el gradiente de remoción de la biomasa suspendida expresado en términos de mg/L-h , bajo condiciones de tiempos de llenado rápido (-6, -6, -6, -9), lento (-7, -10) y por etapas (-5, -7) es ligeramente más alto en la condición de llenado lento y por etapas que en la condición de llenado rápido. El NTK se mantiene por encima del $\text{NH}_4^+\text{-N}$ en una proporción cercana a 2 veces superior para todos los tratamientos; así mismo se observa que el $\text{NH}_4^+\text{-N}$ es removido con una eficiencia variando entre 90 y 97 % para un tiempo de duración de ciclo de 12 horas, los puntos en la gráfica se observan muy cerca del eje horizontal, logrando la remoción total del $\text{NH}_4^+\text{-N}$ para tiempos de duración de ciclos estimados entre 12,39 y 13,25 horas. Con respecto al NTK, se observa que una vez superada la remoción del $\text{NH}_4^+\text{-N}$ existen productos nitrogenados como muy posiblemente nitritos (NO_2^-) de la fase de nitrificación-desnitrificación que serían oxidados o estabilizados a formas de oxidación avanzada como NO_3^- considerando una extensión de la duración del ciclo estimada entre 16 y 20 horas; estas duraciones de ciclos confirman los hallazgos

encontrados para la remoción de la DQO después de superadas las 12 horas de duración de ciclo hasta las 24 horas donde se ha supuesto que ya se ha superado la etapa de la remoción de la materia orgánica carbonatada y los microorganismos están en una etapa de nitrificación-desnitrificación de productos de síntesis de la materia orgánica biodegradable carbonatada, como se ha explicado para la tasa de remoción de DQO observada en la Figura 12a.

El agua residual de tenería utilizada en las investigaciones de Pire [8] y Freytez [7], en su caracterización presentó valores de los parámetros como DQO y nitrógeno que están fuera de los límites establecidos en la normativa legal venezolana en el decreto 883 [10] por lo que dicho efluente requirió un tratamiento de depuración. En el proceso llevado a cabo en las tenerías las etapas que mayor cantidad de DQO aportan al vertido final son las fases de remojo y pelambre, esto es debido al elevado contenido que tienen estas fases en materia orgánica [32]. La DQO del efluente industrial a la entrada del reactor fue de 5584,74 mg/L para la investigación de Freytez [7] y de 1546 mg/L para Pire [8]. Es importante controlar esta variable debido a que altas concentraciones de dicho parámetro pueden producir efectos negativos sobre el medio ambiente, como la desoxigenación de los ríos y por ende la muerte de los peces [32].

En el proceso productivo llevado a cabo en las tenerías la presencia de nitrógeno se debe principalmente a las grasas, aceites y colorantes sintéticos y/o vegetales que se agregan durante la etapa de teñido, en la cual se le da el color deseado al cuero ya sea azul o marrón rojizo [33]. La concentración de nitrógeno en las aguas residuales resulta ser un parámetro importante ya que constituye un potencial impacto sobre la calidad de las aguas receptoras, el exceso de dicho nutriente puede provocar la eutrofización del medio y por lo tanto la muerte de la vida acuática existente [1]. En cuanto a la concentración de nitrógeno amoniacal (N-NH_4^+) en el agua residual cruda de la tenería se registraron valores promedios de 121 para Pire [8] y 80 mg/L para Freytez [7]. Este efluente industrial mostró valores similares a los reportados por Lefebvre [23] y Ganesh

[24] cuyos rangos se ubicaron entre 80-120 mg/L para el nitrógeno amoniacal cuando realizaron la caracterización de aguas residuales de tenerías.

Para tratar dicho efluente en los estudios de Pire [8] y Freytez [7], se variaron ciertos factores como: duración de ciclo, tiempo de llenado y se empleó una combinación en cuanto a la secuencia de aireación, combinando secuencias óxicas con anóxicas, con la finalidad de remover la mayor cantidad de materia orgánica y nitrógeno conjuntamente lo que es característico en el uso de este tipo de reactores. El porcentaje de remoción de la demanda química de oxígeno reportado en el estudio de Pire [8] fue de 80 % y se encuentra en el rango de las más altas frecuencia de ocurrencia en los estudios a escala de laboratorio, mientras que en la investigación realizada por Freytez [7] este porcentaje fue 57 % y se encuentra en el rango de baja frecuencia. El valor del NH_4^+ a la entrada del reactor reportado en la investigación de Pire [8] fue de 121 mg/L y se encuentra en el rango de mayor frecuencia de ocurrencia en los estudios a escala de laboratorio. El porcentaje de remoción del nitrógeno amoniacal en el reactor reportado en el estudio de Pire [8] cuyo valor fue de 99,6 %, y se ubicó en el rango de menor frecuencia de ocurrencia en los estudios a escala de laboratorio. Concluyendo que el tratamiento fue efectivo para producir un efluente apto para ser descargado a cuerpos de agua, según la normativa ambiental venezolana y por tanto, el control en tiempo real puede ser implementado para optimizar el funcionamiento del SBR. En la investigación de Pire [8] y en la de Freytez [7] el uso de un SBR mostró que existen ciertas ventajas como la selección de una biomasa altamente resistente a la presencia de sustancias inhibitorias característica de estos efluentes; y que dicha tecnología fue adecuada para el tratamiento de efluentes complejos como el de la tenería, removiendo parte importante de la materia orgánica biodegradable.

Haciendo un análisis de las investigaciones consultadas en este trabajo y en apoyo a las conclusiones de los estudios de Pire [8] y Freytez [7] se tiene que el beneficio de utilizar secuencias anaeróbicas y aeróbicas fue observado

también por Murat [26] y Lefebvre [17] cuando trabajaron con efluentes de tenería y ciclos de 24 horas y obtuvieron remociones de 90 % y 95 %, respectivamente. Ambas investigaciones concluyeron que se puede lograr mayor eficiencia de remoción de DQO con la combinación de procesos anaerobios/aerobios en efluentes de tenería. Otras investigaciones consultadas concluyeron también que al tratar efluentes de tenería en un SBR consiguieron que los mayores porcentajes de remoción de la materia orgánica se lograron durante condiciones anaerobias en comparación con los porcentajes de remoción obtenidos durante las fases óxicas [25, 11].

En cuanto a la duración del ciclo en los estudios consultados se tiene que en algunas investigaciones los ciclos de 24 horas favorecieron la actividad de los microorganismos de degradar la materia orgánica presente en el agua residual de tenería. Resultados similares fueron reportados en su investigación Lefebvre [23] cuando trataron biológicamente efluentes de tenería en un SBR con biomasa suspendida, ciclos de 24 horas completamente aerobio, obteniendo remociones de 95 % para la DQO y llegando a la conclusión que la tecnología de los SBRs puede ser una solución adecuada para el tratamiento de las aguas residuales de tenería. Por otra parte otro grupo de investigadores como Ganesh [24], quienes trabajaron con efluentes de tenería pre-tratado, una secuencia de aireación totalmente óxica y aplicaron ciclos de 12 y 24 horas obtuvieron porcentajes de remoción de alrededor de 80 %.

Sin embargo autores consultados como Tunay [34] al variar las duraciones de los ciclos, observaron que los tiempos de 12 y 24 h no presentaron diferencias estadísticas entre sí, lo que sugiere que para futuras investigaciones se pudiera variar la duración del ciclo en rangos mayores a los probados en el presente trabajo donde se usó un rango más amplio. Investigaciones realizadas por Carucci [25], Di Iaconi [11] y Farabegoli [3], quienes trabajaron con efluentes de tenería, con duraciones de ciclo entre 8 y 6 horas y una secuencia de aireación anaerobia/oxica, reportan porcentajes de remoción entre 70-95 %.

Los reactores por carga secuencial SBR pre-

sentan ciertas ventajas en comparación con otros reactores de cultivo en suspensión, una característica única de los SBR es que no es necesario disponer de un retorno de lodos activados debido a que todos los procesos ocurren en un mismo tanque tanto la aireación como la decantación tienen lugar en el mismo reactor, no se pierde cantidad de lodo alguna en la fase de reacción, y no es necesario recircular parte del lodo de la sedimentación para mantener constante el nivel del lodo en la etapa de reacción [1].

Estos reactores presentan ventajas sobre los sistemas de lodos activados convencionales, debido a que requieren de un tanque de aireación, seguido de un sedimentador secundario para brindar el tratamiento biológico a un efluente. De la misma manera, los SBRs tienen la ventaja de que durante la etapa de reacción se pueden alternar las fases óxicas, anóxicas y anaeróbicas, permitiendo así la remoción simultánea de materia orgánica, nitrógeno y fósforo.

Finalmente al utilizar SBR con biomasa granular el proceso de sedimentación del sólido (biomasa) y la fase líquida (efluente clarificado) es mucho mejor. Estos resultados obtenidos concuerdan con el trabajo realizado por Arrojo [19]; donde se concluye que un reactor SBR con biomasa granular operado adecuadamente permite la obtención de gránulos aerobios con buenas propiedades de sedimentación y por ende la separación marcada entre las fases sólida y líquida López-Palau [35]. La biomasa granular permite la realización simultánea de la nitrificación y desnitrificación en un SBR que opere bajo condiciones óxicas. Esta ventaja se debe a la estructura y forma del gránulo, debido a que los microorganismos nitrificantes se establecen en la parte externa del gránulo (condiciones óxicas), mientras que los desnitrificantes se ubican en el centro del mismo (condiciones anóxicas).

4. Conclusiones

Los cuatro factores experimentales, volumen de reactor, duración del ciclo, tiempo de llenado y temperatura asignados en los trabajos [7, 8] para al menos tres niveles de pruebas en los experimentos con un SBR con biomasa suspendida

y biomasa granular se categorizan comparando con una muestra entre 38 y 45 estudios como sigue: el volumen del reactor utilizado en las investigaciones se encuentran en el rango de mayor frecuencia de ocurrencia en los estudios a escala de laboratorio. El factor duración del ciclo está clasificado dentro de las frecuencias de pruebas baja, haciéndolo distintivo. El tiempo de llenado asignado por estos autores tiende a estar incluido dentro de la frecuencia de pruebas alta. La temperatura utilizada tiende a estar incluida dentro de las frecuencias de pruebas media.

La caracterización del efluente industrial mostró valores de DQO de 5584,74 mg/L para la investigación de Freytez [7] y de 1546 mg/L para Pire [8], los cuales son superiores a los valores permitidos en la norma venezolana para la descarga a cuerpos de agua [10]. La concentración de nitrógeno amoniacal (N-NH_4^+) en el agua residual varía entre 80 mg/L para Freytez [7] y 121 mg/L para Pire [8].

La tasa de remoción de la DQO en un SBR para duraciones de ciclo de 6, 12 y 24 horas usando biomasa suspendida bajo condiciones aerobias resultó más pequeña que la tasa de remoción de la biomasa granular bajo condiciones aerobias y una combinación de 25 % anaerobias y 75 % aerobias para tiempos de duración de ciclo de 24 y 6 horas. En lo referente a la biomasa granular se encontró un gradiente de remoción de DQO por la biomasa granular bajo condición combinada 25 % anaerobia y 75 % aerobia ligeramente menor del gradiente de remoción de DQO con respecto a la condición aerobia.

El perfil de remoción de DQO dentro del ciclo de SBR para duraciones de ciclos de 6, 12 y 24 horas permite suponer que el punto mínimo de DQO en el afluente al SBR ocurre cuando se ha completado la remoción de la materia orgánica carbonatada y podría ocurrir un ligero incremento de la DQO debido a la producción de productos nitrogenados como amonio y nitrito como consecuencia de la síntesis de la materia orgánica biodegradable siendo microorganismos como las nitrosomonas y nitrobacter, los encargados de usar el oxígeno transferido por la aireación o por reacciones de óxido-reducción orgánica en el caso de las

condición combinada 25 % anaerobia y 75 % aerobia, para lograr la transformación hacia formas de alta oxidación nitrogenadas como NO_3^- por encima de 24 horas y la remoción total de la DQO y el amonio.

La tasa de remoción de la forma nitrogenada amonio ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) y el nitrógeno total Kjendhal (NTK) en un SBR para duraciones de ciclo de 12 horas usando biomasa suspendida en las etapas de remoción de materia orgánica carbonatada (aireación) y nitrificación-desnitrificación convencional (CND) aplicando tiempos de llenado lento (L), rápido (R), por etapas (E) muestra que el gradiente de remoción de la biomasa suspendida bajo condiciones de tiempos de llenado rápido es ligeramente más alto en la condición de llenado lento y por etapas que en la condición de llenado rápido. El NTK se mantiene por encima del $\text{NH}_4^+\text{-N}$ en una proporción cercana a 2 veces superior para todos los tratamientos; así mismo se observa que el $\text{NH}_4^+\text{-N}$ es removido con una eficiencia variando entre 90 y 97 % para un tiempo de duración de ciclo de 12 horas logrando la remoción total del $\text{NH}_4^+\text{-N}$ para tiempos de duración de ciclos estimados entre 12,39 y 13,25 horas.

5. Referencias

- [1] G. Tchobanoglous y F. Burton. *Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización*, volumen 1. Editorial Mc Graw Hill, 1995.
- [2] J. Ferrer Polo y A. Seco Torrecillas. *Tratamientos biológicos de aguas residuales*. Editorial Alfaomega, México, 2007.
- [3] G. Farabegoli, A. Carucci, M. Majone, and E. Rolle. Biological treatment of tannery wastewater in the presence of chromium. *Journal of Environmental Management*, 71(4):345–349, 2004.
- [4] B. Arrojo, J. Vázquez-Padín, M. Figueroa Leiro, A. Mosquera, J. Campos y R. Méndez. Reactores de biomasa granular: más capacidad en menos espacio. *Tecnología del agua*, 27(287):32–39, 2007.
- [5] M. Pozo. Proceso de nitrificación en reactores secuenciales discontinuos sbr (sequencing batch reactor) con biomasa granular. Trabajo Especial de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2008.
- [6] M. De Kreuk, J. Heijnen, and M. Van Loosdrecht. Simultaneous COD, nitrogen, and phosphate removal by aerobic granular sludge. *Biotechnology and bioengineering*, 90(6):761–769, 2005.
- [7] E. Freytez, M. Pire-Sierra, Y. Mujica y M. Pire-Sierra. Eficiencia de remoción de materia orgánica en efluentes de tenerías usando un reactor por carga secuencial con biomasa granular. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*, 51(2):117–131, 2017.
- [8] M. Pire-Sierra, D Cegarra-Badell, S. Carrasquero-Ferrer, N. Angulo-Cubillan, and A. R. Díaz-Montiel. Nitrogen and COD removal from tannery wastewater using biological and physicochemical treatments. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (80):63–73, 2016.
- [9] M. Pire Sierra, K. Rodríguez Sargent, M. Fuenmayor Reyes, Y. Fuenmayor, H. Acevedo, S. Carrasquero Ferrer y A. Díaz Montiel. Biodegradabilidad de las diferentes fracciones de agua residual producidas en una tenería. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 21(2):5–19, 2011.
- [10] Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales. Decreto N° 883. normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos. *Gaceta Oficial de la República de Venezuela*, Extraordinaria(5021), 1995.
- [11] C. Di Iaconi, A. Lopez, R. Ramadori, A. Di Pinto, and R. Passino. Combined chemical and biological degradation of tannery wastewater by a periodic submerged filter (sbbf). *Water Research*, 36(9):2205–2214, 2002.
- [12] E. Isanta, M. Suárez-Ojeda, Á. del Río, N. Morales, J. Pérez, and J. Carrera. Long term operation of a granular sequencing batch reactor at pilot scale treating a low-strength wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 198-199:163–170, 2012.
- [13] R. Irvine, G. Miller, and A. Bhamrah. Sequencing batch treatment of wastewaters in rural areas. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 51(2):244–254, 1979.
- [14] J. Beun, A. Hendriks, M. Van Loosdrecht, E. Morgenroth, P. Wilderer, and J. Heijnen. Aerobic granulation in a sequencing batch reactor. *Water Research*, 33(10):2283–2290, 1999.
- [15] J. Beun, M. Van Loosdrecht, and J. Heijnen. Aerobic granulation in a sequencing batch airlift reactor. *Water Research*, 36(3):702–712, 2002.
- [16] S. Carrasquero-Ferrer, M. Pire-Sierra, N. Rincón-Lizardo, M. Mas, G. Colina-Andrade y A. Díaz-Montiel. Remoción de nutrientes en efluentes de tenerías utilizando un reactor por carga secuencial (SBR). *Ciencia*, 21(3):131–142, 2013.
- [17] O. Lefebvre, N. Vasudevan, M. Torrijos, K. Thanasekaran, and R. Moletta. Anaerobic digestion of tannery soak liquor with an aerobic post-treatment. *Water research*, 40(7):1492–1500, 2006.
- [18] E. Isanta, M. Figueroa, A. Mosquera-Corral, L. Campos, J. Carrera, and J. Pérez. A novel control strategy for enhancing biological n-removal in a granular sequencing batch reactor: a model-based study. *Chemical engineering journal*, 232:468–477, 2013.

- [19] B. Arrojo, A. Mosquera-Corral, J. Garrido, and R. Méndez. Aerobic granulation with industrial wastewater in sequencing batch reactors. *Water Research*, 38(14):3389 – 3399, 2004.
- [20] J. Kocijan and N. Hvala. Sequencing batch-reactor control using Gaussian-process models. *Bioresource technology*, 137:340–348, 2013.
- [21] J. Vázquez-Padín, A. Mosquera-Corral, J. Campos, R. Méndez, J. Carrera, and J. Pérez. Modelling aerobic granular SBR at variable COD/N ratios including accurate description of total solids concentration. *Biochemical Engineering Journal*, 49(2):173–184, 2010.
- [22] A. Val Del Rio, M. Figueroa, B. Arrojo, A. Mosquera-Corral, J. Campos, G. García-Torriello, and R. Méndez. Aerobic granular SBR systems applied to the treatment of industrial effluents. *Journal of environmental management*, 95:S88–S92, 2012.
- [23] O. Lefebvre, N. Vasudevan, M. Torrijos, K. Thanasekaran, and R. Moletta. Halophilic biological treatment of tannery soak liquor in a sequencing batch reactor. *Water research*, 39(8):1471–1480, 2005.
- [24] R. Ganesh, G. Balaji, and R. Ramanujam. Biodegradation of tannery wastewater using sequencing batch reactor–respirometric assessment. *Bioresource Technology*, 97(15):1815–1821, 2006.
- [25] A. Carucci, A. Chiavola, M. Majone, and E. Rolle. Treatment of tannery wastewater in a sequencing batch reactor. *Water Science and Technology*, 40(1):253–259, 1999.
- [26] S. Murat, E. Ateş, R. Taşlı, N. Artan, and D. Orhon. Sequencing batch reactor treatment of tannery wastewater for carbon and nitrogen removal. *Water Science and Technology*, 46(9):219–227, 2002.
- [27] J. Manning and R. Irvine. The biological removal of phosphorus in a sequencing batch reactor. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 57(1):87–94, 1985.
- [28] M. Palma-Acosta y J. Manga Certain. Simulación de un sistema de fangos activados en discontinuo (SBR) para el tratamiento de aguas residuales con altos contenidos de nitrógeno. *Ingeniería y Desarrollo*, (18):61–71, 2005.
- [29] T. Luo, M. Yang, J. Han, and P. Sun. A novel model-based adaptive control strategy for step-feed sbrs dealing with influent fluctuation. *Bioresource Technology*, 167:476–483, 2014.
- [30] B. Ni and H. Yu. Storage and growth of denitrifiers in aerobic granules: Part i. model development. *Biotechnology and bioengineering*, 99(2):314–323, 2008.
- [31] J. Silverstein and E. Schroeder. Performance of sbr activated sludge processes with nitrification/denitrification. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 55(4):377–384, 1983.
- [32] M. Zárate y C. Rojas. Guía técnica para la minimización de residuos en curtiembres. Technical report, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias, Lima Perú, 1993.
- [33] N. Nemerow. *Aguas residuales industriales: teorías, aplicaciones y tratamiento*. H. Blume Ediciones, 1977.
- [34] O. Tuenay, I. Kabdasli, and O. Guen. Sequencing batch reactor treatment of leather tanning industry wastewaters. *Fresenius Environmental Bulletin*, 13(10):945–950, 2004.
- [35] S. López-Palau, J. Dosta, A. Pericas, and J. Mata-Álvarez. Partial nitrification of sludge reject water using suspended and granular biomass. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 86(12):1480–1487, 2011.

Configuration of Harmony Search Parameters based on Fuzzy Logic

Alejandro Centeno^a, Alejandro Bolívar^b, Demetrio Rey^a, Francisco Arteaga^c, César Séijas^d, Ángel D. Almarza M.^{*,b}

^a*Instituto de Matemática y Cálculo Aplicado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.*

^b*Departamento de Computación, Dirección de Estudios Básicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.*

^c*Centro de Investigación y Tecnología en Automatización, Electrónica y Control. Departamento de Sistemas y Automática, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.*

^d*Centro de Procesamiento de Imágenes, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.*

Abstract.- The performance quality of any metaheuristic algorithm exhibits a close relationship with respect to the values assigned to its parameters. This is known as the configuration problem. In this work, a proposal for the configuration of the Harmony Search Algorithm parameters based on Fuzzy Logic is exposed. As a practical application, the proposal is used for the supervised training of a multilayer neural network in order to solve a binary classification problem.

Keywords: harmony search algorithm; fuzzy logic; optimization.

Configuración de los parámetros de la búsqueda armónica mediante lógica difusa

Resumen.- La calidad del desempeño de cualquier algoritmo meta-heurístico exhibe una estrecha relación con respecto a los valores asignados a sus parámetros asociados. Esto se conoce como el problema de la configuración. En el presente artículo, se expone la implementación de una propuesta basada en lógica difusa para la configuración de los parámetros numéricos del algoritmo de búsqueda armónica. Como aplicación práctica, la propuesta es utilizada para el entrenamiento supervisado de una red neuronal multicapa a fin de resolver un problema de clasificación binaria.

Palabras claves: algoritmo de búsqueda armónica; lógica difusa; optimización.

Recibido: 02 noviembre 2018

Aceptado: 08 febrero 2019

1. Introducción

En el campo de la optimización matemática, las meta – heurísticas han demostrado reiteradamente sus bondades y capacidades como métodos numéricos aplicados en la resolución de una amplia colección de modelos [1]. No obstante su éxito, es un hecho bien conocido que la calidad del desempeño de estos algoritmos guarda estrecha relación con respecto a los valores asignados a sus parámetros asociados. Esto se conoce como el problema de la configuración [2], el cual puede ser abordado mediante la implementación

de mecanismos fundamentados en un conjunto de reglas que gobiernen tal asignación de forma dinámica, durante la ejecución de una meta – heurística, con el propósito de maximizar el desempeño de la misma. Este esquema de solución se denomina control de parámetros [3]. Un ejemplo de tal esquema consiste en la aplicación de un Sistema de Inferencia Difuso (SID), donde las herramientas brindadas por la lógica difusa son utilizadas para establecer una correspondencia entre el estado del proceso de optimización (variables de entrada) y los valores asignados a los parámetros (variables de salida) de la meta – heurística que lo ejecuta [4]. Este concepto fue implementado recientemente en [5] sobre el Algoritmo de Búsqueda Armónica (ABA) [6] mediante un SID basado en reglas de Mamdani (SIDM) [7]. Trabajos similares han sido reportados

* Autor para correspondencia:

Correo-e: adalmarza@gmail.com (Ángel D. Almarza M.)

en [8, 9, 10, 11]. No obstante, sin desconocer sus valiosos aportes, todas estas investigaciones guardan en común el hecho de haber establecido un control sobre un subconjunto de los parámetros del ABA. En el presente artículo se exponen los resultados derivados de la implementación de un SIDM para la configuración dinámica de todo el ensamble de parámetros numéricos del ABA. Se formularon dos (02) versiones, denotadas en lo sucesivo como ABAD01 y ABAD02, diferenciadas solo por la variable de entrada utilizada. En ambas versiones, las variables de interés fueron granuladas mediante funciones de pertenencia de formato trapezoidal. Para propósitos de comparación, ABAD01, ABA y [5], fueron aplicadas sobre una colección de problemas de optimización no lineal. Por su parte, ABAD02 se implementó para el entrenamiento supervisado de una Red Neuronal Multicapa (RNM) a fin de resolver un problema de clasificación binaria. Los resultados obtenidos de este experimento fueron comparados con los derivados a partir de la aplicación del ABA, el Algoritmo de Retro – propagación del Error con Momento (ARPEM) [12] y [5] sobre el mismo problema.

2. Parámetros numéricos del algoritmo de búsqueda armónica (ABA)

La estructura implementada del ABA tiene asociada los siguientes parámetros numéricos [6]:

2.1. Tasa de selección en la memoria de armonías

Denotada HMCR (*Harmony Memory Chose Rate*) por sus siglas en inglés, representa la probabilidad asociada al evento de seleccionar una entrada en la memoria de armonías. Para la configuración dinámica, la estrategia asumida consistió en asignar valores bajos a HMCR durante las primeras etapas del proceso de optimización ejecutado por el ABA, transitando luego hacia valores altos durante las etapas finales [5, 11, 13, 14]. Entre los valores típicamente recomendados para este parámetro, se tiene: $HMCR \in [0,95; 0,99]$ [13] y $HMCR \geq 0,90$ [15].

2.2. Tasa de ajuste de tono

Denotada PAR (*Pitch Adjusting Rate*) por sus siglas en inglés, representa la probabilidad asociada al evento de aplicar una variación sobre la entrada previamente seleccionada en la memoria de armonías. En cuanto a la configuración dinámica, se adoptó la estrategia de asignar valores altos a PAR durante las primeras etapas del proceso de optimización, para luego transitar hacia valores bajos durante las etapas finales [16, 17, 18, 19]. Entre los valores típicamente recomendados para este parámetro, se tiene: $PAR \in [0,1; 0,9]$ [16] y $PAR \leq 0,5$ [15].

2.3. Ancho de banda

Denotado BW (*Band Width*) por sus siglas en inglés, representa la magnitud de la variación aplicada sobre una entrada previamente seleccionada en la memoria de armonías. En cuanto a su configuración dinámica, la estrategia adoptada es idéntica a la descrita para PAR [9, 13, 14, 15, 16, 20, 21]. Los valores típicos recomendados para BW están comprendidos entre el 0,1 y 1,0 por ciento del rango de valores permitidos para las variables asociadas al problema de optimización tratado [16].

2.4. Tamaño de la memoria de armonías

Denotado HMS (*Harmony Memory Size*) por sus siglas en inglés, representa el número de soluciones almacenadas en la memoria de armonías. Para su configuración dinámica se adoptó la misma estrategia de PAR [22, 23]. Entre los valores típicamente recomendados para este parámetro, se tiene: $HMS \in [1; 10]$ [16] y $HMS \in [4; 10]$ [24].

3. Propuesta para la configuración de parámetros

Se implementó un SIDM, cuyos elementos principales se detallan a continuación:

3.1. Variables de entrada

Denotada λ , para ABAD01 viene dada por el cociente entre el número de iteraciones k y el número de iteraciones máximas k^{max} , de acuerdo a la ecuación (1):

$$\lambda^{(k)} = \frac{k}{k^{max}} \quad (1)$$

Para ABAD02, se computa mediante el cociente entre el mejor desempeño ($f_{mejor}^{(k)}$) exhibido por las soluciones almacenadas en la memoria de armonías para la k – ésima iteración, y el mejor desempeño inicial ($f_{mejor}^{(0)}$), de acuerdo a la ecuación (2):

$$\lambda^{(k)} = 1 - \frac{f_{mejor}^{(k)}}{f_{mejor}^{(0)}} \quad (2)$$

3.2. Variables de salida

Parámetros del ABA, con redondeo de HMS al entero más cercano.

3.3. Fusificación

Parámetros del ABA, con redondeo de HMS al entero más cercano. Todas las variables se granularon mediante tres (03) conjuntos difusos, con etiquetas “Bajo”, “Medio” y “Alto”, caracterizados por las funciones de pertenencia de la Figura 1. Los valores asignados a los puntos de interés esquematizados se listan en la Tabla 1.

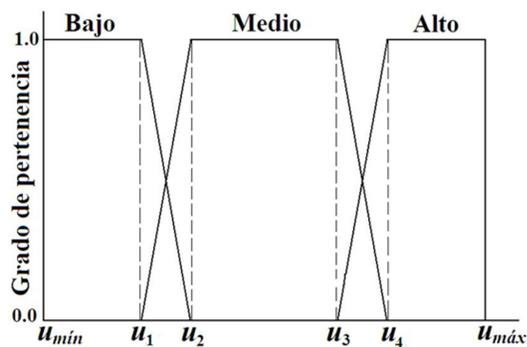


Figura 1: Formato de las funciones de pertenencia implementadas.

3.4. Base de conocimiento

Se aplicaron las reglas mostradas en la Tabla 2.

3.5. Desfusificación

Idéntico al método utilizado en [5].

4. Implementación de la propuesta

4.1. Estructura algorítmica

La integración se realizó de acuerdo al modelo de capas descrito en [3], alojando al SIDM en la capa de diseño.

Tabla 1: Valores asignados a los puntos de interés de acuerdo con el formato de las funciones de pertenencia implementadas

| P | u_{min} | u_1 | u_2 | u_3 | u_4 | u_{max} |
|-----------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| λ | 0 | 0,1 | 0,15 | 0,25 | 0,3 | 1 |
| HMCR | 0,9 | 0,909 | 0,9135 | 0,9225 | 0,927 | 0,99 |
| PAR | 0,1 | 0,14 | 0,16 | 0,2 | 0,22 | 0,5 |
| BW | $1,0 \cdot 10^{-3}$ | $1,9 \cdot 10^{-3}$ | $2,35 \cdot 10^{-3}$ | $3,25 \cdot 10^{-3}$ | $3,7 \cdot 10^{-3}$ | $1,0 \cdot 10^{-2}$ |
| HMS | 4 | 4,6 | 4,9 | 5,5 | 5,8 | 10 |

P:Parámetro

Tabla 2: Reglas Si – Entonces aplicadas a las variables de entrada (λ).

| Etiqueta | HMCR | PAR | BW | HMS |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| Bajo | Bajo | Alto | Alto | Alto |
| Medio | Medio | Medio | Medio | Medio |
| Alto | Alto | Bajo | Bajo | Bajo |

4.2. Algoritmos implementados

Para la resolución de los problemas de optimización no lineal se implementaron los algoritmos ABAD01, ABA [6] y FHS (*Fuzzy Harmony Search* por sus siglas en inglés) [5]. Los valores asignados a los parámetros de estos algoritmos fueron consultados en [5, 17, 18] y se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Valores asignados a los parámetros de los algoritmos aplicados sobre los problemas de optimización.

| Algoritmo | HMCR | PAR | BW | HMS |
|-----------|------|------|------|-----|
| ABAD01 | D | D | D | D |
| ABA | 0,90 | 0,30 | 0,01 | 5 |
| FHS | D | 0,75 | 0,01 | 5 |

D:Dinámico

Para el problema de clasificación binaria, se implementaron ABAD02, ABA y FHS. Los valores asignados a los parámetros de estos algoritmos fueron consultados en [25] y se muestran en la Tabla 4.

El universo del discurso de HMCR para FHS se estableció en . Adicionalmente, se implementó

Tabla 4: Valores asignados a los parámetros de los algoritmos aplicados sobre el problema de clasificación.

| Algoritmo | HMCR | PAR | BW | HMS | Rango para pesos sinápticos |
|-----------|----------|-----|------|-----|-----------------------------|
| ABAD02 | D | D | D | D | [-10,0 10,0] |
| ABA | 0,9 | 0,3 | 0,01 | 10 | [-10,0 10,0] |
| FHS | Dinámico | 0,3 | 0,01 | 10 | [-10,0 10,0] |

D:Dinámico

el ARPEM [12] con tasa de aprendizaje igual a 0,008 y momento de 0,7. Estos valores se ajustaron empíricamente tratando de maximizar la velocidad de convergencia y eliminar oscilaciones en la curva de entrenamiento.

4.3. Problemas tratados

Se resolvieron problemas de optimización no lineal del tipo $\min f(\vec{x})$ sujeto a $\vec{x} \in S \subset R^n$, donde $f(\vec{x})$ es la función objetivo, S representa el espacio de búsqueda y n el número de variables intervinientes. Los problemas tratados fueron consultados en [26], http://infinity77.net/global_optimization/index.html y <http://www.sfu.ca/~surjano/optimization.html>, siendo seleccionadas catorce instancias en atención a la modalidad y carácter separable de $f(\vec{x})$ [26], tal y como se resume en las Tablas 5, 6, 7 y 8 mostradas a continuación.

Para el problema de clasificación se utilizó la base de datos Pima Diabetes (<http://archive.ics.uci.edu/ml>), eliminándose las entradas con datos faltantes [27] y aplicando normalización estadística [28]. La fase de entrenamiento por lotes se realizó en base al 60 por ciento de los datos con validación sobre el resto [27], cuantificándose el error y la tasa de acierto o clasificaciones correctas obtenidas según las expresiones planteadas en [25]. La RNM implementada se configuró de forma idéntica a [29].

4.4. Esquema de representación

Para todos los problemas tratados, los datos se estructuraron mediante arreglos unidimensionales con esquema de codificación uno a uno de

tipo punto flotante de doble precisión. Respecto al problema de clasificación, en la Figura 2 se muestra un ejemplo de la correspondencia entre pesos sinápticos y su representación para una red hipotética de dos (02) capas. Esta estructura se utilizó únicamente para los algoritmos meta – heurísticos.

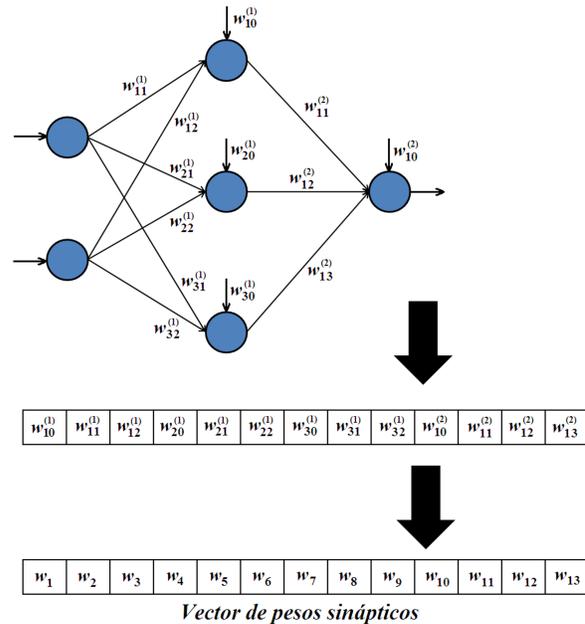


Figura 2: Representación de pesos sinápticos de una red hipotética de dos (02) capas.

4.5. Condiciones experimentales

Se efectuaron 50 ensayos independientes para cada par algoritmo/problema, fijándose el número de iteraciones máximas en $5 \cdot 10^4$, para los problemas listados en las Tablas 5, 6, 7 y 8 con $n = 30$, y $1 \cdot 10^4$ épocas para el problema de clasificación. En todos los algoritmos implementados, la estrategia para la asignación de valores al conjunto de soluciones de partida fue aleatoria con distribución uniforme sobre para los problemas de las Tablas 5 a 8, y entre -1 y 1 para el problema de clasificación. Para todos los algoritmos el criterio de parada se estableció en función del cumplimiento del número de iteraciones máximas.

Tabla 5: Instancias de problemas de optimización de tipo multimodal y separable.

| $f(\vec{x})$ | S |
|--|------------------------|
| $f_1(\vec{x}) = -20 + e^{0,2\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - \frac{\sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)}{n}}}$ | $[-35, 0 \ 35, 0]^n$ |
| $f_5(\vec{x}) = \sin^2\left(\pi\left(1 + \frac{x_1 - 1}{4}\right)\right) + \frac{1}{16} \sum_{i=1}^{n-1} \left[(x_i - 1)^2 \left(1 + 10 \sin^2\left(\pi\left(1 + \frac{x_{i+1} - 1}{4}\right)\right)\right) \right] + \frac{(x_n - 1)^2}{16}$ | $[-10, 0 \ 10, 0]^n$ |
| $f_{10}(\vec{x}) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$ | $[-100, 0 \ 100, 0]^n$ |

Tabla 6: Instancias de problemas de optimización de tipo multimodal y no separable.

| $f(\vec{x})$ | S |
|--|------------------------|
| $f_2(\vec{x}) = \sum_{i=1}^{n-1} \left[x_i^2 + 2x_{i+1}^2 - 0, 3 \cos(3\pi x_i) - 0, 4 \cos(4\pi x_{i+1}) + 0, 7 \right]$ | $[-15, 0 \ 15, 0]^n$ |
| $f_4(\vec{x}) = \sum_{i=1}^n \left[x_i^6 \left(2 + \sin\left(\frac{1}{x_i}\right) \right) \right]$ | $[-1, 0 \ 1, 0]^n$ |
| $f_9(\vec{x}) = 418, 982887272434 \cdot n - \sum_{i=1}^n x_i \sin(\sqrt{ x_i })$ | $[-500, 0 \ 500, 0]^n$ |
| $f_{11}(\vec{x}) = 10n + \sum_{i=1}^n \left[x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) \right]$ | $[-5, 12 \ 5, 12]^n$ |

Tabla 7: Instancias de problemas de optimización de tipo unimodal y no separable.

| $f(\vec{x})$ | S |
|---|------------------------|
| $f_3(\vec{x}) = \sum_{i=1}^{n-1} \left[(x_i^2)^{(x_{i+1}^2+1)} + (x_{i+1}^2)^{(x_i^2+1)} \right]$ | $[-1, 0 \ 4, 0]^n$ |
| $f_8(\vec{x}) = \sum_{i=1}^n x_i^2 + \left[\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n i x_i \right]^2 + \left[\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n i x_i \right]^4$ | $[-5, 0 \ 10, 0]^n$ |
| $f_{12}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^{n-1} \left[100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2 \right]$ | $[-30, 0 \ 30, 0]^n$ |
| $f_{14}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^n x_i + \prod_{i=1}^n x_i $ | $[-100, 0 \ 100, 0]^n$ |

Tabla 8: Instancias de problemas de optimización de tipo unimodal y separable.

| $f(\vec{x})$ | S |
|---|--------------------------|
| $f_6(\vec{x}) = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^i x_j^2 \right]$ | $[-65, 536 \ 65, 536]^n$ |
| $f_7(\vec{x}) = \sum_{i=1}^n x_i^2$ | $[-100, 0 \ 100, 0]^n$ |
| $f_{13}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^n x_i ^{i+1}$ | $[-1, 0 \ 1, 0]^n$ |

5. Resultados y análisis

En las Figuras 3, 4, 5 y 6, se presentan diagramas de caja y bigotes elaborados a partir del valor de $f(\vec{x})$ proporcionado por cada algoritmo al término de su ejecución.

A partir de los datos mostrados en las Figuras 3, 4, 5 y 6, se computaron los siguientes índices [30]: mejor valor, peor valor, mediana, promedio y desviación típica. Los resultados obtenidos se listan en las Tablas 9, 10, 11 y 12 mostradas a continuación.

Se aplicó una prueba de Wilcoxon en base al índice promedio de las Tablas 9 a 12, tomando

Tabla 9: Índices estadísticos computados para problemas de optimización de tipo multimodal y no separable.

| Problema | Algoritmo | Mejor Valor | Mediana | Peor Valor | Promedio | Desviación Típica |
|----------|-----------|-------------|-----------|------------|-----------|-------------------|
| f_1 | ABA | 8,7073E-1 | 1,3344E+0 | 1,6069E+0 | 1,2921E+0 | 1,6168E-1 |
| | FHS | 2,4988E+0 | 2,8520E+0 | 3,2407E+0 | 2,8726E+0 | 1,6872E-1 |
| | ABAD01 | 1,7479E-3 | 3,9784E-3 | 9,3139E-1 | 2,4891E-2 | 1,3240E-1 |
| f_5 | ABA | 2,4755E-3 | 4,1418E-3 | 6,0103E-3 | 4,0886E-3 | 7,2810E-4 |
| | FHS | 1,4469E-2 | 2,0834E-2 | 2,8424E-2 | 2,1358E-2 | 3,4596E-3 |
| | ABAD01 | 1,2951E-8 | 7,5596E-8 | 3,1799E-7 | 8,2626E-8 | 4,7443E-8 |
| f_{10} | ABA | 1,8009E-1 | 2,4002E-1 | 3,6387E-1 | 2,4230E-1 | 3,7717E-2 |
| | FHS | 6,0196E-1 | 7,9784E-1 | 8,8585E-1 | 7,8831E-1 | 6,5563E-2 |
| | ABAD01 | 1,8788E-6 | 7,8338E-6 | 9,5406E-2 | 4,9683E-3 | 1,4149E-2 |

Tabla 10: Índices estadísticos computados para problemas de optimización de tipo multimodal y separable.

| Problema | Algoritmo | Mejor Valor | Mediana | Peor Valor | Promedio | Desviación Típica |
|----------|-----------|-------------|------------|------------|------------|-------------------|
| f_2 | ABA | 3,9782E+0 | 6,4177E+0 | 1,0774E+1 | 6,6464E+0 | 1,4293E+0 |
| | FHS | 1,3436E+1 | 1,7496E+1 | 2,0948E+1 | 1,7205E+1 | 1,7767E+0 |
| | ABAD01 | 6,9604E-5 | 2,5696E-4 | 1,0534E+0 | 1,3675E-1 | 3,4778E-1 |
| f_4 | ABA | 2,1924E-12 | 9,0805E-12 | 2,7046E-11 | 1,0170E-11 | 5,1955E-12 |
| | FHS | 2,6255E-10 | 8,2081E-10 | 3,0297E-9 | 1,0604E-9 | 6,5462E-10 |
| | ABAD01 | 2,7527E-27 | 7,1250E-26 | 1,9730E-24 | 1,8374E-25 | 3,3586E-25 |
| f_9 | ABA | 1,1934E+1 | 1,7576E+1 | 2,6589E+1 | 1,8706E+1 | 3,8236E+0 |
| | FHS | 5,8138E+1 | 9,0470E+1 | 2,2797E+2 | 9,6150E+1 | 3,5619E+1 |
| | ABAD01 | 1,0555E-4 | 2,9611E-4 | 6,7224E-4 | 3,1060E-4 | 1,0801E-4 |
| f_{11} | ABA | 1,1107E+1 | 1,6921E+1 | 2,5440E+1 | 1,7060E+1 | 2,7588E+0 |
| | FHS | 2,3827E+1 | 3,3888E+1 | 4,5108E+1 | 3,4477E+1 | 4,9195E+0 |
| | ABAD01 | 5,5664E-5 | 1,9992E-4 | 9,9607E-1 | 1,4006E-1 | 3,4861E-1 |

Tabla 11: Índices estadísticos computados para problemas de optimización de tipo unimodal y no separable.

| Problema | Algoritmo | Mejor Valor | Mediana | Peor Valor | Promedio | Desviación Típica |
|----------|-----------|-------------|-----------|------------|-----------|-------------------|
| f_3 | ABA | 4,2114E-3 | 6,9762E-3 | 1,0508E-2 | 7,0557E-3 | 1,4153E-3 |
| | FHS | 2,1995E-2 | 3,1086E-2 | 4,4470E-2 | 3,1897E-2 | 4,9929E-3 |
| | ABAD01 | 4,9485E-8 | 1,2692E-7 | 2,3263E-7 | 1,3093E-7 | 4,7940E-8 |
| f_8 | ABA | 3,5123E+0 | 9,4746E+0 | 1,9491E+1 | 9,6415E+0 | 4,1468E+0 |
| | FHS | 6,4078E+0 | 1,4293E+1 | 2,6747E+1 | 1,5183E+1 | 4,8575E+0 |
| | ABAD01 | 3,4896E-4 | 7,5197E-3 | 3,6766E-1 | 4,0018E-2 | 7,9672E-2 |
| f_{12} | ABA | 9,0057E+1 | 2,5142E+2 | 2,8115E+3 | 3,6762E+2 | 4,1917E+2 |
| | FHS | 2,6666E+2 | 6,9611E+2 | 2,9185E+3 | 8,5798E+2 | 5,7204E+2 |
| | ABAD01 | 1,6956E+1 | 7,8971E+1 | 3,7359E+2 | 8,4416E+1 | 7,3163E+1 |
| f_{14} | ABA | 6,8161E+0 | 9,0334E+0 | 1,0728E+1 | 9,0139E+0 | 1,0097E+0 |
| | FHS | 2,0372E+1 | 2,5865E+1 | 2,6880E+2 | 4,3481E+1 | 4,8490E+1 |
| | ABAD01 | 2,9347E-2 | 3,7114E-2 | 5,2874E-2 | 3,7961E-2 | 6,3080E-3 |

al ABAD01 como algoritmo de control [31]. Los valores se normalizaron entre 0 y 1 según el método Mín – Máx [28]. El nivel de significancia se fijó en

0,05. Los resultados se resumen en la Tabla 13.

Los resultados de la prueba permiten afirmar, con un nivel de significancia del 0,05, que

Tabla 12: Índices estadísticos computados para problemas de optimización de tipo unimodal y separable.

| Problema | Algoritmo | Mejor Valor | Mediana | Peor Valor | Promedio | Desviación Típica |
|----------|-----------|-------------|------------|------------|------------|-------------------|
| f_6 | ABA | 2,2564E+1 | 3,5806E+1 | 5,1548E+1 | 3,6464E+1 | 6,9574E+0 |
| | FHS | 1,1387E+2 | 1,8001E+2 | 3,1319E+2 | 1,8232E+2 | 3,3425E+1 |
| | ABAD01 | 2,4023E-4 | 5,9908E-4 | 1,3328E-3 | 6,5428E-4 | 2,6917E-4 |
| f_7 | ABA | 3,6620E+0 | 6,0205E+0 | 7,5671E+0 | 5,8166E+0 | 1,0648E+0 |
| | FHS | 2,1041E+1 | 2,6705E+1 | 3,6977E+1 | 2,7109E+1 | 3,3808E+0 |
| | ABAD01 | 4,5126E-5 | 9,6170E-5 | 2,1709E-4 | 9,8965E-5 | 3,3735E-5 |
| f_{13} | ABA | 2,6967E-13 | 2,0366E-10 | 3,0820E-9 | 5,1686E-10 | 7,3611E-10 |
| | FHS | 3,6598E-10 | 3,2386E-9 | 2,3060E-8 | 4,9935E-9 | 4,9324E-9 |
| | ABAD01 | 7,1520E-15 | 3,6387E-13 | 7,0567E-12 | 1,2018E-12 | 1,7537E-12 |

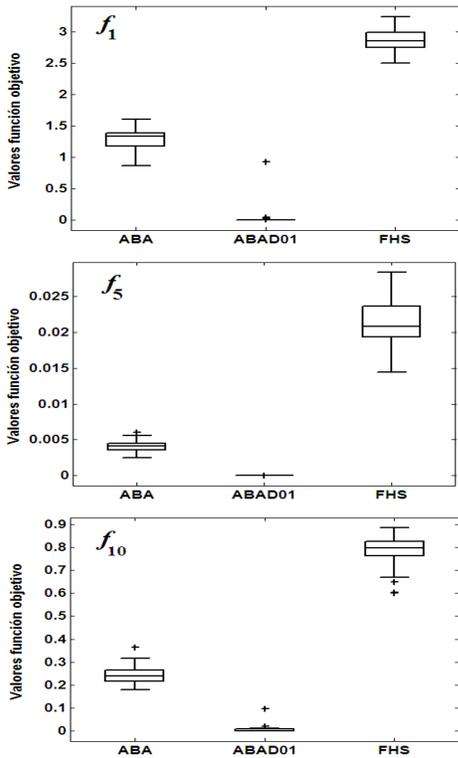


Figura 3: Diagramas de caja y bigotes para los resultados obtenidos sobre las instancias de problemas de optimización multimodal y separable

Tabla 13: Resultados de prueba de Wilcoxon sobre los promedios de los índices estadísticos computados para problemas de optimización.

| Algoritmos | W | <i>p</i> - value |
|-------------------|---|------------------|
| ABAD01 contra ABA | 0 | 1,2210E-4 |
| ABAD01 contra FHS | 0 | 2,1050E-4 |

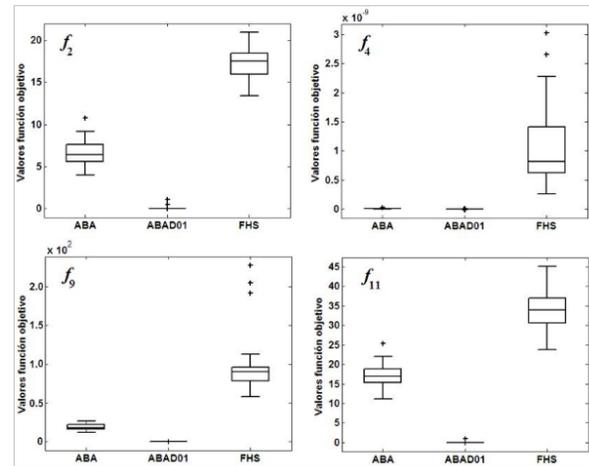


Figura 4: Diagramas de caja y bigotes para los resultados obtenidos sobre las instancias de problemas de optimización multimodal y no separable.

el ABAD01 representa una mejora significativa, respecto a ABA y FHS, como método de solución para los problemas de optimización tratados y bajo las condiciones experimentales antes referidas.

En la Figura 7, se presentan diagramas de caja y bigotes elaborados a partir del valor de la tasa de acierto, proporcionado por ABA, FHS y ABAD02 al término de sus ejecuciones, sobre los datos para entrenamiento (a) y validación (b) asociados al problema de clasificación tratado.

A partir de los datos mostrados en la Figura 7, se computaron los índices estadísticos: mejor valor, peor valor, mediana, promedio y desviación típica. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14: Índices computados para la tasa de acierto de los algoritmos ABA, FHS y ABAD02 tanto en entrenamiento como en validación.

| Índice | Fase | | | | | |
|-------------------|---------------|--------|--------|------------|--------|--------|
| | Entrenamiento | | | Validación | | |
| | ABA | FHS | ABAD02 | ABA | FHS | ABAD02 |
| Mejor valor | 0,9064 | 0,9447 | 0,9660 | 0,8662 | 0,8662 | 0,8790 |
| Mediana | 0,8255 | 0,8702 | 0,9362 | 0,7643 | 0,7803 | 0,8089 |
| Peor valor | 0,7447 | 0,8000 | 0,8723 | 0,6561 | 0,6752 | 0,7070 |
| Promedio | 0,8249 | 0,8720 | 0,9345 | 0,7665 | 0,7792 | 0,8079 |
| Desviación típica | 0,0330 | 0,0319 | 0,0185 | 0,0401 | 0,0419 | 0,0370 |

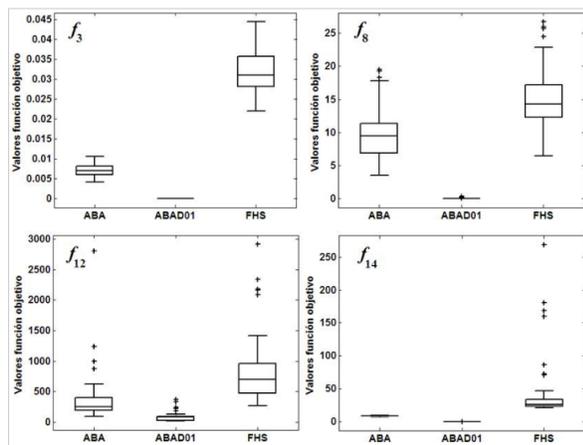


Figura 5: Diagramas de caja y bigotes para los resultados obtenidos sobre las instancias de problemas de optimización unimodal y no separable

Se aplicó una prueba de Wilcoxon en base a los datos asociados a la tasa de acierto en fase de validación (Figura 7b), tomando al ABAD02 como algoritmo de control. El nivel de significancia de la prueba se fijó en 0,05. Los resultados se resumen en la Tabla 15.

Tabla 15: Resultados de prueba de Wilcoxon sobre la tasa de acierto en fase de validación.

| Algoritmos | W | <i>p</i> - value |
|-------------------|---|------------------|
| ABAD02 contra ABA | 0 | 1,2300E-7 |
| ABAD02 contra FHS | 0 | 1,235E-5 |

Los resultados de la prueba permiten establecer, con un nivel de significancia del 0,05, que el ABAD02 representa una mejora significativa, en

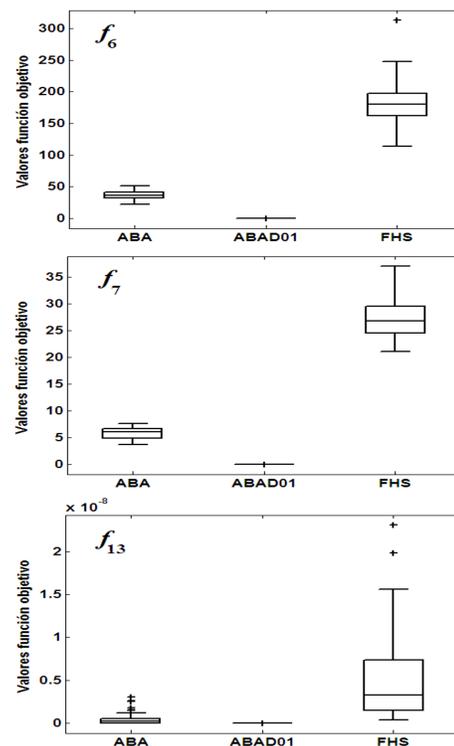


Figura 6: Diagramas de caja y bigotes para los resultados obtenidos sobre las instancias de problemas de optimización unimodal y separable.

relación a ABA y FHS, como método de solución para el problema de clasificación tratado y bajo las condiciones experimentales planteadas.

Respecto a la comparación de la propuesta y el ARPEM, en la Figura 8 se muestra diagramas de caja y bigotes elaborados a partir del valor de la tasa de acierto, proporcionado por estos algoritmos al término de sus ejecuciones, sobre los datos de entrenamiento (a) y validación (b).

A partir de los datos esquematizados en la

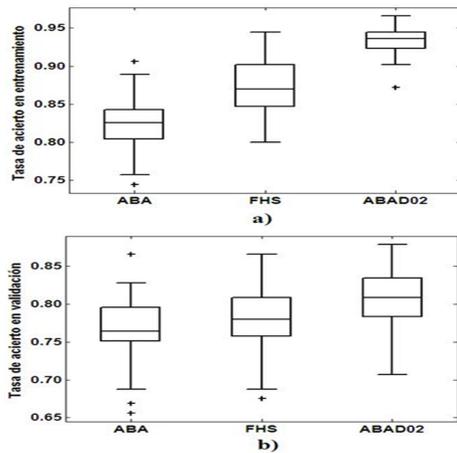


Figura 7: Tasa de acierto para ABA, FHS y ABAD02 en: a) Entrenamiento. b) Validación.

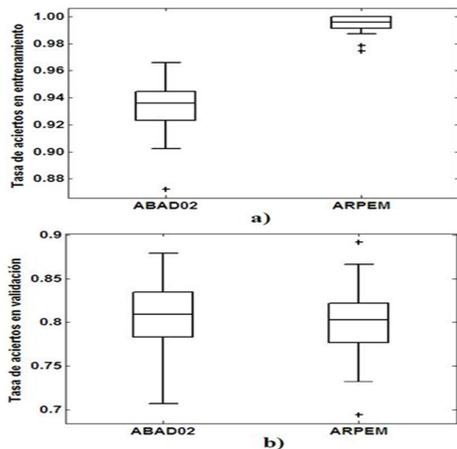


Figura 8: Tasa de acierto para ABAD02 y ARPEM en: a) Entrenamiento. b) Validación.

Figura 8, se computaron los índices: mejor valor, peor valor, mediana, promedio y desviación típica. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 16 mostrada a continuación.

Se aplicó una prueba de Wilcoxon sobre los datos asociados a la tasa de acierto en fase de validación. El nivel de significancia se fijó en 0,05. Los resultados se resumen en la Tabla 17.

Luego, aunque durante la fase de entrenamiento el ARPEM es claramente superior al ABAD02, los resultados de la prueba señalan, con una significancia de 0,05, que desde un punto de vista estadístico no existe diferencia significativa en cuanto a la capacidad de generalización exhibida por la RNM tras ser entrenada mediante ambos algoritmos. Por supuesto, estas afirmaciones

Tabla 16: Índices computados para la tasa de acierto de los algoritmos ABAD02 y ARPEM en fase de entrenamiento y validación.

| Índice | Fase | | | |
|-------------------|---------------|--------|------------|--------|
| | Entrenamiento | | Validación | |
| | ABAD02 | ARPEM | ABAD02 | ARPEM |
| Mejor valor | 0,9660 | 1,0000 | 0,8790 | 0,8917 |
| Mediana | 0,9362 | 0,9957 | 0,8089 | 0,8025 |
| Peor valor | 0,8723 | 0,9745 | 0,7070 | 0,6943 |
| Promedio | 0,9345 | 0,9948 | 0,8079 | 0,8023 |
| Desviación Típica | 0,0185 | 0,0056 | 0,0370 | 0,0391 |

Tabla 17: Resultados de la prueba de Wilcoxon sobre la tasa de acierto en fase de validación para ABAD02 y ARPEM.

| Algoritmos | W | p - value |
|---------------------|-------|-----------|
| ABAD02 contra ARPEM | 597,5 | 0,2336 |

son válidas únicamente en el contexto de las condiciones experimentales establecidas.

6. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en el presente estudio, se evidenció que la implementación de un SIDM para la configuración dinámica de todo el ensamble de parámetros numéricos asociados al ABA se tradujo en una significativa mejora de este algoritmo, en relación a su versión de parámetros fijos, como método numérico aplicado en la resolución de problemas de optimización. Más aún, al ser comparada con FHS, la cual está basada en principios idénticos, la propuesta aquí planteada también representó una mejora sustancial. En lo que respecta a la experiencia sobre el entrenamiento supervisado de una RNM, no se halló diferencia estadísticamente significativa en cuanto a la capacidad de generalización obtenida mediante la aplicación del ARPEM y el esquema propuesto. Finalmente, se insiste en señalar que las conclusiones derivadas son válidas únicamente

en el contexto experimental establecido, siendo necesarias ulteriores investigaciones en el futuro.

7. Referencias

- [1] A. Gogna and A. Tayal. Metaheuristics: review and application. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 25(4):503–526, 2013.
- [2] T. Stützle, M. López-Ibáñez. Automated design of metaheuristic algorithms (technical report institut de recherches interdisciplinaires et de developpements en intelligence artificielle (iridia) number tr/iridia/2018-008). Technical report, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium: Technical Report Series, 2018.
- [3] G. Karafotias, M. Hoogendoorn, A. Eiben. Parameter Control in Evolutionary Algorithms: Trends and Challenges. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 19(2):167–187, 2015.
- [4] O. Castillo, F. Valdez, and P. Melin. A survey on nature – inspired optimization algorithms with fuzzy logic for dynamic parameter adaptation. *Expert Systems with Applications*, 41(14):6459 – 6466, 2014.
- [5] O. Castillo C. Peraza, and F. Valdez. An Improved Harmony Search Algorithm Using Fuzzy Logic for the Optimization of Mathematical Functions. In J. Kacprzyk P. Melin, O. Castillo, editor, *Design of Intelligent Systems Based on Fuzzy Logic, Neural Networks and Nature – Inspired Optimization*, volume 601, page 605 – 615. Springer – Verlag, Berlín, Germany, 2015.
- [6] K. Lee and Z. Geem. A new meta – heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 194(36):3902 – 3933, 2005.
- [7] E. Mamdani and S. Assilian. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man – Machine Studies*, 7(1):1 – 13, 1975.
- [8] K. Ameli, A. Alfi, and M. Aghaebrahimi. A fuzzy discrete harmony search algorithm applied to annual cost reduction in radial distribution systems. *Journal of Engineering Optimization*, 48(9):1529 – 1549, 2015.
- [9] K. Pandiarajan and C. Babulal. Fuzzy harmony search algorithm based optimal power flow for power system security enhancement. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 78(1):72 – 79, 2016.
- [10] C. Peraza, F. Valdez, and O. Castillo. An Adaptive Fuzzy Control Based on Harmony Search and Its Application to Optimization. In P. Melin, O. Castillo, J. Kacprzyk, editor, *Nature – Inspired Design of Hybrid Intelligent Systems*, volume 667, page 269 – 283. Springer – Verlag, Berlín, Germany, 2017.
- [11] C. Peraza, F. Valdez, J. Castro, and O. Castillo. Fuzzy Dynamic Parameter Adaptation in the Harmony Search Algorithm for the Optimization of the Ball and Beam Controller. *Advances in Operations Research*, 2018(7):1–16, 2018.
- [12] D. Rumelhart, G. Hinton, and R. Williams. Learning representations by back – propagating errors. *Nature*, 323(9):533 – 536, 1986.
- [13] M. Ahangaran and P. Ramezani. Harmony Search Algorithm: Strengths and Weaknesses. *Journal of Computer Engineering & Information Technology*, 2(1):1–7, 2013.
- [14] R. Diao and Q. Shen. Deterministic Parameter Control in Harmony Search. In S. Lucas, editor, *2010 UK Workshop on Computational Intelligence (UKCI)*, pages 1–7. University of Essex, Colchester, United Kingdom, 2010.
- [15] M. Omran and M. Mahdavi. Global – best harmony search. *Applied mathematics and computation*, 198(2):643 – 656, 2008.
- [16] H. Adeli and N. Siddique. Harmony Search Algorithm and its Variants. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 29(8):1 – 22, 2015.
- [17] C. Wang and Y. Huang. Self – adaptive harmony search algorithm for optimization. *Expert Systems with Applications*, 37(4):2826 – 2837, 2010.
- [18] P. Yadav, R. Kumar, S. Panda, and S. Chang. An intelligent tuned harmony search algorithm for optimisation. *Information Sciences*, 196:47 – 72, 2012.
- [19] J. Chen, Q. Pan, and J. Li. Harmony search algorithm with dynamic control parameters. *Applied Mathematics and Computation*, 219(2):592 – 604, 2012.
- [20] J. Kalivarapu, S. Jain, and S. Bag. An improved harmony search algorithm with dynamically varying bandwidth. *Engineering Optimization*, 48(7):1091 – 1108, 2016.
- [21] M. Mahdavi, M. Fesanghary, and E. Damangir. An improved harmony search algorithm for solving optimization problems. *Applied Mathematics and Computation*, 188(2):1567 – 1579, 2007.
- [22] F. Fernandez, M. Tomassini, and L. Vanneschi. Saving computational effort in genetic programming by means of plagues. In *Proceedings of the 2003 Congress on Evolutionary Computation (CEC'03)*, page 2042 – 2049, Canberra, Australia, 2003.
- [23] F. de Vega, E. Cantú–Paz, J. López, and T. Manzano. Saving resources with plagues in genetic algorithms. In X. Yao et al., editor, *Parallel Problem Solving from Nature – PPSN VIII, Vol. 3242: Lecture Notes in Computer Science*, page 272 – 281. Springer – Verlag, Berlín, Germany, 2004.
- [24] M. Fesanghary, M. Mahdavi, M. Minary-Jolandan, and Y. Alizadeh. Hybridizing harmony search algorithm with sequential quadratic programming for engineering optimization problems. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 197(40):3080 – 3091, 2008.

- [25] S. Kulluk, L. Ozbakir, and A. Baykasoglu Training neural networks with harmony search algorithms for classification problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(1):11–19, 2012.
- [26] M. Jamil and X. Yang A literature survey of benchmark functions for global optimization problems. *Int. Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimization*, 4(2):150 – 194, 2013.
- [27] A. Karegowda, A. Manjunath, and M. Jayaram. Application of Genetic Algorithm Optimized Neural Network Connection Weights for Medical Diagnosis of Pima Indians Diabetes. *International Journal on Soft Computing (IJSC)*, 2(2):15–23, 2011.
- [28] T. Jayalakshmi and A. Santhakumaran. Statistical Normalization and Back Propagation for Classification. *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 3(1):1793 – 8201, 2011.
- [29] H. Faris, I. Aljarah, and S. Mirjalili. Improved monarch butterfly optimization for unconstrained global search and neural network training. *Applied Intelligence*, 48(2):445 – 464, 2018.
- [30] X. Li, K. Tang, M. Omidvar, Z. Yang, and K. Qin. Benchmark Functions for the CEC’2013 Special Session and Competition on Large – Scale Global Optimization. *Gene*, 7(33):8–30, 2013.
- [31] J. Derrac, S. García, D. Molina, and F. Herrera. A practical tutorial on the use of nonparametric statistical tests as a methodology for comparing evolutionary and swarm intelligence algorithms. *Swarm and Evolutionary Computation*, 1(1):3–18, 2011.

Modeling of the monthly distribution of soil erosion and sediment yield in the Tucutunemo Basin, Venezuela

Samuel Cárdenas^a, Adriana Márquez^{*,a}, Edilberto Guevara^a, Demetrio Rey^b

^a*Center of Hydrological and Environment Research, University of Carabobo, Venezuela.*

^b*Institute of Mathematics and Compute Applied, University of Carabobo, Venezuela.*

Abstract.- This research deals with the modeling of the monthly distribution of soil erosion and sediment yield in the Tucutunemo basin for the year 2015. The remote sensing technics on Landsat satellite images and ASTER global digital elevation model of a spatial resolution of 30 meters are adapted to use USLE (Universal Soil Loss Equation) and Langebein-Schumm models to estimate the erosion. The monthly precipitation is estimated using the statistical spatial prediction models based on the Ordinary Krigging using the records of 23 precipitation gauges. The J-Bessel model is the best adjustment to the precipitation of 30 minutes. It has been found that the soil erosion and yield sediment occur in the high and middle part of the basin. According the location, the precipitation of 30 minutes occurs in a magnitude from high moderately to high during the rainy season. The applied method contributes to detect the specific areas of sediment accumulation into the basin

Keywords: soil erosion; sediment yield; J-Bessel model.

Modelado de la distribución mensual de la erosión del suelo y la producción de sedimentos en la cuenca de Tucutunemo, Venezuela

Resumen.- Esta investigación tiene como objetivo el modelado de la distribución mensual de la erosión del suelo y la producción de sedimentos en la cuenca de Tucutunemo, para el año 2015. Con la finalidad de estimar la erosión, se adaptaron las técnicas de detección remota en imágenes satelitales de Landsat y el modelo de elevación digital global ASTER con una resolución espacial de 30 metros para utilizar los modelos USLE (*Universal Soil Loss Equation*) y Langebein-Schumm. La precipitación mensual se estima utilizando los modelos estadísticos de predicción espacial, basados en Krigging Ordinario usando los registros de 23 indicadores de precipitación. Para la precipitación de 30 minutos, el modelo J-Bessel es el que presenta mejor ajuste. Se ha encontrado que la erosión del suelo y la producción de sedimentos ocurren en la parte alta y media de la cuenca. Así mismo, las precipitaciones de 30 minutos se producen en una magnitud de moderadamente alta a alta, según la ubicación, durante la temporada de lluvias. El método aplicado contribuye a detectar las áreas específicas de acumulación de sedimentos en la cuenca

Palabras claves: Erosión de suelos; Producción de sedimentos; Modelo J-Bessel.

Received: November 25, 2018

Accepted: February 15, 2019

1. Introduction

Until the end of the 1970s, the soil erosion and sediment yield models were used to estimate the lumped occurrence of these hydrological variables. Because of the development of the computer technology, the geographical information system (GIS) capabilities, and the availability of remote

sensing products such as the satellite images and digital elevation models (DEM) to the present, the transition from the lumped models to the distributed models has been possible. The lumped models are characterized by two aspects: 1) they assume spatially homogeneous uniform hillslope, and 2) they are empirically based. Among these models have been found USLE [1], RUSLE [2] and EPIC [3]. The distributed models of soil erosion and sediment yield can be classified according to the flow regimen: 1) steady-state and 2) dynamic state. In the first case, the distributed models of soil erosion and sediment yield have the following

* Autor para correspondencia:

Correo-e: ammarquez@uc.edu.ve (Adriana Márquez)

characteristics: 1) They are models that adequately represent deposition processes or sedimentation pathways, 2) they are process-based models, 3) they are characterized by the presence of a governing differential equation such as the kinematic wave model. Among these models have been found ANSWER [4], Water Erosion Prediction Project (WEPP) model [5] and the European Soil Erosion Model (EUROSEM) [6]. In the second case, the distributed models of soil erosion and sediment yield have the following characteristics: 1) They are models that adequately represent deposition processes or sedimentation pathways, 2) they are process-based models, 3) they are characterized by the presence of a governing differential equation such as the kinematic wave model and 4) they provide information on peak sediment discharge or the sediment load pattern within a storm. The main model that represents this evolution is the dynamic version of the WEPP known as DWEPP [7].

In recent years, the progress in the GIS tools and the products derived of remote sensing have given as a result the application of the USLE model in the steady-state by estimating the soil erosion from the models evolved from rainfall based erosion prediction, through Soil Conservation Service Curve-Number-based runoff estimations. These USLE applications to estimate the soil erosion precisely on the watershed and basin scale rather at a field scale have been implemented by [8, 9]. The DEM allows to use the terrain elevations to estimate the terrain slope with a spatial resolution that can be adjusted to the field practices, which influences on the topographical factor. The satellite images allow to apply classification techniques to estimate the land use and land cover (LULC) in the study area, which influences on the crop management factor (C), the conservation practice factor (P) and the curve number (CN). This study is carried out on the Tucutunemo river basin, the aims are: 1) to apply the empirical models to estimate the soil erosion and the sediment yield, such as USLE and Langbein-Schumm model, 2) to determine the areas associated to the source for soil particle detaching and sediment yield.

2. Study area

The study area is the Tucutunemo river basin located in the Aragua State at the central region of Venezuela (Figure 1). The basin area is limited by the following coordinates: 67°19'00"W, 67°29'00"W, 10°02'00"N, 10°08'30". The length of the main stream of the Tucutunemo river is of 27 km. The terrain slope varies as follows: 0-15 % (41 km², 37 %), 15-33 % (38 km², 35 %), 33-54 % (25 km², 22 %), 54->153 % (7km², 6 %). Most part of terrain slope can be classified as of mean to high varying in a range between 5 and 20 % [10]. The total area of basin is 110 km².

3. Methods

3.1. Estimation of the soil erosion

The soil erosion is estimated using the Universal Soil Loss Equation (USLE) model developed by [1] following the process shown in the Figure 2. The equation (1) estimates A, the average annual soil erosion per unit area (t/ha) from six independent factors: a) R is rainfall erosivity factor (MJ.mm/ ha.h); b) K is the soil erodibility factor (Mg.h/MJ.mm) c) LS is the topographical factor integrated by L, length factor and S, the slope steepness factor; d) C is the crop management factor and e) P is the conservation practice factor.

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P. \quad (1)$$

a) **Rainfall erosivity factor (R):** the R factor (Figure 3) for n number of periods is calculated using total kinetic energy of a storm (E) for k number of such type of periods using the following equations (2),(3) and (4):

$$E = \sum_{i=1}^k E_i, \quad (2)$$

$$EI_{30} = E \cdot I_{30}, \quad (3)$$

$$R = \sum_{l=1}^n \left[\sum_{j=1}^m (EI_{30})_j \right]. \quad (4)$$

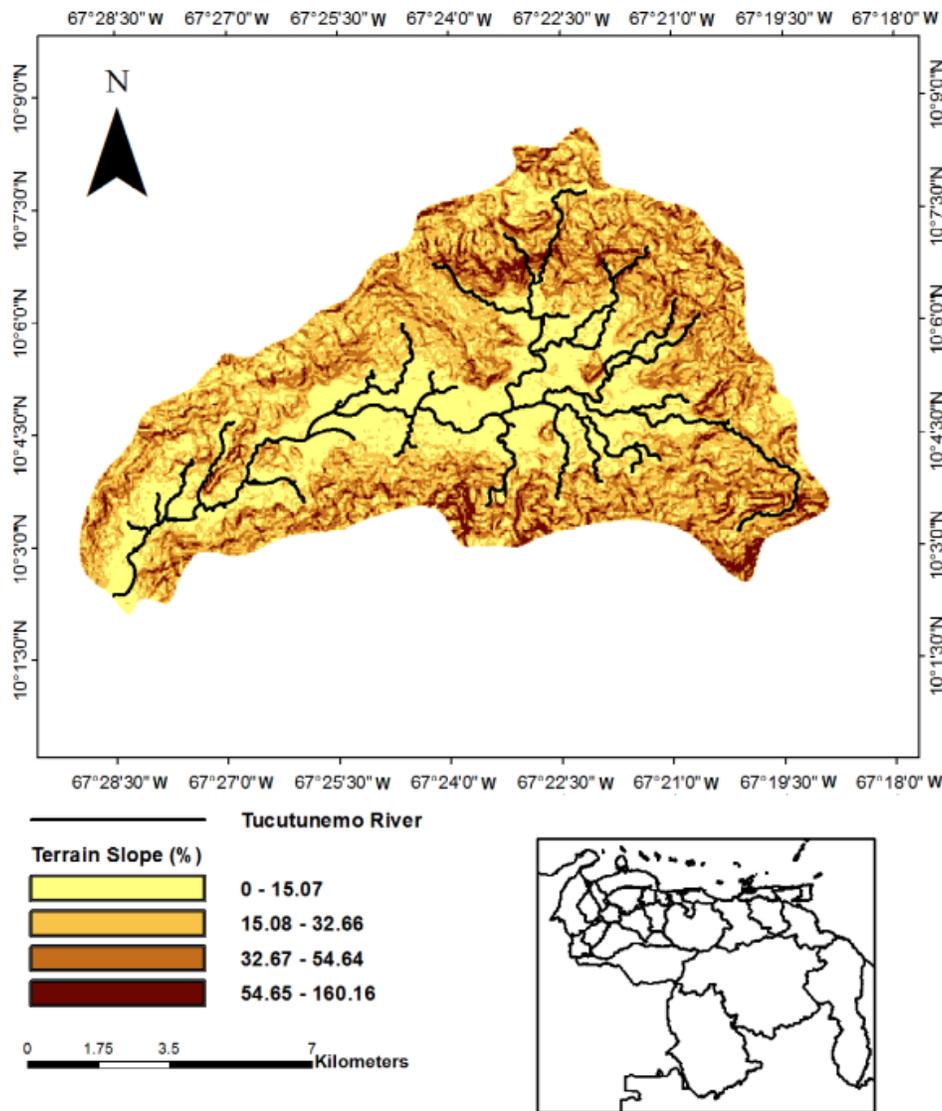


Figura 1: Location of Tucutunemo river basin, Aragua state, Venezuela.

Where, I_{30} is the highest rainfall intensity in any 30 minutes duration (mm/h); EI_{30} is the rainfall erosivity index for storm j ; m is the number of storms in n number of periods; R is rainfall erosivity factor (MJ.mm/ha.h) for n number of periods. The kinetic energy for the rainfall periods having constant intensity is estimated using the equation (5) [1]:

$$\begin{cases} E_i = P_i (0, 119 + 0, 0873 \log_{10} I_i), \\ \text{if } I_i < 76\sqrt{v} \\ E_i = P_i (0, 0, 283), \text{ if } I_i > 76\sqrt{v} \end{cases} \quad (5)$$

Where, E_i is the kinetic energy per area unit (MJ/ha); P_i is the depth of rainfall (mm) and I_i

is the intensity of rainfall (mm/h) for a rainfall periods having constant intensity.

The rainfall data is acquired from the records each 5 minutes obtained from station network of 24 rainfall gauges operated in real time by the National Institute of Meteorology and Hydrology (Table 1). The rainfall is accumulated from sequencing periods each 5 minutes to a total of 30 minutes. The selected storm event corresponding to duration of 30 minutes is the maximum total precipitation occurred into each month for 2015.

The models of statistical spatial prediction (SSPM) are applied for predicting the precipi-

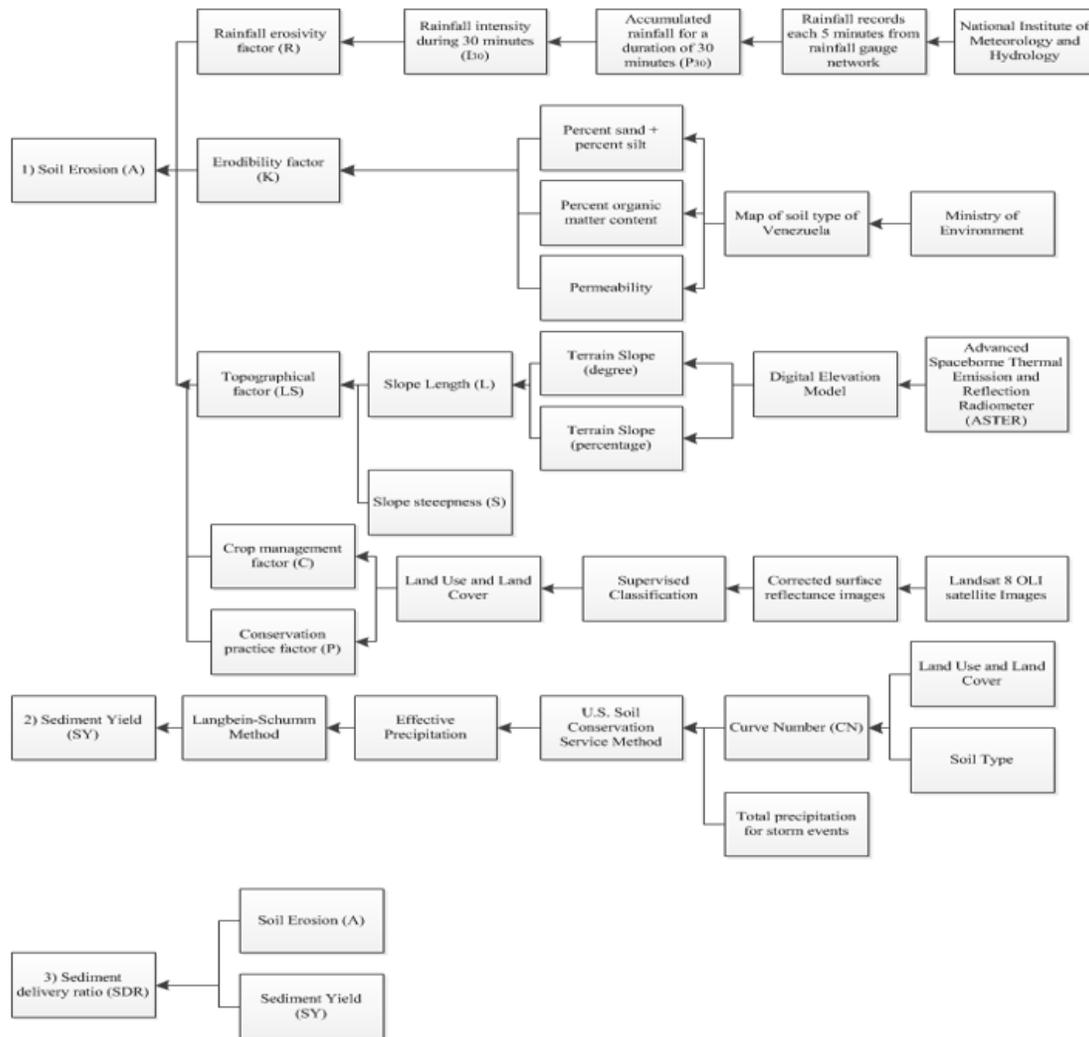


Figura 2: The process of estimating hydrologic variables in the Tucutunemo river basin, Aragua state, Venezuela: 1) Soil erosion (A), 2) Sediment yield (SY), 3) Sediment delivery ratio (SDR).

tation; using the values of the target variable (z) at some new location s_0 , being a set of observations of a target variable z denoted as $z(s_1), z(s_2), \dots, z(s_n)$, where $s_i = (x_i, y_i)$ is a location and x_i and y_i are the coordinates in geographical space and n is the number of observations. The precipitation values represent the target variable. The geographical domain of interest (area, land surface, object) can be denoted as A , represented by the Tucutunemo river basin. It defines inputs, outputs and the computational procedure to derive outputs based on the given inputs: $\hat{Z}(s_0) = E\{Z/z(s_i), q_k(s_0), \gamma(h), s \in A\}$.

Where $z(s_i)$ is the input point dataset, $q_k(s_0)$

is the list of deterministic predictors and $\gamma(h)$ is the covariance model defining the spatial autocorrelation structure. The type of SSPM used is the statistical model called Ordinary Kriging (OK), whose technique was developed by [11]. The predictions are based on the model referred by the equation (6):

$$Z(s) = \mu + \varepsilon'(s). \quad (6)$$

Where μ is the constant stationary function (global mean) and $\varepsilon'(s)$ is the spatially correlated stochastic part of variation. The predictions are made as in [12] introduced to the analysis of point data is the derivation and plotting of the

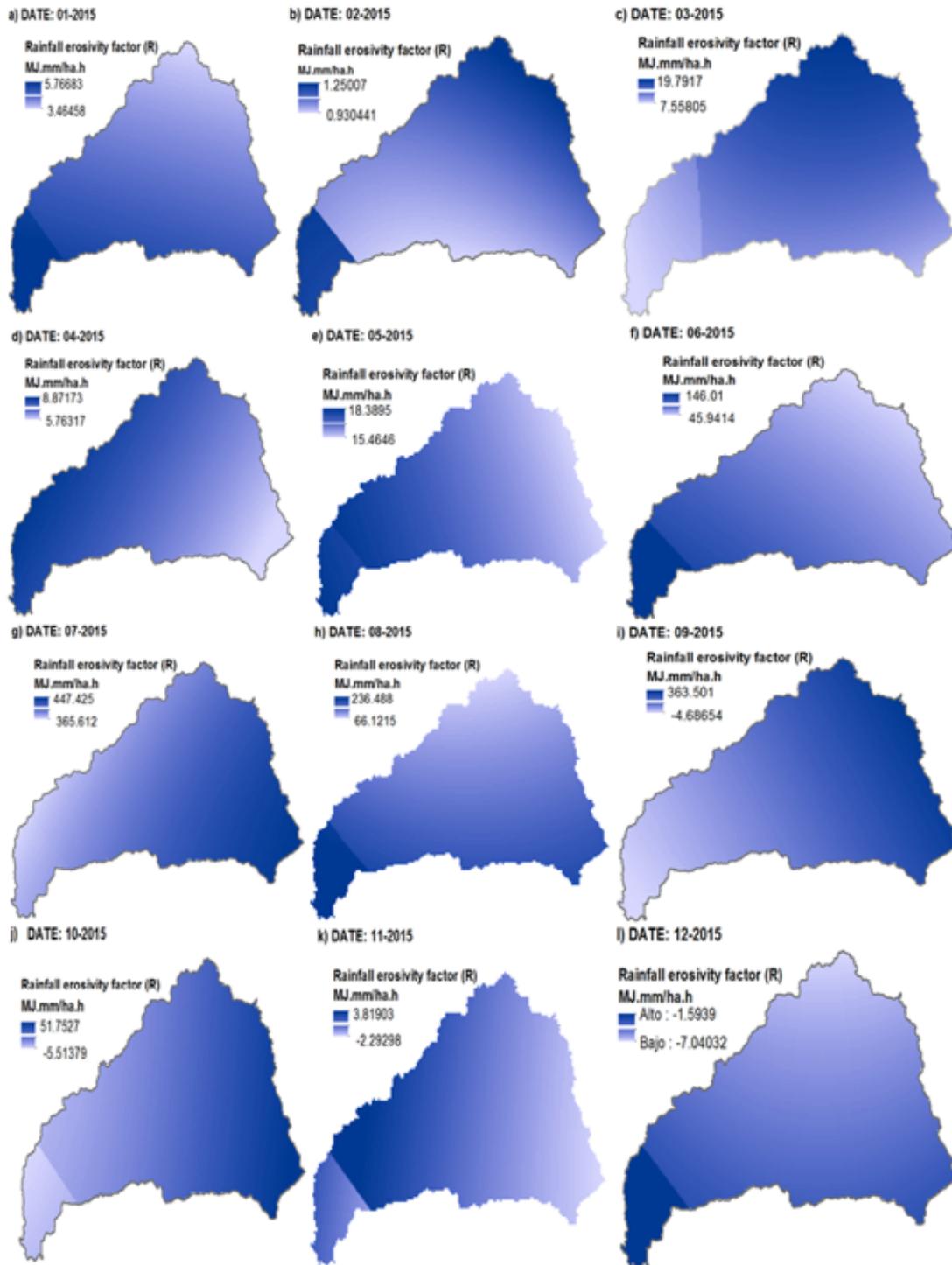


Figura 3: Monthly rainfall erosivity factor (R) corresponding to the Tucutunemo river basin, Aragua State, Venezuela, during 2015

so-called semivariances— differences between the neighbouring values following the equation (7):

$$\gamma(h) = 1/2E [(z(s_i) - z(s_{i+h}))^2]. \quad (7)$$

Where $z(s_i)$ is the value of target variable at some sampled location and $z(s_{i+h})$ is the

Tabla 1: Rainfall stations in the Tucutunemo river basin.

| Identification | Universal Trasversal Mercator (UTM) Zone 19 North | |
|--------------------------|---|---------|
| | X | Y |
| | Maracay | 647852 |
| San Juan de los Morros | 682730 | 1096657 |
| Guigüe | 616848 | 1124032 |
| Barquisimeto | 465302 | 1112800 |
| Acarigua | 474393 | 1055668 |
| Central | 720643 | 1172466 |
| Cumana | 370486 | 1155409 |
| Maturín | 479892 | 1077777 |
| Porlamar | 394363 | 1206934 |
| El Vigía | 208341 | 955328 |
| Guanare | 419398 | 996776 |
| Guasdalito | 301257 | 799936 |
| Valera | 349492 | 1018357 |
| Barinas | 366124 | 952685 |
| Valencia-oficina | 608178 | 1131078 |
| Pto Cabello base naval | 608490 | 1159760 |
| Campo Carabobo | 592724 | 1106863 |
| San Diego | 616988 | 1138671 |
| Vigirima | 622892 | 1135723 |
| Hda el Manglar | 613822 | 1154779 |
| Agua Blanca | 626026 | 1110365 |
| Vivero Belén | 643956 | 1105246 |
| Planta de Potabilización | 619290 | 1112277 |

value of the neighbor at distance s_{i+h} . The semivariograms versus their distances produce a standard experimental variogram. From the experimental variogram, it can be fitted using some of the authorized variogram models, such as linear, spherical, exponential, circular, Gaussian, Bessel, power and similar [13]. The results generated from the application of SSPM for the precipitation data of 30 minutes are shown in Figure 4. The rest of maps are obtained by using the raster calculator tool contained in the menu of spatial analyst tools into the ArcToolbox as a part of menu of available options in the Geographic Information System (GIS) software identified as ArcGIS V10.0.

b) **Soil erodibility factor (K):** the K factor (Figure 5) is the rate of soil erosion per unit of rainfall erosivity index for a specified soil. The K factor was calculated using the following regression equation (8) presented by [14]:

$$K = 2,8 \cdot 10^{-7} \cdot M^{1,14} (12 - a) + 4,3 \cdot 10^{-3} (b - 2) + 3,3 \cdot 10^{-3} (c - 3). \tag{8}$$

Where, K: soil erodibility factor (Mg.h/MJ.mm); M: particle size parameter (percent silt + percent very fine sand); a: percent organic matter content; b: soil structure code; c: soil profile permeability class. The parameters for the K factor estimating are derived from the Venezuela soil national map created by the Ministry of Environment and available from the website of the Geographic Institute of Venezuela, Simon Bolivar. The extraction of soil type for the Tucutunemo river basin is made using the tool of extraction by mask in ArcGIS 10.0 (Figure 5). Two soil types are found in the Tucutunemo river basin, which are inceptisols (87,75 km², 74 %) and mollisols (31,2 km², 26 %) (Figure 5a). Once the soil type is defined, the a and b parameters are mainly obtained from [15]. The average of organic carbon amount in the different depths of profiles in inceptisols order is found varying between 1,1 and 1,44 % for a soil depth from 0 to 15 cm [16]. The particle size distribution of inceptisols soil for a depth from 0 to 24 cm determined by Voncir et al.[17], is: sand: 70,45 %, silt: 15,06 %, clay: 14,49 %. The average organic matter amount and average texture for a mollisols soil type are determined by [17, 18], as follows: organic matter: 26 g/kg (2,71 %), sand: 120 g/kg (12,5 %), silt: 577 g/kg (60,16 %), clay: 236 g/kg (24,6 %). The percent sand + silt contents and percent organic matter content are shown in Figures 5(b) and Figure 5(c), respectively. For inceptisols and mollisols soils according to the particle size distribution, the permeabilities are 10 m/d and 1 m/d, the medium particle sizes are 0,5 and 0,1 mm, respectively [19]. These parameters a and b to determine the K factor in equation (8) are selected from Table 2 and Table 3. The result of erodibility factor is shown in the Figure 5f.

c) **Topographical factor (LS):** The topography factors such as: slope length (L) and slope

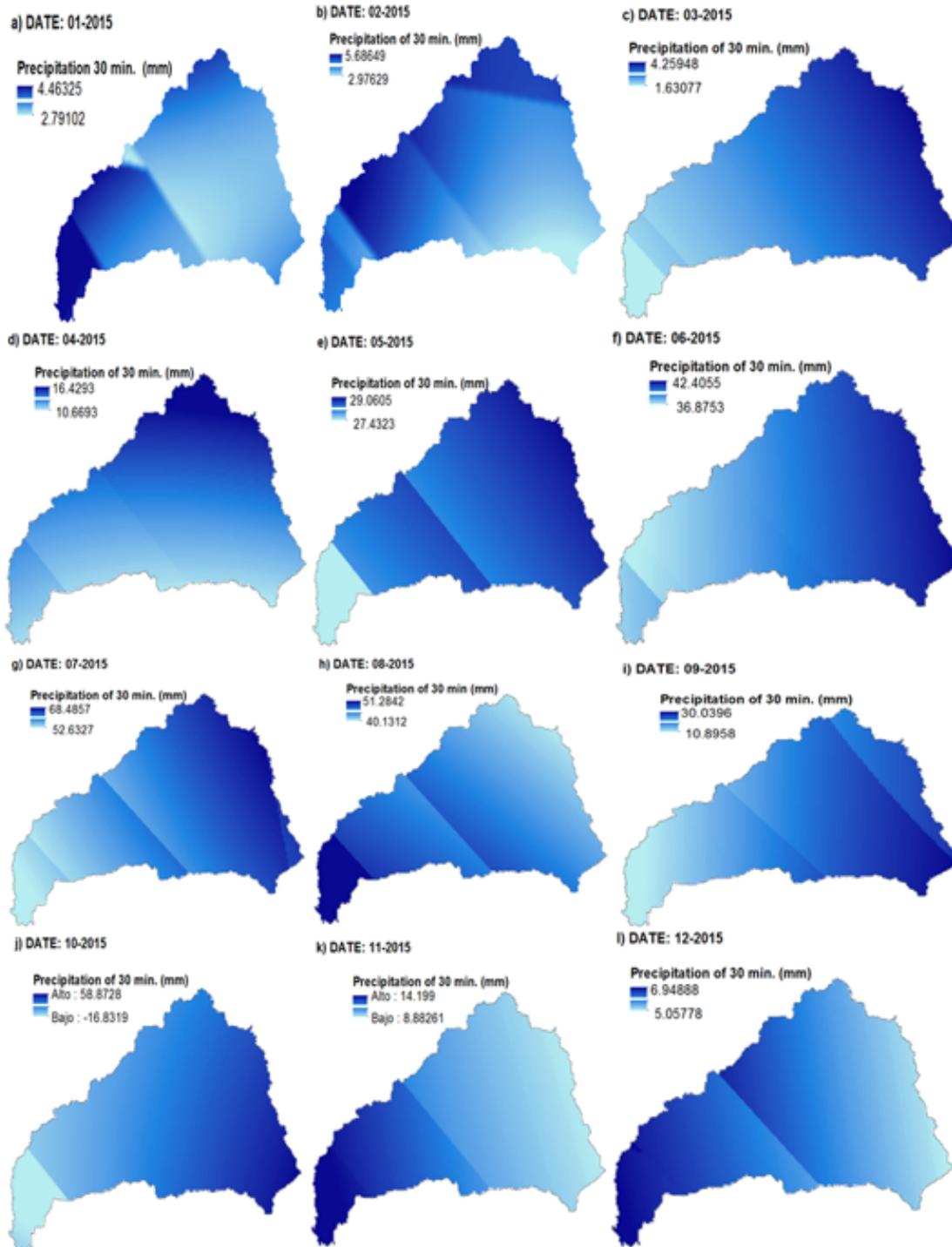


Figura 4: Monthly precipitation measured during 30 minutes corresponding to the Tucutunemo river basin, Aragua State, Venezuela, during 2015

steepness (S) (Figure 6) are calculated using the following equations:

L factor:

It is calculated based on the relationship developed by [1] according the equation (9):

$$L = \left(\frac{\lambda}{22,3} \right)^m \tag{9}$$

Where, λ is field slope length (m); m is the dimensionless exponent that depends on slope,

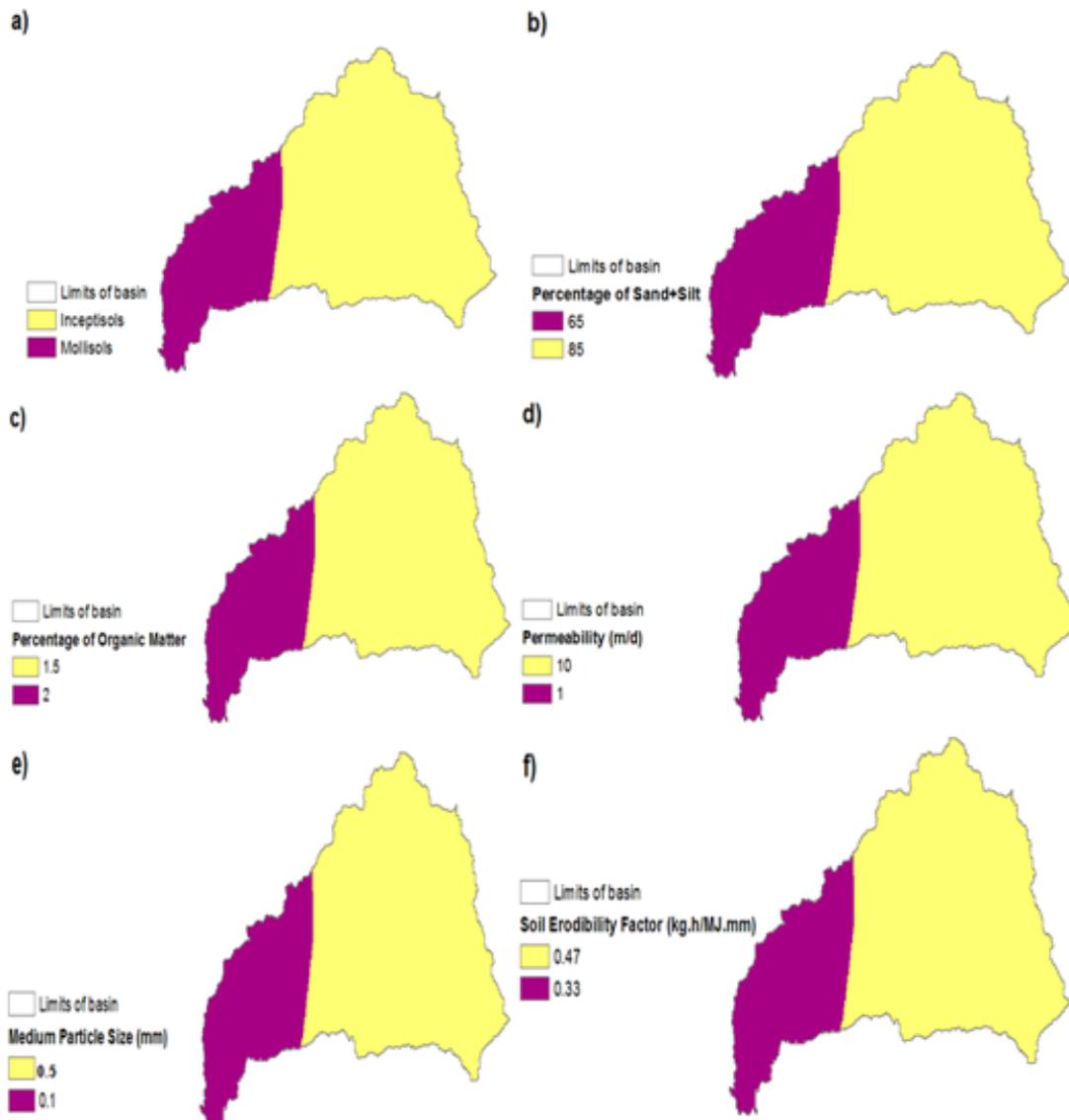


Figura 5: Physical parameters that influence the soil erodibility factor in the Tucutunemo river basin, Aragua state, Venezuela, during 2015.

Tabla 2: Structure code for different types of soil.

| Code | Structure | Particle size (mm) |
|------|---------------------------|--------------------|
| 1 | Very fine granular | <1 |
| 2 | Fine granular | 1-2 |
| 3 | Medium or coarse granular | 2-10 |
| 4 | Blocky, platy or massive | >10 |

Tabla 3: Structure code for different types of soil.

| Code | Description | Permeability rate (mm/h) |
|------|-------------------|--------------------------|
| 1 | Rapid | >130 |
| 2 | Moderate to rapid | 60-130 |
| 3 | Moderate | 20-60 |
| 4 | Slow to Moderate | 5-20 |
| 5 | Slow | 1-5 |
| 6 | Very slow | <1 |

being 0,5 if slope > 5 %, 0,4 if slope < 5 % and > 3 %, 0,3 if slope ≤ 3 % and > 1 %, 0,2 if slope ≤ 1 %. The field slope length (λ) is adjusted in

the map of digital elevation model to grid size of 100 m based on the recommendation made

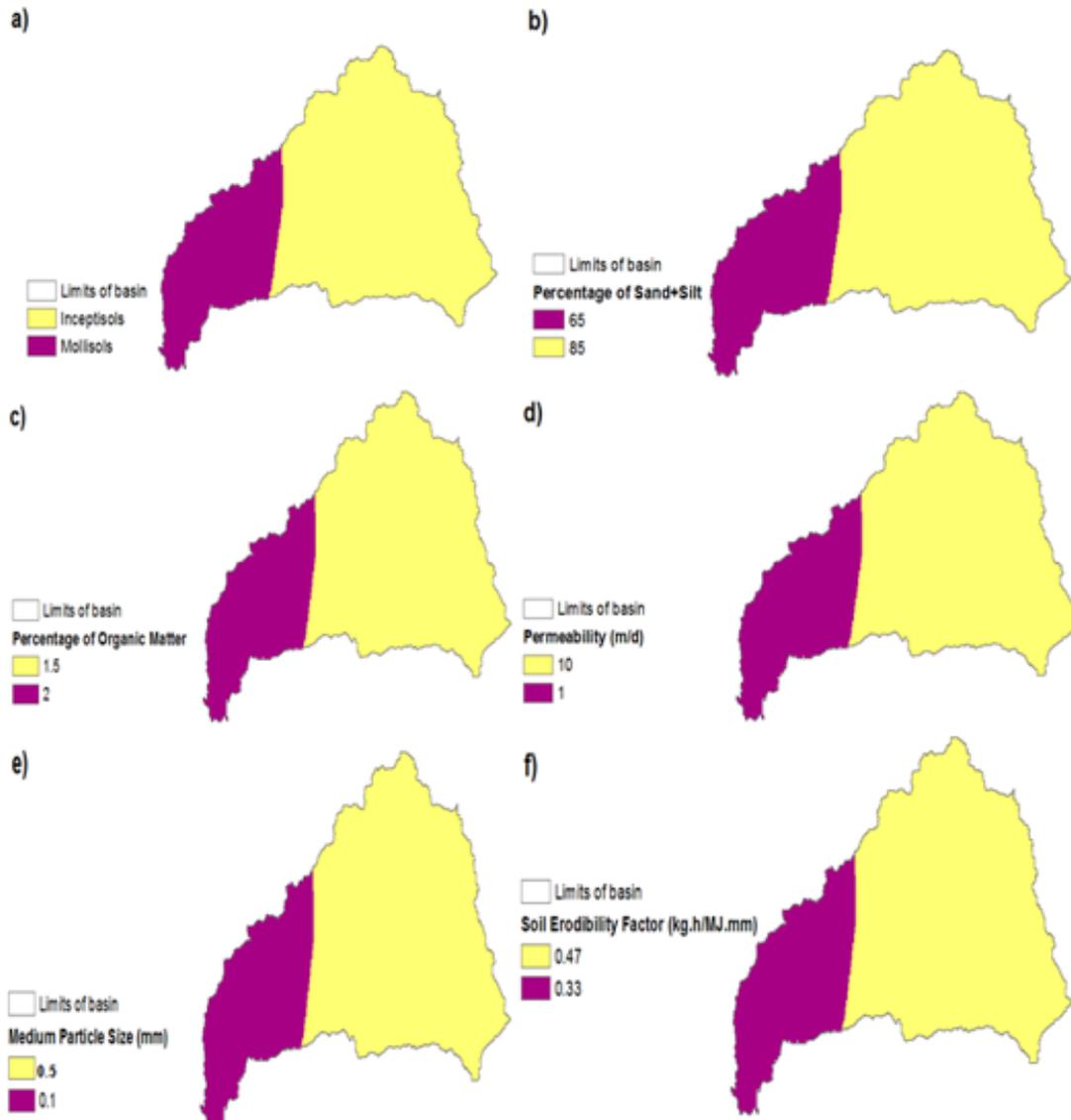


Figura 6: Physical parameters that influence the topographical factor in the Tucutunemo river basin, Aragua state, Venezuela, during 2015: a) Terrain elevation (masl), b) Terrain slope (degree), c) Terrain slope (%), d) topographical factor (LS).

by previous researchers [9]. This adjustment of grid size is achieved by applying a raster resampling technique contained in ArcGIS 10.0, and applied on a digital elevation model (DEM). The gridded data is derived by ASTER (Advance Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) Global DEM as one of the product generated by the METI and NASA agencies (Figure 6a). This DEM is downloaded from the web site: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. The entity identification is ASTG-

DEM2_0N10W068, the acquisition date is 2011/10/17, the resolution is 1 arc-second, the sensor type is GDEM, the ellipsoid is WGS84 and the unit is degree. The map of parameter m is generated by applying the condition on the slope map in the raster calculator tool of ArcGIS 10.0. The percent slope map is obtained from the surface tool in GIS software (Figure 6c), which requires to introduce a digital elevation model (DEM).

S factor:

It is estimated using the equation (10) having length of the slope higher than 4 m [20].

$$\begin{cases} S = 10,8 \cdot \sin(\theta) + 0,03, \text{ for slope} < 9\%, \\ S = 16,8 \cdot \sin(\theta) - 0,05, \text{ for slope} > 9\%. \end{cases} \quad (10)$$

Where, θ represents angle of the slope (degrees). The degree slope map is obtained from the surface tool in GIS software using ASTER GDEM (Figure 6b). The (LS) topographical factor map is obtained by the product of slope length (L) and slope steepness (S), and is shown in the Figure (6d).

d) **Crop management factor (C):** the C factor (Figure 7) depends on the land use and land cover (LULC) shown in Figure 8. The map of land use and land cover is obtained by using the maximum likelihood algorithm into the supervised classification tool into ENVI v.4.7 software applied on the of surface reflectance image of Landsat 8 OLI satellite. The satellite images are acquired from the Landsat Collection Level-2, which is based on the surface reflectance (Figure 9). The images have been downloaded from the web site: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. The selected satellite was Landsat 8 Operational Land Imager (L8 OLI). The scene is identified under the world reference system according to the following row and path: 004, 053, respectively. The criterion for selecting of the Landsat images is the lowest coverage of clouds, aerosols and haze. The clouds and their associated shadows, aerosols and haze obstruct the ground view; causing atypical values in the reflectance observations through time. This can lead to confusion of the land use and land cover (LULC) change detection and the analysis of the reflectance trends (Figure 8).

The dependence of the cloud free images restricts the sampling opportunities to the dry season in the tropics [21]. Images affected by clouds, aerosols and haze often contain a large number of free pixels that can be used. The image represents the LULC condition during the dry and rainy season. In Venezuela, the dry period begins in November or December and

ends in April or May while the rainy season begins in April or May and ends in November or December [22]. The image characteristics acquired according to the satellite are identified as follows (Table 4): a) the scene identification code: LC80040532015008LGN01, b) the acquisition date: 2015-01-08, c) the cloud coverage:23,98, d) the image quality: 9, e) the angle of sun azimuth: 140,83164216 and f) the angle of sun elevation: 48,15079950. The parameters of map projection according to the United State Geological Survey (USGS) are: a) Projection: Universal Transverse Mercator (UTM), b) Datum: World Geodetic System 1984 (WGS84), c) UTM Zone: 19 N and e) Resample Method: Cubic Convolution.

e) **Conservation practice factor (P):** the P factor (Figure 10) depends on the land use and land cover (LULC) shown in Figure 8.

3.2. Estimation of sediment yield

The sediment yield (SY) is estimated using the Langbeing-Schumm model following the method shown in the Figure 2. This method is also used in watersheds that only have information on effective precipitation. The production of sediments per unit area is estimated according the equation (11) [10]:

$$SY = \frac{10P_e^{2,33}}{1 + 0,0007P_e^{3,33}}. \quad (11)$$

Where, q_s (ton/mile²), P_e is the effective annual precipitation in inches, can be calculated according to the method of the United States Soil Conservation Service (US-SCS). The US-SCS method requires information on the classification of soils, land use, treatment or practice and the hydrological condition to determine the Curve Number (CN). From the curve number, the storage of water in the soil (S) and the effective precipitation are estimated. The curve number for the wet soil condition (CN III) is shown in Figure 12. The effective precipitation and the sediment yield in the Tucutunemo river are shown in Figure 13 and Figure 14.

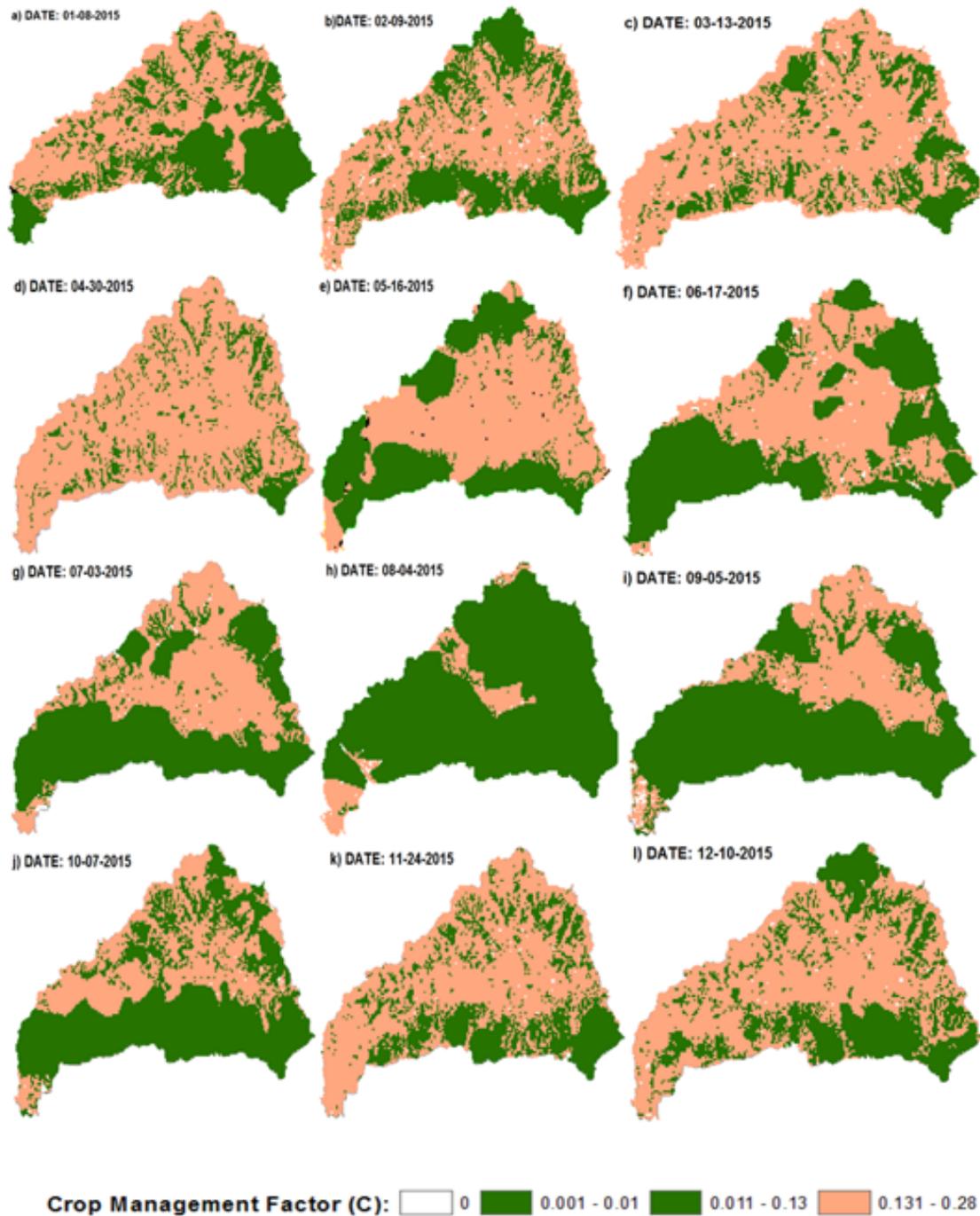


Figura 7: Crop management factor (C) in the Tucutunemo river basin, Aragua state, Venezuela, during 2015.

3.3. Sediment delivery ratio (SDR)

The SDR is a fraction of the eroded soil from the source area transporting to the sink area with surface flow. The equation (12) is a mathematical formulation for estimating SDR, where SY represents the observed sediment yield

at the outlet of the watershed and A represents the estimated average annual soil erosion using USLE for the same watershed [23]:

$$SDR = \frac{SY}{A}. \tag{12}$$

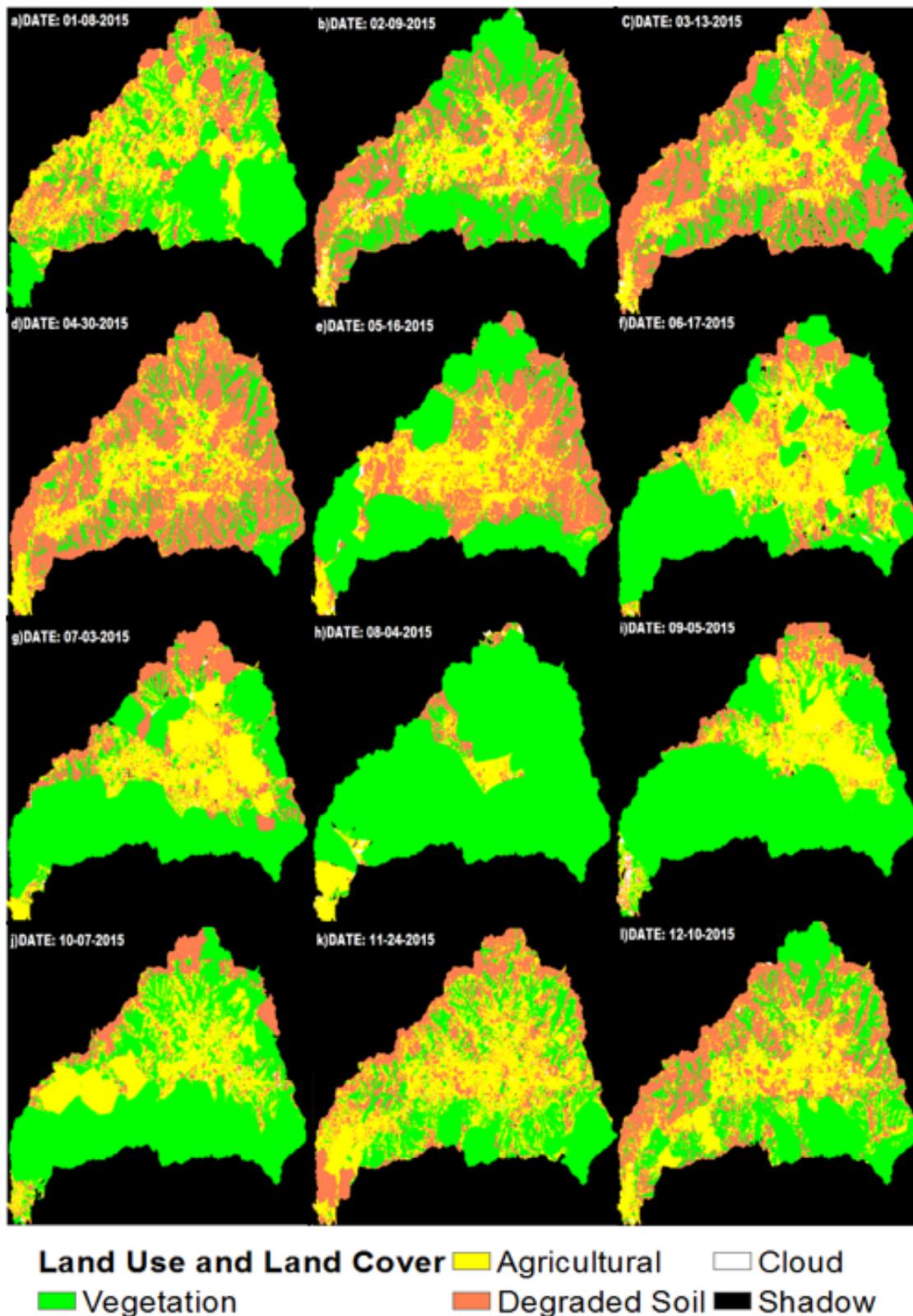


Figura 8: Monthly Land use and land cover corresponding to the Tucutunemo river basin, Aragua State, Venezuela, during 2015

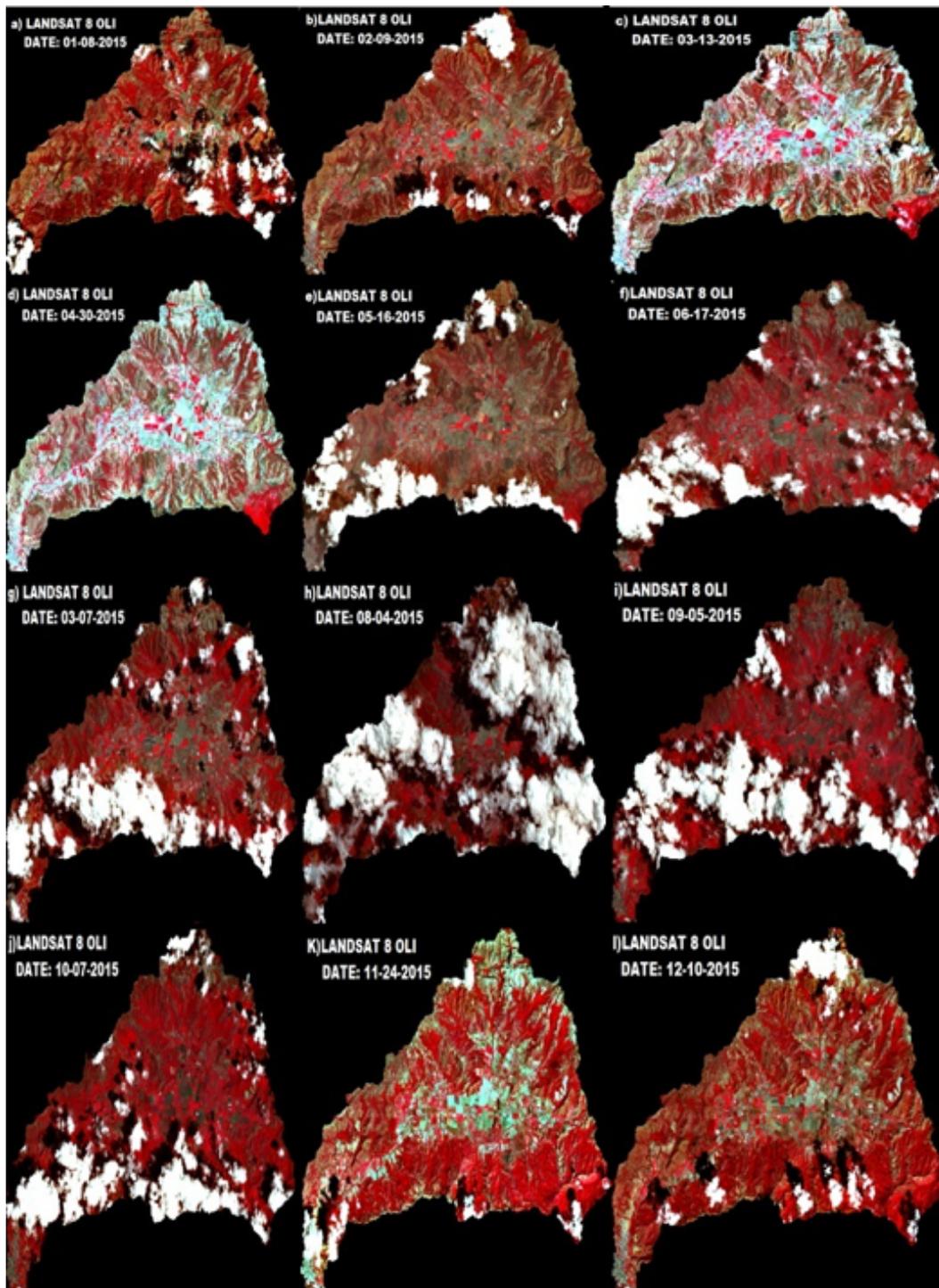


Figura 9: Landsat satellite monthly images corresponding to the Tucutunemo river basin, Aragua State, Venezuela, during 2015.

3.4. Geostatistical modeling of annual soil erosion and annual sediment yield by [11].

The type of statistical spatial prediction model used is the statistical model called Ordinary Kriging (OK), whose technique was developed

Tabla 4: Images of Landsat 8 OLI satellite.

| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
|-----------------------|------------|-------|------|--------------|-------------|
| LC80040532015008LGN01 | 2015-01-08 | 23,98 | 7 | 140,83164216 | 48,15079950 |
| LC80040532015040LGN01 | 2015-02-09 | 15,00 | 8,66 | 130,27865461 | 52,04329093 |
| LC80040532015072LGN01 | 2015-03-13 | 34,78 | 9 | 113,66554010 | 59,30694516 |
| LC80040532015120LGN01 | 2015-04-30 | 7,53 | 9 | 76,58961361 | 65,18667019 |
| LC80040532015136LGN01 | 2015-05-16 | 45,04 | 7 | 66,57532548 | 64,42909368 |
| LC80040532015168LGN01 | 2015-06-17 | 53,52 | 7 | 58,47092498 | 62,01125773 |
| LC80040532015184LGN01 | 2015-07-03 | 25,12 | 9 | 59,91182760 | 61,50572841 |
| LC80040532015216LGN01 | 2015-08-04 | 35,90 | 9 | 71,91635868 | 62,81459372 |
| LC80040532015248LGN01 | 2015-09-05 | 24,10 | 9 | 95,64722616 | 64,90714235 |
| LC80040532015280LGN01 | 2015-10-07 | 14,65 | 9 | 124,07891462 | 62,74979513 |
| LC80040532015328LGN01 | 2015-11-24 | 7,88 | 9 | 144,78160997 | 52,42420107 |
| LC80040532015344LGN01 | 2015-12-10 | 12,71 | 9 | 145,27981631 | 49,69824493 |

(1) the scene identification code, (2) the acquisition date, (3) the cloud coverage, (4) the image quality, (5) the angle of solar azimuth and (6) the angle of solar zenith.

4. Results

4.1. Results of estimation of the soil erosion

The results of monthly soil erosion maps and its factors during 2015 are shown in Figures 3 to 11.

a) Results of rainfall erosivity factor (R) (Figure 3), the main variable to estimate the rainfall erosivity factor is the precipitation of 30 minutes. The results for the precipitation of 30 minutes from January to December 2015 are shown in Figure 4. The precipitation of 30 minutes in the dry months is similar varying between 1,63 mm and 14,19 mm (Figures 4a, 4b, 4c, 4k and 4l). The precipitation of 30 minutes varies between 10,67 and 68 mm in the rainy months (Figures 4d-4h). The statistical spatial prediction model (SSPM) of monthly precipitation is the J-Bessel function. This function is fitted to the observed precipitation with a gradient that varies between 0,4 and 0,75 (Table 5). The equation is identified by the following coefficients in a general structure: $a \cdot \text{Nugget} + b \cdot (\text{J-Bessel}(c, d))$. The values of coefficients vary as follows (Table 5): a: between 0 and 119,36, b: between 14,152 and 492,47, c: between 31797 and 558150, d: between 0,01 and 1,9944. The coefficient a is associated with the no spatial correlation. The coefficient b is associated with $C_0 + C_1$ term, which is the sill variation. The coefficient c represents the maximum distance between stations of neighbor precipitation observations.

The coefficient d represents the parameter of the J-Bessel function. There is pattern in the SPPMs for the dry season, associated with the first months of the each year. In all cases, the semivariances are smaller at shorter distance and then they stabilize at some distance. The results for the rainfall erosivity factor (R) from January to December 2015 are shown in Figure 3. The rainfall erosivity factor in the dry months varies between 0,93 and 19,79 MJ.mm/ha.h (Figures 3a, 3b, 3c, 3k and 3l). The R factor varies between 15,46 and 447,43 MJ-mm/ha-h in the rainy months (Figures 3d-3h). During the dry season, the precipitation of 30 minutes and R factor are higher in the middle and low regions of Tucutunemo basin.

During the rainy season, the precipitation of 30 minutes and R factor are higher in the high and middle regions of Tucutunemo basin.

b) Results of erodibility factor (K) the erodibility factor is estimated by physical parameters which are indicated in the Figure 5. The soil type consists of two classes (Figure 5a): inceptisols and mollisols. Inceptisols comprise the most part of area of Tucutunemo river basin reaching a 74 % of total area, from the high to the middle part of basin. Inceptisols and Mollisols are a soil order in USDA soil taxonomy. According to the [15], the central concept of Inceptisols is that of soils of humid and subhumid regions that have altered horizons that have lost bases or iron and aluminum but retain some weatherable

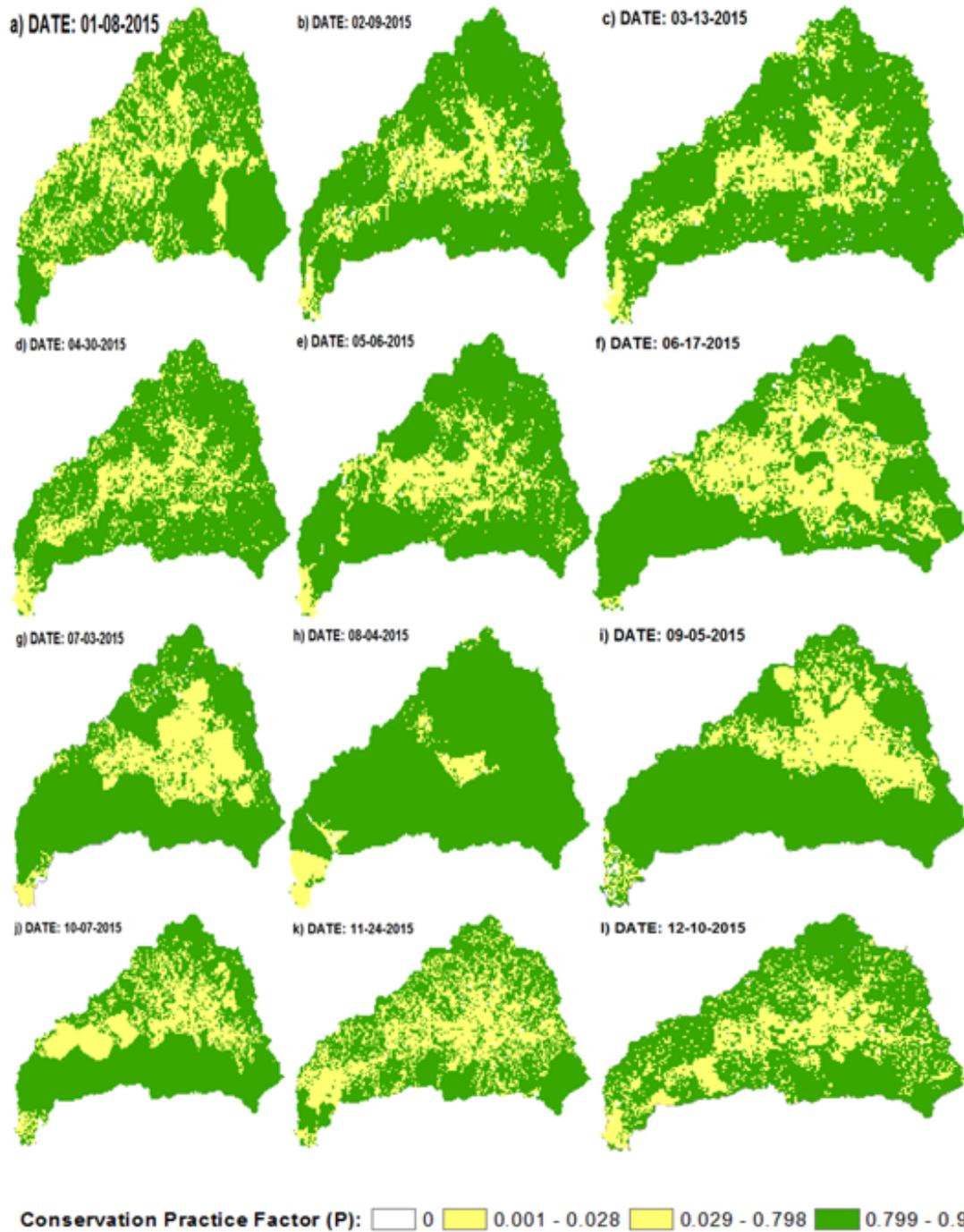


Figura 10: Conservation practice factor (P) in the Tucutunemo river basin, Aragua state, Venezuela, during 2015.

minerals. They do not have an illuvial horizon enriched with either silicate clay or with an amorphous mixture of aluminum and organic carbon. Mollisols comprise 36 % of total area of Tucutunemo river basin, in the low part

of basin, near to the Valencia Lake. This is the zone where it is developed the agricultural activity. According to the [15], the central concept of Mollisols is that of soils that have a dark colored surface horizon and are base rich.

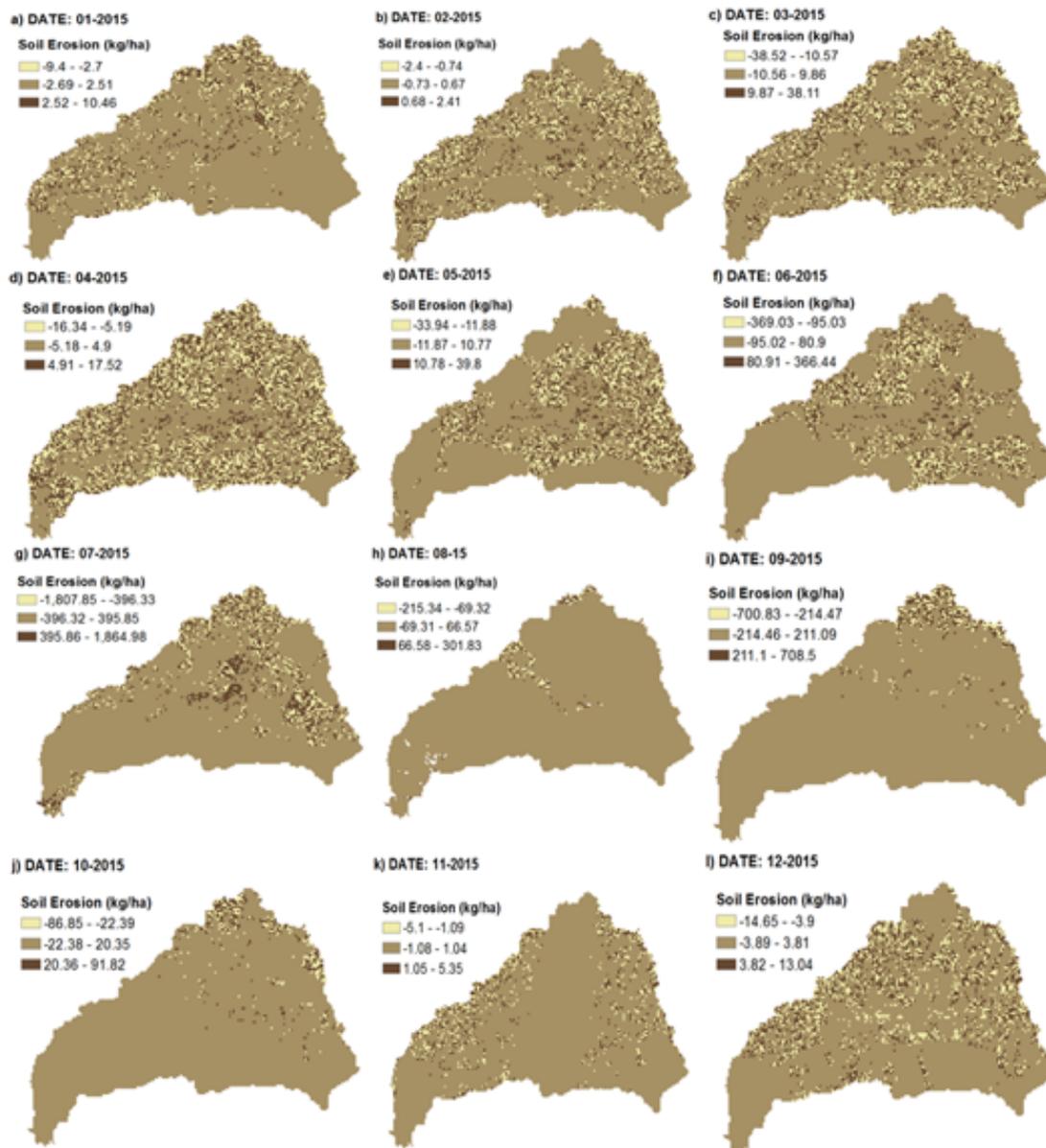


Figura 11: Soil erosion (A) in the Tucutunemo river basin, Aragua state, Venezuela, during 2015.

Nearly all have a mollic epipedon. Many also have an argillic or natric horizon or a calcic horizon. A few have an albic horizon. Some also have a duripan or a petrocalcic horizon. The Inceptisols and Mollisols contain 85% and 65% of silt and sand, 1,5 and 2% of organic matter, 10 and 1 m/d of permeability, 0,5 and 0,1 of medium particle size, respectively. These physical parameters allow to estimate the erodibility factor for a Inceptisol and Mollisol soil as 0,47 and 0,33 kg·h/MJ·mm.

c) Results of topographical factor (LS): The

topographical factor is represented by the terrain elevation and the terrain slope. The spatial distribution of the terrain elevations, slopes, and topographical factor varies between (Figure 6a, 6b, 6c): 1) 503 and 704 masl, 0 and 12%, -35 and 28,3 (38,65 km², 32,5%), 2) 704 and 902 masl, 12 and 25%, -18,3 and 2,73 (38,65 km², 32,5%), 3) 902 and 1124 masl, 26 and 42%, 2,74 and 21,85 (32,93 km², 27,7%), 4) 1124 and 1687 masl, 42 and 94%, 21,86 and 45,42 (8,44 km², 7,09%). The agricultural activity is developed under the first condition.

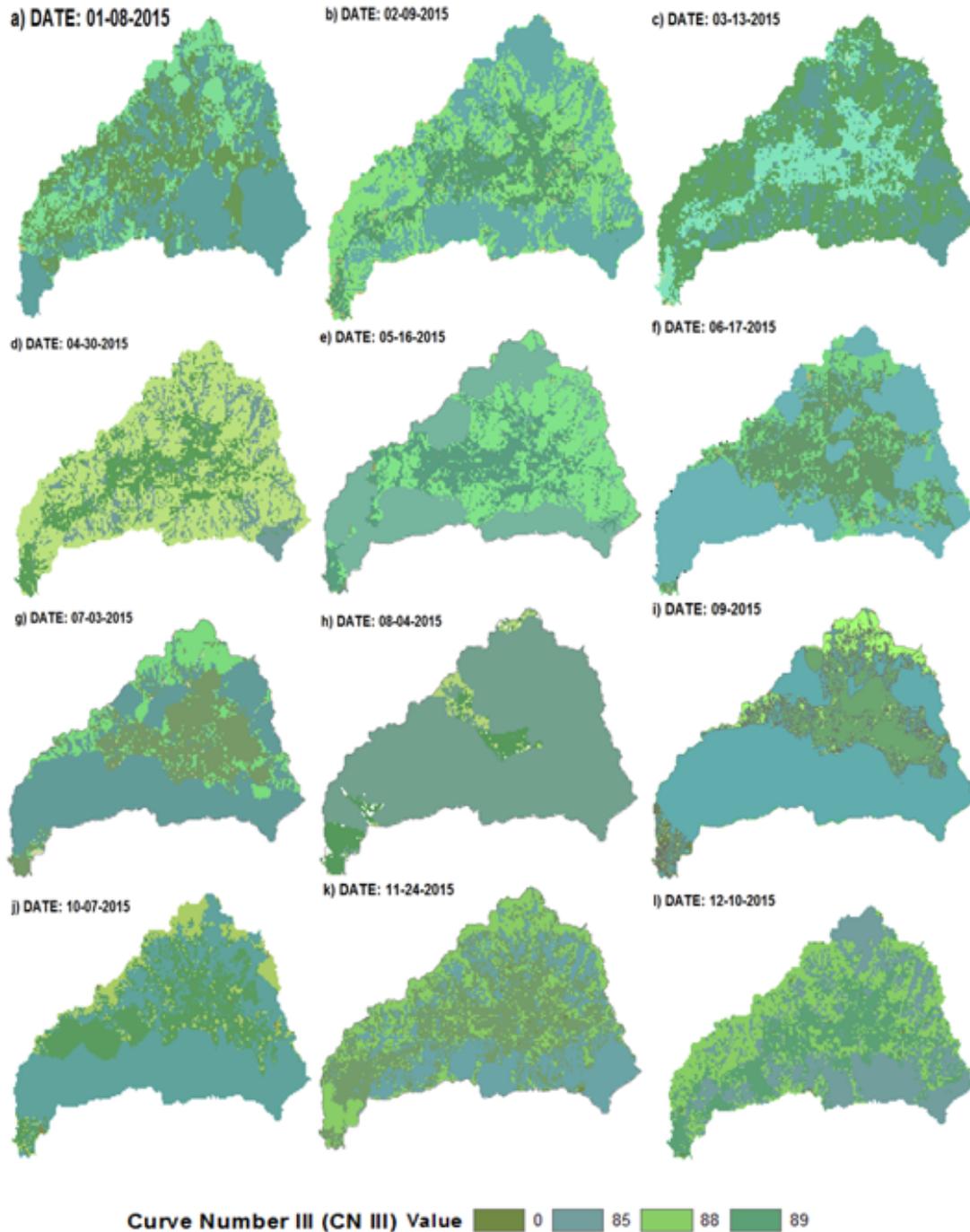


Figura 12: Curve Number (CN III) in the Tucutunemo river basin, Aragua state, Venezuela, during 2015.

d) Results of crop management factor (C) the results of C factor require los results obtained on the land cover and land use derived from Landsat 8 OLI satellite images. These images are shown in Figure 7, where the Tucutunemo river basin is represented from January to December for 2015. The images are shown in

false color using the combination of the spectral bands: 5, 4 and 3. The red color is representing the vegetation coverage, which is the most part of the area. Toward the central region of the basin in brightness tone is observed the agricultural uses, which represents the main activity in the Tucutunemo river basin. The

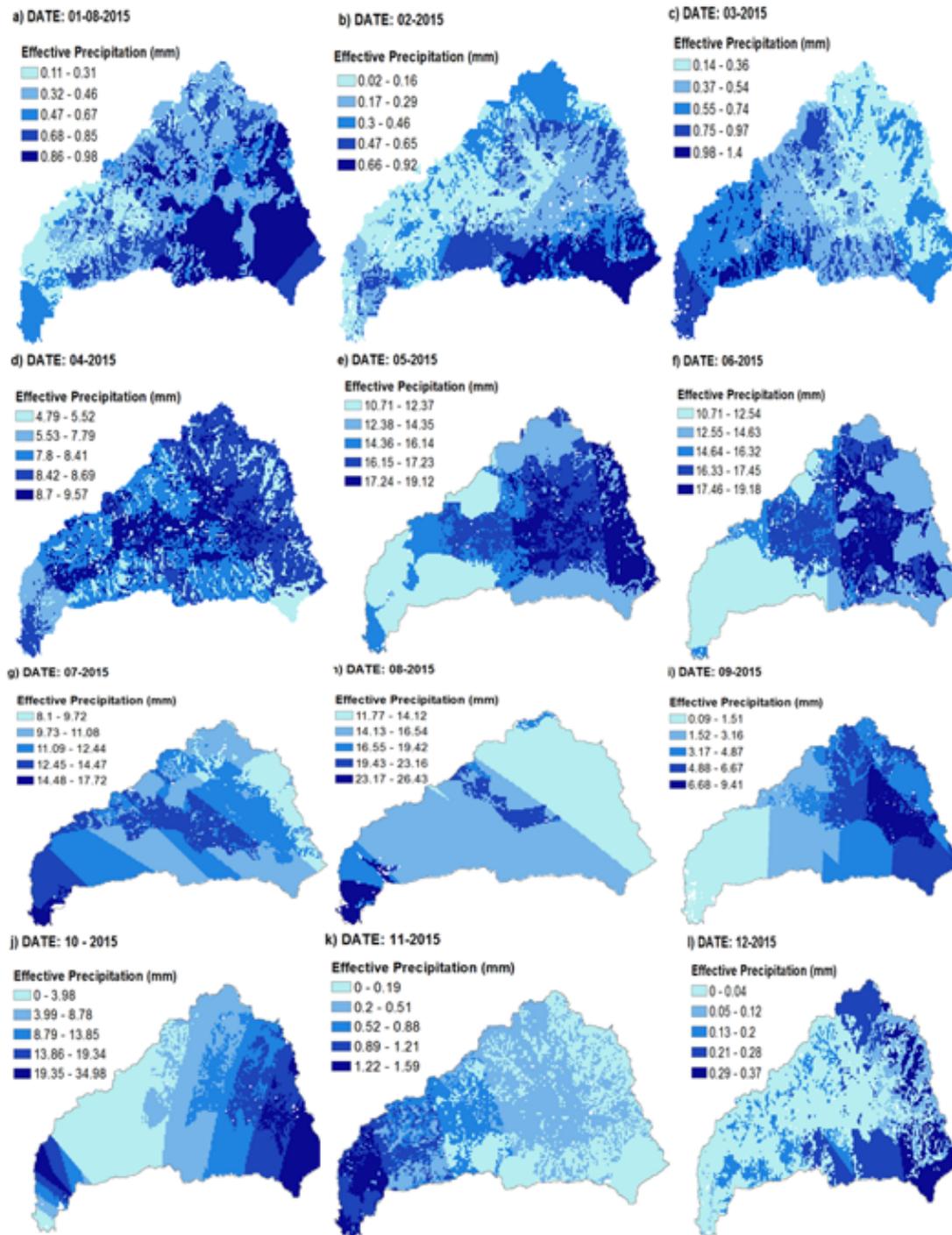


Figura 13: Effective precipitation (mm) in the Tucutunemo river basin, Aragua state, Venezuela, during 2015.

classified images are shown in Figure 8, where the land use and land cover (LULC) detected are five, the percent spatial distributions of LULC and C factor for April 2015 are the following (Figure 8d): 1) vegetation (18,92 km², 16 %,

0,01), 2) agricultural (30,08 km², 25 %, 0,13), 3) degraded soil (69,95 km², 59 %, 0,28), 4) clouds (0 km²) and 5) shadows (0 km²). The percent spatial distribution for August 2015 is the following (Figure 8h): 1) vegetation (106,93

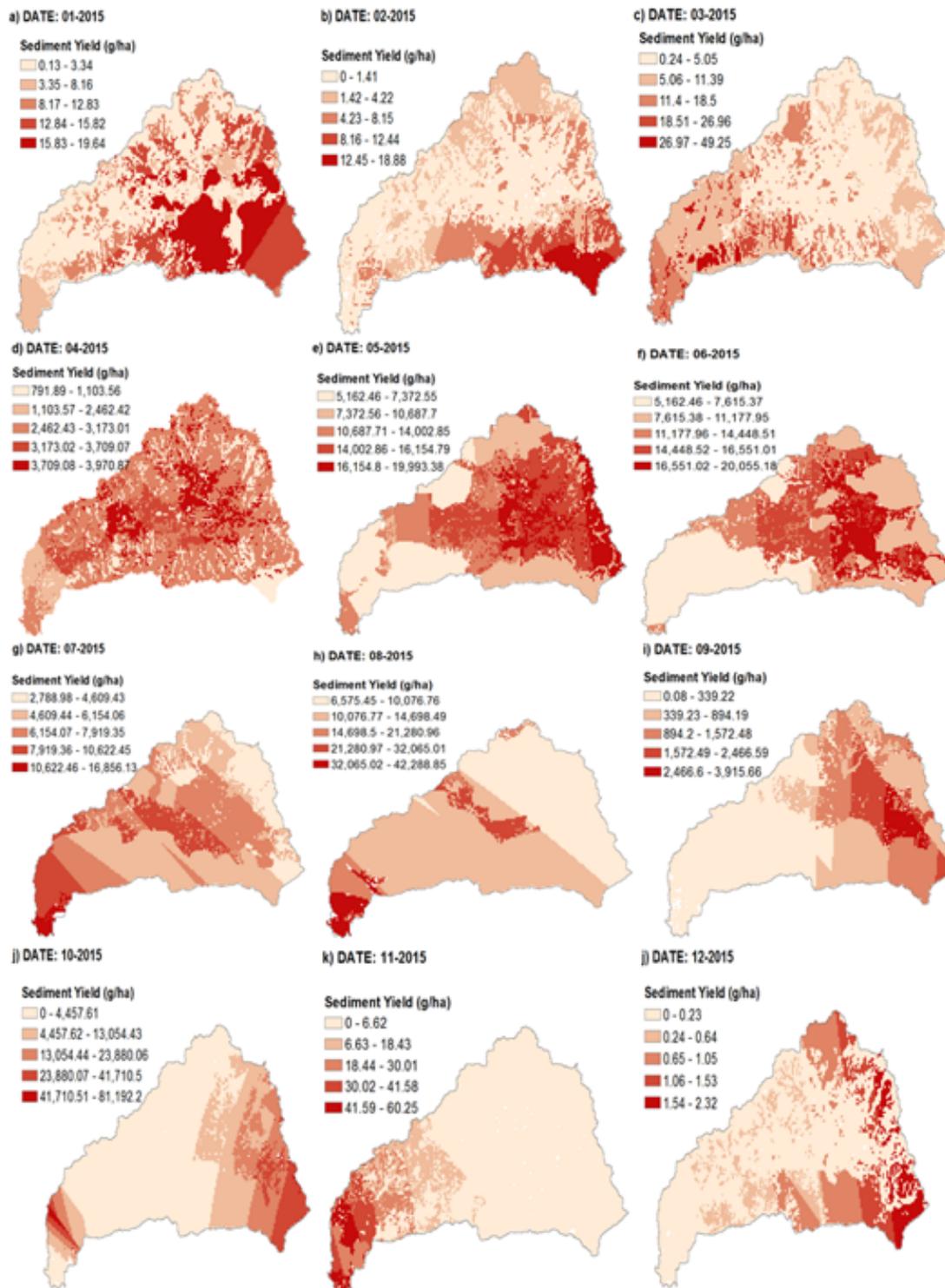


Figura 14: Sediment yield (g/ha) in the Tucutunemo river basin, Aragua state, Venezuela, during 2015.

km², 90,3 %, 0,01), 2) agricultural (8,18 km², 6,9 %, 0,13), 3) degraded soil (3,3 km², 2,78 %, 0,28), 4) clouds (0 km²) and 5) shadows (0 km²).

results of P factor require los results obtained on the land cover and land use derived from Landsat 8 OLI satellite images (Figure 7). The classified images are shown in Figure 8, where

e) Results of conservation practice factor (P) the

Tabla 5: Results of modeling of monthly precipitation statistical spatial prediction represented by the semivariances for the time series of images between 1986 and 1991 in the Tucutunemo river basin.

| Date of Image | SSPM | Krigging Ordinario |
|---------------|--|--|
| 2015-01-08 | PC1 Semivariance SSPM | 11,125·Nugget+28,328·J-Bessel(34977, 0,01) |
| | Predicted and Measured Regression function | 0,389619308061585·x+4,12571115118064 |
| | Standardized Error Regression Function | -0,101338895899458·x+0,700652314446477 |
| | Samples | 23 |
| 2015-02-09 | PC1 Semivariance SSPM | 3,4597·Nugget+14,152·J-Bessel(31797, 0,70098) |
| | Predicted and Measured Regression function | 0,421161923907274·x+3,1111196201193 |
| | Standardized Error Regression Function | -0,132791502641185·x+0,816515041257734 |
| | Samples | 23 |
| 2015-03-13 | PC1 Semivariance SSPM | 10,456·Nugget+399,95·J-Bessel(499390, 10) |
| | Predicted and Measured Regression function | 0,666064660774914·x+3,79913225011893 |
| | Error Regression Function | -0,333935339225086·x+3,79913225011894 |
| | Standardized Error Regression Function | -0,0533789679669054·x+0,680077588925542 |
| Samples | 29 | |
| 2015-04-30 | PC1 Semivariance SSPM | 124,86·Nugget+148,6·J-Bessel(93671, 0,01) |
| | Predicted and Measured Regression function | 0,513132251301728·x+11,6236130675131 |
| | Standardized Error Regression Function | -0,0363163911311564·x+0,710722861397881 |
| | Samples | 29 |
| 2015-05-16 | PC1 Semivariance SSPM | 97,385·Nugget+203,17·J-Bessel(558150, 1,0507) |
| | PMRF | 0,526846690461996·x+9,823435814398 |
| | SERF | -0,0433741481861566·x+0,890535529155565 |
| | Samples | 22 |
| 2015-06-17 | PC1 Semivariance SSPM | 119,36·Nugget+404,27·J-Bessel(220610, 1,4525) |
| | PMRF | 0,549642947939819·x+15,5812696221036 |
| | SERF | -0,0335424473779188·x+0,959696463418054 |
| | Samples | 26 |
| 2015-07-03 | PC1 Semivariance SSPM | 15,255·Nugget+492,47·J-Bessel(143030, 0,01) |
| | Predicted and Measured Regression function | 0,751339936706698·x+12,8349520739822 |
| | Error Regression Function | -0,248660063293302·x+12,8349520739822 |
| | Standardized Error Regression Function | -0,03020683581146·x+1,48876217913642 |
| Samples | 23 | |
| 2015-08-04 | PC1 Semivariance SSPM | 104,77·Nugget+380,04·J-Bessel(153650, 0,01) |
| | Predicted and Measured Regression function | 0,424297370730271·x+15,3072962029994 |
| | Standardized Error Regression Function | -0,0311051114369269·x+0,741337510627896 |
| | Samples | 23 |
| 2015-09-05 | PC1 Semivariance SSPM | 89,603·Nugget+330·J-Bessel(69634, 0,01) |
| | Predicted and Measured Regression function | 0,418660547119316·x+10,5186814140897 |
| | Error Regression Function | -0,581339452880684·x+10,5186814140897 |
| | Standardized Error Regression Function | -0,034164870671135·x+0,535457680012268 |
| Samples | 21 | |
| 2015-10-07 | PC1 Semivariance SSPM | 0·Nugget+472,76·J-Bessel(86277, 0,01) |
| | Predicted and Measured Regression function | 0,427485456646955·x+10,5491971049236 |
| | Standardized Error Regression Function | -0,109721002176278·x+2,02012098973276 |
| | Samples | 25 |
| 2015-11-24 | PC1 Semivariance SSPM | 131,07·Nugget+403,61·J-Bessel(275100, 0,79683) |
| | Predicted and Measured Regression function | 0,432075908929093·x+10,6186075263914 |
| | Error Regression Function | -0,567924091070908·x+10,6186075263914 |
| | Standardized Error Regression Function | -0,0486290470209368·x+0,821683206330385 |
| Samples | 28 | |
| 2015-12-10 | PC1 Semivariance SSPM | 76,374·Nugget+254,73·J-Bessel(385490, 1,9944) |
| | Predicted and Measured Regression function | 0,218247072662198·x+7,82057339541776 |
| | Standardized Error Regression Function | -0,0492161823027591·x+0,58523883407058 |
| | Samples | 26 |

the land use and land cover (LULC) detected are five, the percent spatial distributions of LULC and P factor for April 2015 are the following

(Figure 8d): 1) vegetation (18,92 km², 16 %, 0,01), 2) agricultural (30,08 km², 25 %, 0,13), 3) degraded soil (69,95 km², 59 %, 0,28), 4)

clouds (0 km²) and 5) shadows (0 km²). The percent spatial distribution for August 2015 is the following (Figure 8h): 1) vegetation (106,93 km², 90,3 %, 0,8), 2) agricultural (8,18 km², 6,9 %, 0,03), 3) degraded soil (3,3 km², 2,78 %, 0,9), 4) clouds (0 km²) and 5) shadows (0 km²).

4.2. Results of estimation of the sediment yield (SY)

The results of monthly sediment yield maps during 2015 are obtained using equation (12). The results for the two factors involved in equation (12) are described for each one of these: a) Curve number (CN); and b) effective precipitation (Pe). The curve number used corresponds to the soil wet condition. The curve number varies between 85 and 89. This range of CN is small because the Tucutunemo river basin is of rural type. The curve number of 85 is associated to a good cover forest combined with a soil type with moderately high runoff potential. This curve number has the greatest occurrence because of the vegetation comprises the most part of terrain coverage in the Tucutunemo river basin, b) the effective precipitation (Pe) is influenced by the dry and rainy seasons occurred for 2015. The higher effective precipitation varies in the range between 19 y 34 mm for October 2015, which is located between the north and middle regions of the Tucutunemo river basin. During the dry season, the effective precipitation varies between 0 and 1,59 mm. During the rainy season, the effective precipitation varies between 9,57 and 34 mm. In whole year 2015, the effective precipitation is higher during the rainy season by comparing to the dry season, occurring in the agricultural plots and in the mountainous area, c) the sediment yield (SY) is influenced by the dry and rainy seasons occurred for 2015. The higher sediment yield varies in the range between 41710 and 81192 g/ha for October 2015, which is located between the north and middle regions of the Tucutunemo river basin. During the dry season, the sediment yield varies between 0 and 60,25 g/ha. During the rainy season, the sediment yield varies between 20055 and 81192 g/ha. In whole year 2015, the sediment yield is higher during the rainy season by comparing to the dry season, occurring

in the agricultural plots and in the mountainous area.

4.3. Results of sediment delivery ratio (SDR)

The results of sediment delivery ratio (SDR) are shown in Figure 15. The sediment delivery ratio varies according to the dry or rainy season. In general, SDR varies between 0 and 1 in whole of year. However, SDR takes punctual values > 1 indicating accumulation areas of sediment. During the rainy season, it would be necessary to expand the number of classes to a number greater than ten to show the specific areas of sediment accumulation (Figures 15d-f).

5. Discussion

The soil erosion depends on six physical factors. The erosivity factor (R) is estimated from the kinetic energy for a precipitation intensity of 30 minutes. The precipitations of 30 minutes during the dry season are lower than 35 mm [10], corresponding to a type of precipitation that cause a dry condition of soil while the precipitation in the rainy season varies mainly between 35 and 50 mm, leaving a moderately high humidity in the soil. The precipitation events greater than 50 mm occur with lower frequency, three events were record in the months of July, August and October for 2015. These precipitation events transfer water to the matrix of the soil surface to reach a saturated condition in the porous spaces. In general, the precipitation of 30 minutes detaches the greatest soil amount in the rainy season. The erodibility factor (K) is greater in the inceptisols with respect to the mollisols. The structure of inceptisols having high sand and silt contents allows that the impact of the water drop detaches greater amount of soil particles by comparing with the mollisols in the middle and low part of Tucutunemo river basin. The slope length (L) factor is defined using a field slope length of 100 m, which is one dimension associated to the average length of the furrows in the agricultural plots [24]. The slope steepness (S) influences the negative or positive sign as an indicator of the direction of the water runoff on the terrain. The direction change direction is

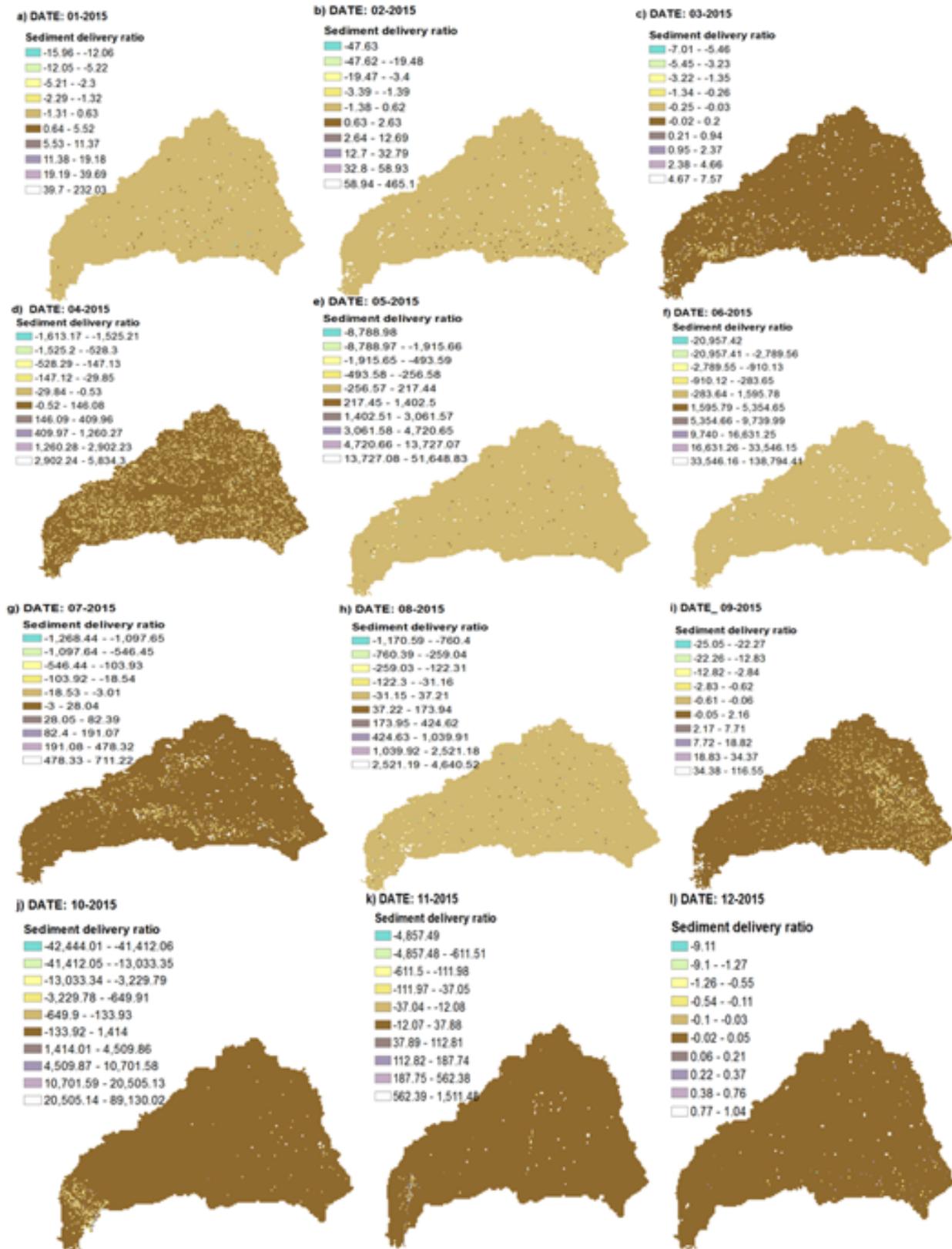


Figura 15: Monthly sediment delivery ratio (SDR) in the Tucutunemo river basin, Aragua state, Venezuela, during 2015.

significant in the mountains area of the Tucutunemo river basin. The crop management factor (C) and conservation practice (P) are dependent of the land use and land cover, the highest values are found where the agricultural plots are located in the Tucutunemo river basin, occurring to the middle and low part of basin. The soil erosion and sediment yield in the Tucutunemo river basin reach high values toward the high and middle part of the basin reducing the magnitude toward the low part. In addition, the magnitudes of the soil erosion and sediment yield are influenced by the dry and rainy seasons. The applied method for estimating the spatial distribution of soil erosion, sediment yield and SDR can detect the specific areas of sediment accumulation into the basin.

6. Conclusions

The Tucutunemo river basin is a rural area where the main land use and land cover are agricultural activities, vegetation and degraded soil. The agricultural activities are developed in the middle part of basin. By this study, it has been found that the soil erosion and yield sediment occur in the high and middle part of the basin. According the location, the precipitation of 30 minutes occurs in a magnitude from high moderately to high during the rainy season. The precipitation causes the greatest amount of soil erosion and sediment yield in the high and middle part of the basin where the soil is the inceptisols type, while these phenomenon are lower in the low part of basin where the mollisols is the soil type, which it is cohesive soil because of the clay contents. The spatial distribution of soil erosion and sediment yield leads to detect the localization of the specific areas of sediment accumulation into the basin.

7. Referencias

- [1] W.H. Wischmeier and D.D. Smith. Predicting Rainfall Erosion Losses. In *Agricultural Research Service Handbook 537*. US Department of Agriculture, 1978.
- [2] K.G. Renard, G.R. Foster, G.A. Weesies, and J.P. Porter. RUSLE: revised universal soil loss equation. *Journal Soil and Water Conservation*, 46(1):30–33, 1991.
- [3] J.R. Williams. The physical components of the EPIC model. In Sa. El-Swaify, WC. Moldenhauer, and A. Lo, editors, *Soil Erosion and Conservation*, pages 272–284. Ankeny, IA, 1985.
- [4] D.B. Beasley, L.F. Huggins, and A. Monke. ANSWERS: A model for watershed planning. *Transactions of the ASAE*, 23(4):938–0944, 1980.
- [5] D.C. Flanagan, J.C. Ascough, M.A. Nearing, and J.M. Laflen. The Water Erosion Prediction Project (WEPP) model. In RS. Harmon and WW. Doe, editors, *Landscape Erosion and Evolution Modelling*, pages 145–199. Kluwer Academic, New York, 2001.
- [6] R.P.C. Morgan, J.N. Quinton, R.E. Smith, G. Govers, J.W.A. Poesen, K. Auerswald, G. Chisci, D. Torri, and M.E. Styczen. The European soil erosion model (EUROSEM): a process-based approach for predicting soil loss from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 23:527–544, 1998.
- [7] N.S. Bulygina, M.A. Nearing, J.J. Stone, and M.H. Nichols. DWEPP: a dynamic soil erosion model based on WEPP source terms. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 32(7):998–1012, 2007.
- [8] H.S. Gelagay and A.S. Minale. Soil loss estimation using GIS and Remote sensing techniques: A case of Koga watershed, Northwestern Ethiopia. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(2):126–136, 2016.
- [9] G. Singh and R.K. Panda. Grid-cell based assessment of soil erosion potential for identification of critical erosion prone areas using USLE, GIS and remote sensing: A case study in the Kapgari watershed, India. *International Soil and Water Conservation Research*, 5(3):202–211, 2017.
- [10] E. Guevara and H. Cartaya. *Hidrología ambiental*. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2004.
- [11] D.G. Krige. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 52(6):119–139, 10520/AJA0038223X_4792, 1951.
- [12] G. Matheron. Principles of geostatistics, economic geology. *Economic Geology*, 58(8):1246–1266, 1963.
- [13] E.H. Isaaks and M.R. Srivastava. Applied geostatistics. Technical Report No. 551.72, ISA, 1989.
- [14] G.R. Foster, D.K. McCool, K.G. Renard, and W.C. Moldenhauer. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 36(6):355–359, 1981.
- [15] R. Lal, J.M. Kimble, and T. Livari. *Soil degradation in the United States: extent, severity, and trends*. CRC Press, 2003.
- [16] N. Parsamanesh, M. Zarrinkafsh, S.S. Shahoei, and W. Weisany. Evaluation of Distribution Functions

- of Organic Carbon with Soil Depth in Vertisols and Inceptisols. *Bull. Env. Pharmacol. Life Sci*, 2(12):177–183, 2013.
- [17] N. Voncir, Z.T. Kparmwang, A.A. Amba, and A.M. Hassan. Variation in Morphological Properties and Particle Size Distribution of Alfisols, Inceptisols and Entisols in the Gubi Soil Series, Bauchi, Nigeria. *Journal of Applied Sciences*, 6(13):2821–2824, 2006.
- [18] J.M. Bremner and D.A. Genrich. Characterisation of the sand, silt, and clay fractions of some Mollisols. In *Soil Colloids and their Associations in Aggregates*, pages 423–438. Springer, Boston, MA, 1990.
- [19] P.J. Ghiberto, S. Imhoff, P.L. Libardi, Á.P.D. Silva, C.A. Tormena, and M.Á. Pilatti. Soil physical quality of Mollisols quantified by a global index. *Scientia Agricola*, 72(2):167–174, 2015.
- [20] T.W. Lambe and R.V. Whitman. *Soil mechanics SI version*. John Wiley & Sons, 2008.
- [21] E.E. Sano, L.G. Ferreira, G.P. Asner, and E.T. Steinke. Spatial and temporal probabilities of obtaining cloud-free Landsat images over the Brazilian tropical savanna. *International Journal of Remote Sensing*, 28(12):2739–2752, 2007.
- [22] L.E. Ramirez. Development of a Procedure for Determining Spacial and Time Variations of Precipitation in Venezuela. *Reports. Paper 145.*, 1971.
- [23] D.E. Walling. The sediment delivery problem. *Journal of hydrology*, 65(1-3):209–237, 1983.
- [24] S.K. Jain, S. Kumar, and J. Varghese. Estimation of soil erosion for a Himalayan watershed using GIS technique. *Water Resources Management*, 15(1):41–54, 2001.

Evaluation of the quality and water flow of a hydrographic basin located in a national park

Elianny Balza^a, María Zapata^a, Milagros Jiménez-Noda^{*,b}, Lisbeth Manganiello^b, Cristóbal Vega^c, Rosalyn Cova^b, Jesús Moreno^d

^aDepartamento de Ingeniería Química, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

^bCentro de Investigaciones Químicas (CIQ), Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

^cInstituto de Matemática y Cálculo Aplicado, IMYCA, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

^dInstituto Nacional de Parques - INPARQUES, Valencia, Venezuela.

Abstract.- The periodic control of the quality of the natural aquifer bodies is of vital importance, since they are preserved as reservoirs of water destined for human consumption. The hydrographic basin of the Caribbean Sea is made up of a group of sub-basins, including: Miquija-Goaigoaza, located on the northern slope of the San Esteban National Park (PNSE). The National Institute of Parks (INPARQUES) has observed alterations in the ecosystem, deterioration and variation of flow of these water resources. That is why physicochemical and microbiological parameters were determined at the sampling points, comparing these values obtained with the permissible limits of Decree 883. The results obtained show non-compliance with the norm in the following parameters, dissolved oxygen, total and fecal coliforms. The estimation of the monthly flows of both rivers under study was carried out by designing a mathematical model, applying the Box–Jenkins methodology supported in historical and current flows. Finally, the present work responds to the evaluation of the quality and the flow of these rivers, through the analysis and graphic representation, evidencing its deterioration as it progresses in its path, the flow having a non-stationary behavior.

Keywords: rivers; quality parameters; study of flows; mathematical model.

Evaluación de la calidad y el caudal de aguas de una subcuenca hidrográfica ubicada en un parque nacional

Resumen.- El control periódico de la calidad de los cuerpos acuíferos naturales es de vital importancia, ya que se preservan como reservorios de aguas destinadas al consumo humano. La Cuenca hidrográfica del Mar Caribe está conformada por un grupo de subcuencas, entre ellas: Miquija–Goaigoaza, ubicada en la vertiente norte del Parque Nacional San Esteban (PNSE). El Instituto Nacional de Parques (INPARQUES) ha observado alteraciones en el ecosistema, deterioro y variación de caudal de estos recursos hídricos. Es por eso que se determinaron parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en los puntos de muestreos, comparando estos valores obtenidos con los límites permisibles del Decreto 883. Los resultados obtenidos muestran incumplimiento de la norma en los siguientes parámetros, oxígeno disuelto, coliformes totales y fecales. La estimación de los caudales mensuales de ambos ríos en estudio, se realizó mediante el diseño de un modelo matemático, aplicando la metodología Box–Jenkins apoyado en caudales históricos y actuales. Finalmente, el presente trabajo da respuesta a la evaluación de la calidad y el caudal de estos ríos, mediante el análisis y la representación gráfica, evidenciando su deterioro a medida que se avanza en su recorrido, teniendo el caudal un comportamiento no estacionario.

Palabras claves: ríos; parámetros de calidad; estudio de caudales; modelo matemático.

Recibido: 10 diciembre 2018

Aceptado: 23 marzo 2019

1. Introducción

El agua es un recurso esencial para el sostenimiento de la vida en todos sus niveles de organización. Sin embargo, las fuentes superficiales están siendo contaminadas cada vez más debido al incremento de actividades humanas. Venezuela está entre los primeros quince países del mundo,

*Autor para correspondencia:

Correo-e:ing.milagrosjimeneznoda@gmail.com
(Milagros Jiménez-Noda)

en mayor disponibilidad de agua dulce, pero con graves problemas en la calidad del suministro de agua destinada al consumo humano, siendo las poblaciones menos favorecidas las más afectadas. Además el país cuenta con muy pocos avances en materia de tratamiento de aguas servidas.

El país cuenta con abundantes recursos de aguas superficiales y subterráneas, y su territorio es drenado por más de un millar de ríos, 124 de los cuales poseen cuencas mayores de 1.000 km², aproximadamente 85 % del total de las aguas que anualmente se generan como escorrentía de superficie corresponde a la margen derecha del río Orinoco y 15 % al generado en el resto del país, los ríos del territorio venezolano se dirigen fundamentalmente hacia dos grandes vertientes marítimas: la del Océano Atlántico y la del Mar Caribe.

Entre los ríos que forman parte de la cuenca hidrográfica del Mar Caribe, se encuentran los que conforman la subcuenca Miquija y Goagoaza, ubicada en la vertiente norte del Parque Nacional San Esteban, Municipio Puerto Cabello del Estado Carabobo. Dentro del proceso de Ordenación del Territorio, el Parque Nacional San Esteban posee un papel fundamental como importante reservorio de recursos naturales y escénicos, destacándose como fuente de recursos hídricos, que preservados en el espacio y en el tiempo, representan un significativo aporte para el desarrollo de actividades económicas localizadas fuera del Parque Nacional San Esteban, fundamentalmente satisface la demanda de agua para el consumo regional. La administración y manejo del Parque Nacional San Esteban está a cargo del Instituto Nacional de Parques (INPARQUES).

El daño a una subcuenca hídrica suele relacionarse por la evidente pérdida de la biodiversidad en el ecosistema acuático determinado, afectando a la calidad de vida de los individuos allí residentes, e inclusive precipitando la muerte masiva de los mismos, en casos de intoxicaciones agudas, eso sin contar con algunos de los principales contaminantes de los ríos, tales como: agentes infecciosos que causan trastornos gastrointestinales; aguas residuales y otros residuos que tienden a demandar oxígeno; productos químicos y

nutrientes vegetales.

En el trabajo de investigación de Villa [1], se evaluó la calidad del agua por medio de análisis físico-químicos y microbiológicos, permitiendo así la determinación de las posibles causas de contaminación, para finalmente realizar propuestas de tratamiento y control de la contaminación del río Yacuambi, en función de los contaminantes que afecten al cauce y de los vertidos que recibe.

Por otro lado, Masías enfocó el estudio de la calidad del agua en el valle del río Apurímac realizando análisis físico-químicos bajo las normas vigentes establecidas y evaluar de esta manera la calidad del recurso de estas microcuencas [2]. Los resultados obtenidos arrojaron que el vertido de los ácidos inorgánicos es la causa probable de la contaminación con metales pesados, con grados alarmantes encontrados en las microcuencas. Además, el 90 % de las microcuencas presentaba turbidez, situación que debería investigarse mediante análisis microbiológicos para posteriores investigaciones.

Los ríos cuentan con una capacidad de auto depuración de sus aguas la cual se define como el conjunto de fenómenos físicos, químicos y biológicos, que tienen lugar en el curso del agua de modo natural y que provocan la destrucción de materias extrañas incorporadas a un río. Los compuestos que pueden ser degradados por los ríos son llamados biodegradables. Pero hay compuestos que son persistentes y que no pueden ser transformados por el curso de agua, estos son denominados no biodegradables o permanentes. El desarrollo de esta investigación tendrá un aporte en el área de la Química Ambiental, pues la evaluación de la calidad y el caudal de las aguas de la subcuenca hidrográfica Miquija y Goagoaza le permitirán a INPARQUES conocer no solo los parámetros físicos-químicos y microbiológico bajo la “norma para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos” establecida en el Decreto N° 883, sino también conocer de forma científica, ha sido la variación de el caudal a lo largo del tiempo. El objeto de este trabajo se basó en la evaluación de la calidad y el caudal de las aguas de la subcuenca hidrográfica Miquija-Goagoaza, como requerimiento de INPARQUES, con el objetivo de

abrir un historial (base de datos) que les permita monitorear el comportamiento de la subcuenca a fin de tomar las medidas necesarias para salvaguardar el recurso agua.

2. Metodología

2.1. Equipos, materiales y reactivos

Equipos. GPS marca Garmin, modelo: etrex 10; Medidor de pH marca HANNA Instruments; Turbidímetro marca HANNA Instruments; Medidor de oxígeno disuelto marca HANNA Instruments; Medidor de Conductividad marca HANNA Instruments; Kit de Dureza total marca SQUICA; Sólidos totales disueltos marca Digital Aid; Anemómetro marca JDC Electronic SA.

Materiales. Varilla de altura, cinta métrica, captador de muestra, guantes de latex, frascos de vidrio esterilizados, cava con hielo, cámara fotográfica digital, reloj, pilas alcalinas, bolígrafos y etiquetas

Reactivos. Cloruro de potasio (KCl) marca Merck, Buffer de pH = 4,00 marca Merck, Buffer de pH = 7,00 marca Merck, Buffer de pH = 10,00 marca Merck, Solución de estándar primario de 10 FTU marca HANNA Instruments, Solución electrolítica marca HANNA Instruments, Solución de calibración marca HANNA Instruments.

2.2. Ubicación y selección de puntos de muestreo

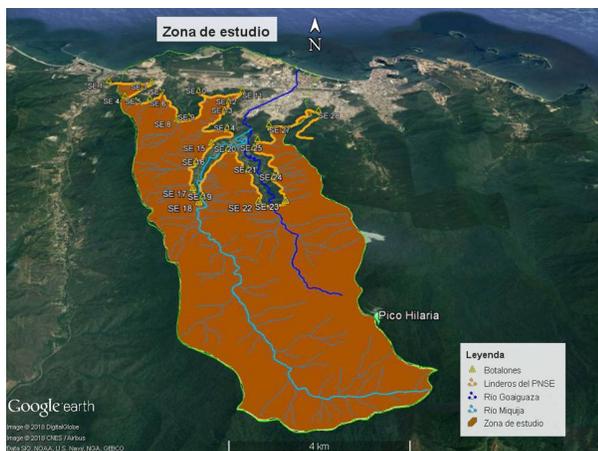


Figura 1: Subcuenca Miquija-Goaigoaza delimitada por los linderos del PNSE.

La zona de estudio seleccionada de acuerdo a los requerimientos solicitados por las autoridades del Parque Nacional (INPARQUES) se muestra en la Figura 1, la cartografía de la subcuenca hidrográfica delimitada por los linderos del Parque Nacional San Esteban (PNSE).

Tabla 1: Puntos seleccionados para el muestreo en el río Miquija.

| # | Zona | Coordenada Este (UTM) | Coordenada Norte (UTM) | Altura sobre el nivel del mar (m) | Error de medición (m) | N.S. |
|---|-------|-----------------------|------------------------|-----------------------------------|-----------------------|------|
| 1 | Alta | 602577 | 1148967 | 148 | 4 | 7 |
| 2 | | 602272 | 1148914 | 150 | 3 | 6 |
| 3 | Media | 602575 | 1149141 | 139 | 3 | 7 |
| 4 | | 602463 | 1149215 | 130 | 2 | 7 |
| 5 | Baja | 602253 | 1149698 | 136 | 3 | 7 |
| 6 | | 602181 | 1150381 | 81 | 2 | 7 |

#: Puntos de muestreo.
N.S.: Número de satélite.

Tabla 2: Puntos seleccionados para el muestreo en el río Goagoaza.

| # | Zona | Coordenada Este (UTM) | Coordenada Norte (UTM) | Altura sobre el nivel del mar (m) | Error de medición (m) | N.S. |
|---|-------|-----------------------|------------------------|-----------------------------------|-----------------------|------|
| 1 | Baja | 604750 | 1150016 | 34 | 3 | 6 |
| 2 | Media | 604622 | 1150150 | 38 | 2 | 8 |
| 3 | Alta | 604403 | 1150414 | 46m | 3 | 8 |

Las coordenadas de los puntos de muestreo establecidos se muestran en las Tablas 1 y 2 para los ríos Miquija y Goagoaza respectivamente. Esta selección se realizó en campo y los criterios para dividir las zonas en alta, media y baja, se basaron de acuerdo a la delimitación geográfica establecida que tenían estos ríos dentro del PNSE y una vez realizado el recorrido guiado por los guardaparques durante la selección de los puntos, ellos indicaron cuales eran las zonas alta, media y baja de cada



Figura 2: Puntos seleccionados para el muestreo identificando las zonas: alta, media y baja de los ríos.

ríos. En la Figura 2 se visualizan geográficamente la ubicación de cada zona para ambos ríos.

Finalmente una vez definido los puntos de muestreos se efectuó la planificación para llevar a cabo el muestreo en los puntos ya identificados y georeferenciados. La Figura 3 muestra detalladamente la planificación del cronograma de monitoreo que contempla las actividades realizadas para dar cumplimiento con la toma de muestras.

2.3. Encuesta aplicada a la población de la zona

La encuesta realizada estuvo estructurada en tres secciones: la primera en las características de la población, la segunda en la condición actual de los ríos y sus alrededores y la tercera referida al conocimiento y conciencia ambiental en la población. La validación del instrumento estuvo certificada por dos especialistas en el área, quienes dieron revisión y posterior aprobación para el uso de la misma. La utilidad de la encuesta aplicada a los guardaparques y a los habitantes de la zona, fue conocer las posibles fuentes de contaminación de la subcuenca Miquija-Goaiqoaza y poder constatar estos resultados con el recorrido visual, para establecer la selección de los puntos de muestreo. El instrumento de recolección de datos fue validado por la Escuela de Ingeniería Química y por el Laboratorio de Procesos Estocásticos del Instituto de Matemáticas y Cálculo Aplicado de la Facultad de Ingeniería.

2.4. Parámetros físico químicos y microbiológicos

2.4.1. Muestreo

El protocolo de muestreo empleado fue el expuesto en la norma COVENIN 2709:2002 [3], donde se define el tipo de muestra a captar, modalidad de captación, tipo de muestreo, captación, preservación y manejo de muestras.

2.4.2. Selección de parámetros

Parámetros fisicoquímicos. Los parámetros evaluados se seleccionaron de acuerdo con lo establecido en el Decreto N° 883 [4], donde se describe específicamente las normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos por efluentes líquidos, se identificó el tipo de agua y los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que deben ser monitoreados. Los parámetros fisicoquímicos determinados *in situ* fueron: oxígeno disuelto, pH, conductividad, turbidez y sólidos totales disueltos.

Parámetros microbiológicos. Para la captación de muestras de parámetros microbiológicos se consideró lo establecido en la Norma Covenin 2709:2002 [3] en cuanto a su captación, preservación y manejo de las muestras. Las muestras deben ser refrigeradas a 4 °C una vez captadas para ser trasladadas de forma segura al laboratorio, y en envases de vidrio con tapa de rosca. Para el análisis microbiológico de Coliformes Totales y Fecales presentes en la muestra de agua se realizó la técnica por filtración de membrana. Los Métodos utilizados para realizar estos análisis fueron: 9221-B (coliformes totales) [5] y NMP 9221-E (coliformes fecales) [5]

2.4.3. Dureza total

En el caso de la dureza total se determinó dicho parámetro mediante el método titulométrico con EDTA [6].

2.4.4. Estimación de caudales

En primer lugar se identificó el modelo Box-Jenkins, el cual permitirá estimar los caudales mensuales de los ríos en estudio. Seguidamente se utilizó el software estadístico Gretl (GNU

| Actividades | 2018 | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------|---|---|---|----------|----|----|----|----------|----|----|----|----------|----|----|----|
| | Junio | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Semana 1 | | | | Semana 2 | | | | Semana 3 | | | | Semana 4 | | | |
| | Día | | | | Día | | | | Día | | | | Día | | | |
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 13 | 14 | 15 | 16 | 20 | 21 | 22 | 23 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| Logística previa al muestreo | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Elaboración e impresión de tablas para la recolección de datos. | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Preparación del envase plástico captador de la muestra. | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Preparar la cámara fotográfica digital, GPS, agua destilada, reloj y pilas alcalinas, bolígrafos y etiquetas. | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Preparación de la cava con hielo para la debida refrigeración de las muestras. | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Planificación con el laboratorio CIMA-UC para la entrega de los envases esterilizados. | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Planificación con el laboratorio CIMA-UC para la fecha y hora de la entrega de muestras. | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Planificación con el I.A.S.I.E.D.A.G.R.E.C para el acompañamiento técnico. | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Planificación del traslado desde valencia hasta la subcuenca de estudio. | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Muestreo | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ubicar con el GPS los puntos de monitoreo ya georeferenciados. | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Preparar los equipos de campo para la medición de los parámetros fisicoquímicos. | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Medición de los parámetros fisicoquímicos. | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Captación de las muestras microbiológicas | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Post Muestreo | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Guardar limpios y secos los equipos de campo. | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Trasladar los equipos de campo al lugar de resguardo. | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Guardar las muestras bajo las mismas condiciones de refrigeración para su posterior consignación. | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Consignación de las muestras en el laboratorio CIMA-UC para su análisis. | | | | | | | | | | | | | | | | |

Figura 3: Cronograma de monitoreo para la toma de muestras.

Regression Time series Library) para estimar los parámetros del modelo identificado, con el fin de encontrar patrones para una predicción hacia el futuro de los caudales mensuales. Los modelos Box–Jenkins están explicados en varios libros de econometría (ver por ejemplo [7]).

3. Resultados y discusiones

3.1. Resultados de la encuesta aplicada en la zona de estudio

De acuerdo a los resultados mostrados en la Figura 4, se puede resaltar que en cuanto a la información sobre las características de la población el 90 % de la encuesta fue respondida por la comunidad, quienes representan la mayor proporción de los habitantes del sector. Seguido a esto, respecto a la condición actual de los ríos y sus alrededores, los encuestados consideran que el 65 % de los cambios en el río, se vienen dando desde hace tres años, por otro lado, el factor de mayor contaminación son los desechos sólidos en un 74 %. Finalmente, respecto a la

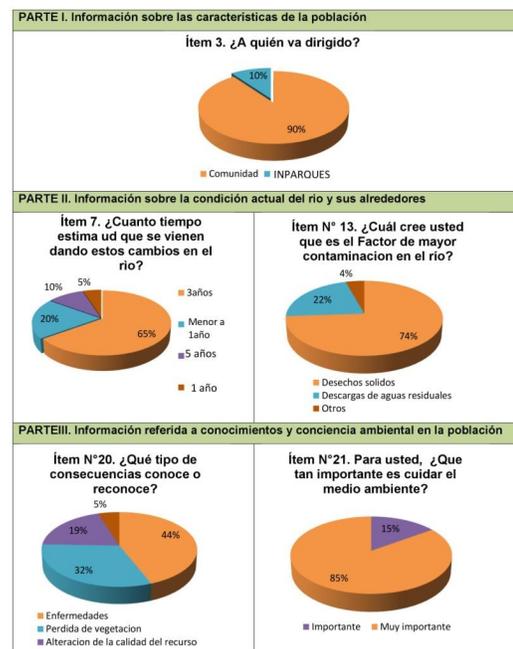


Figura 4: Resultados de las encuestas aplicadas en la zona de estudio.

información referida al conocimiento y conciencia ambiental en la población, un 44 % reconoce que

la contaminación del agua acarrea consecuencias como enfermedades, además el 85 % considera muy importante cuidar el ambiente.

3.2. Determinación de los parámetros físico-químicos y microbiológicos del agua a lo largo de los ríos

Durante 4 semanas se determinaron los parámetros fisicoquímicos. Se captaron 9 muestras para ambos ríos por cada semana, para un total de 36 muestras. Los valores obtenidos se muestran en las Tablas 3 y 4. Mientras que, para el caso de los parámetros microbiológicos, se tomó en consideración 4 puntos críticos entre ambos ríos por cada semana (dos puntos para cada río, dos en la zona baja de Miquija, uno en la zona media y el otro en la zona baja de Goaigoaza), para un total de 8 muestras captadas en las 2 semanas establecidas para el estudio; estos valores obtenidos se encuentran reflejados en la Tabla 5.

3.3. Evaluación de la calidad del recurso en función de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para ambos ríos

La calidad del agua tal como se encuentra en la naturaleza, depende de las características de la cuenca hidrográfica y lamentablemente este recurso está siendo afectado, directa y severamente por los diferentes usos que se le da a la cuenca. Por ello es importante identificar posibles alteraciones en sus características fisicoquímicas y microbiológicas.

Río Miquija. La Figura 5 muestra los resultados obtenidos para el río Miquija en función de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos determinados, según el subtipo de agua 1B.

Como se puede observar en la Figura 5, en el caso del río Miquija, para el tipo de agua 1, subtipo de agua 1B, el parámetro Oxígeno Disuelto (OD) se encuentra en toda su zona de estudio (alta, media y baja) por debajo del límite establecido en el Decreto N° 883 [4]. Un valor bajo de Oxígeno Disuelto (OD) en estas zonas se presume puede deberse a varios factores: a) por un incremento de temperaturas en el agua, desde la zona alta a la baja, esto se debe a que la incidencia del sol es más directa en la

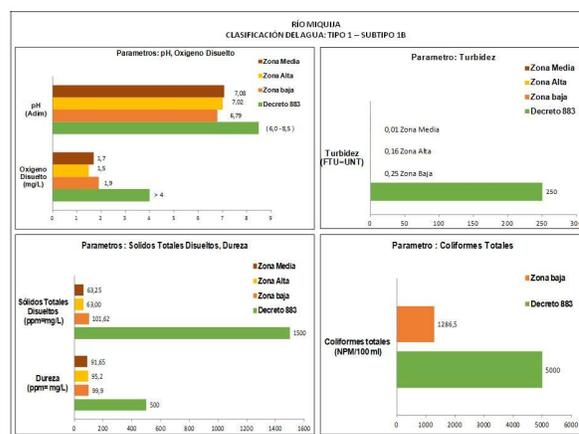


Figura 5: Representación de la condición del río Miquija en función de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos, según el subtipo de agua 1B.

zona baja por la disminución de espacios boscosos debido a los asentamientos, zonas pobladas y la deforestación presente, b) la evidencia de caudales reducidos a lo largo del río y corrientes tranquilas lo que da paso a una baja tasa de aireación en la fuente, y c) un elevado transporte de material orgánico fino que puede ser fácilmente lavado y consumido por los microorganismos.

Los valores reportados de pH, turbidez, dureza, sólidos totales no tienen mayor incidencia sobre el equilibrio ambiental, se encuentran dentro de los límites permisibles; sin embargo se debe tener especial atención con los coliformes totales presentes, que a pesar de cumplir con los límites del decreto son un indicador de la contaminación del agua y tienen un origen fecal de humanos y animales; mucho más, considerando que este tipo de agua 1B contempla agua para uso doméstico y que puede ser acondicionada, teniendo el río Miquija una característica vital y es la presencia de un Dique Toma, cuya función es concentrar agua cruda para ser conducida a través de un tubo matriz a la Planta Potabilizadora de Puerto Cabello.

La Figura 6 muestra la condición del río Miquija en función de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos, según el subtipo de agua 2A.

En el caso de la Figura 6, para el tipo de agua 2, subtipo de agua 2A, los parámetros Coliformes

Tabla 3: Valores promedios obtenidos por semana en la toma de muestra de los parámetros medidos “in situ” en el río Miquija.

| # | Oxígeno disuelto (mg/L) | Conductividad (mS) | Turbidez (FTU) | Sólidos totales disueltos (ppm) | pH (Adim) | Dureza total (ppm) | Temperatura (°C) |
|---|-------------------------|--------------------|----------------|---------------------------------|-----------|--------------------|------------------|
| 1 | 1,9 | 0,14 | 0,40 | 79 | 7,48 | 94,44 | 25,7 |
| 2 | 2,1 | 0,13 | 0,28 | 74 | 6,88 | 88,88 | 24,8 |
| 3 | 1,6 | 0,13 | 0,00 | 77 | 6,68 | 99,99 | 24,9 |
| 4 | 1,6 | 0,13 | 0,01 | 75 | 6,88 | 99,99 | 24,8 |

#: Número de semanas.

Tabla 4: Valores promedios obtenidos por semana en la toma de muestra de los parámetros medidos “in situ” en el río Goaigoaza.

| # | Oxígeno disuelto (mg/L) | Conductividad (mS) | Turbidez (FTU) | Sólidos totales disueltos (ppm) | pH (Adim) | Dureza total (ppm) | Temperatura (°C) |
|---|-------------------------|--------------------|----------------|---------------------------------|-----------|--------------------|------------------|
| 1 | 1,8 | 0,11 | 0,90 | 63 | 7,42 | 77,77 | 27,0 |
| 2 | 1,4 | 0,10 | 0,04 | 62 | 7,05 | 66,66 | 26,6 |
| 3 | 1,4 | 0,11 | 0,00 | 64 | 6,59 | 99,99 | 25,9 |
| 4 | 1,4 | 0,12 | 3,95 | 64 | 6,68 | 88,88 | 25,8 |

Tabla 5: Datos obtenidos en el análisis microbiológico de las muestras captadas en los puntos críticos en los ríos Miquija-Goaigoaza.

| Río | Zona | N° de muestra | Coliformes | |
|-----------|-------|----------------|-------------------|------------------|
| | | | totales (NP-M/mL) | fecales (NPM/mL) |
| Semana: 2 | | | | |
| Miquija | Baja | 1 (Punto N° 5) | 2400 | 2400 |
| | | 2 (Punto N° 6) | 2400 | 2400 |
| Goaigoaza | Media | 1 (Punto N° 2) | 2400 | 2400 |
| | Baja | 2 (Punto N° 3) | 2400 | 2400 |
| Semana: 3 | | | | |
| Miquija | Baja | 1 (Punto N° 5) | 160 | 2,2 |
| | | 2 (Punto N° 6) | 187 | 3,3 |
| Goaigoaza | Media | 1 (Punto N° 2) | 2400 | 2400 |
| | Baja | 2 (Punto N° 3) | 2400 | 2400 |

Totales y Fecales se encuentra en su zona baja muy por encima del límite permisible establecido en el Decreto N° 883 [4]. Es en esta zona de la

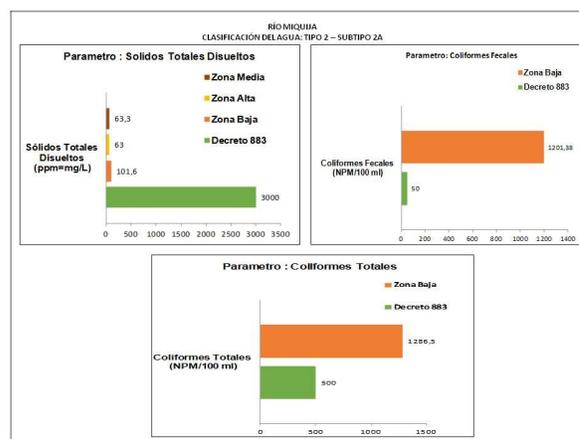


Figura 6: Representación de la condición del río Miquija en función de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos, según el subtipo de agua 2A.

subcuenca donde se concentra la mayor parte de la población, donde hay mayor actividad humana y es de considerar que el 19% de la población manifestó en las encuestas descargan las aguas residuales directamente al río, las cuales a su vez son transportadas por escorrentía superficial y se concentran en este cuerpo de agua; se debe tener especial atención con este grupo de coliformes,

considerando que este tipo de agua 2A contempla agua destinada para uso agropecuario, que pueden ser empleadas para el riego de vegetales destinados al consumo humano, lo cual puede ser perjudicial para la salud de la población.

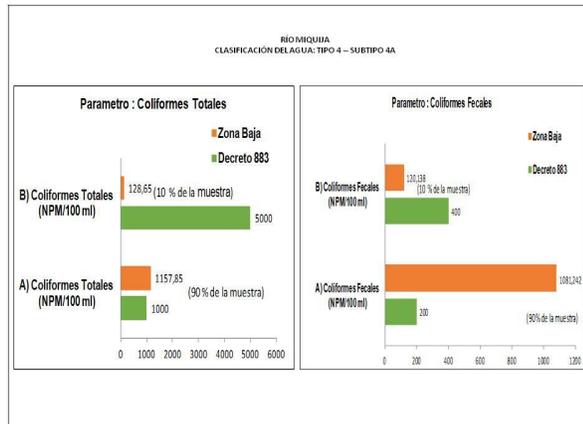


Figura 7: Representación de la condición del río Miquija en función de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos, según el subtipo de agua 4A.

Finalmente, la Figura 7 muestra la condición del río Miquija en función de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos, según el subtipo de agua 4A.

Para el tipo de agua 4, subtipo 4A, se evidencia que los parámetros coliformes totales y fecales se encuentran en su zona baja por encima del límite permisible establecido en el Decreto N° 883 [4]; el 90% de la condición en ambos grupos coliformes incumple la norma lo que hace inferir igualmente un nivel de contaminación fecal, a consecuencia de lo expresado en el subtipo anterior, los asentamientos y el tipo de destino final que dan a sus aguas residuales; aunado en este caso al uso del recurso como balneario y sitio de recreación siendo empleada para el contacto humano total, permitiendo la deposición directa de organismos patógenos en estas aguas.

Río Goaiagoaza. En el caso del río Goaiagoaza se puede observar en la Figura 8, la condición del río Goaiagoaza en función de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos, según el subtipo de agua 2A. Los parámetros coliformes

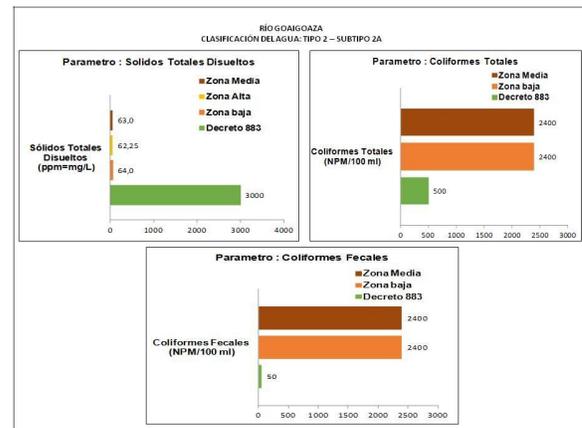


Figura 8: Representación de la condición del río Goaiagoaza en función de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos, según el subtipo de agua 2A.

totales y fecales se encuentra en su zona media y baja por encima del límite permisible establecido en el Decreto N° 883 [4]. Estos valores igualmente son atribuidos a contaminación fecal y es que en estas zonas de la subcuenca es donde se concentra la mayor parte de la población, quienes descargan directamente las aguas residuales sobre el recurso. Por otro lado, los valores reportados de sólidos totales no tienen mayor incidencia sobre el equilibrio ambiental del recurso, se encuentran dentro de los límites permisibles.

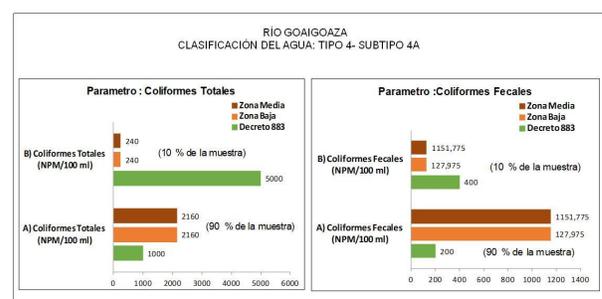


Figura 9: Representación de la condición del río Goaiagoaza en función de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos, según el subtipo de agua 4A.

Posteriormente se puede observar en la Figura 9, la condición del río Goaiagoaza en función de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos, según el subtipo de agua 4A.

En la Figura 9, para el tipo de agua 4, subtipo 4A, los parámetros Coliformes Totales y Fecales en las zonas media y baja no cumplen con los límites permisibles establecidos en el Decreto N° 883 [4]; el 90 % de la condición en ambos grupos de coliformes incumple la norma, reportando en este caso valores que son bastante elevados y que limitan considerablemente los usos del agua; manejándose las mismas características de contaminación que el río Miquija, tal como: el uso como balneario y lugar de recreación empleando el recurso para el contacto humano total permitiendo la deposición directa de organismos patógenos sobre él.

3.4. Comparación de los valores de los parámetros obtenidos con límites máximos permisibles establecidos en la normativa legal vigente

A continuación se procede a comparar los resultados obtenidos en la representación estadística de la data experimental, con los límites permisibles establecidos en el decreto n° 883, de acuerdo a los tipos y subtipos de agua propuestos, para los ríos Miquija y Goagoaza, a partir de las Tablas 6 y 7 respectivamente.

Tal y como se muestra en la Tabla 6 y 7, en el caso del río Miquija, para el tipo de agua 1, subtipo de agua 1B, que indica que son aguas destinadas al uso doméstico, que pueden ser acondicionadas por medio de tratamientos convencionales de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y cloración, se puede evidenciar que los valores reportados del parámetro oxígeno disuelto (OD) se encuentra en toda su zona de estudio por debajo del límite establecido en el Decreto N° 883, comprometiendo así no sólo la supervivencia de todos los organismos acuáticos, sino la calidad del recurso. Los parámetros pH, turbidez, dureza, sólidos totales y coliformes totales se encuentran dentro de los límites permisibles.

Para el tipo de agua 2, subtipo de agua 2A, que indica que son aguas destinadas a usos agropecuarios, que pueden ser empleadas para el riego de vegetales destinados al consumo humano, se evidencia que los valores reportados de Coliformes totales y fecales en la zona baja se

encuentran muy por encima del límite permisible establecido en el Decreto N° 883, viéndose comprometido así el ecosistema y la salud de la población que se sirve del consumo de estos vegetales que siembran y riegan con estas aguas esos espacios. El parámetro Sólidos Totales, se encuentran dentro de los límites permisibles.

Finalmente para el tipo de agua 4, subtipo 4A, que indica que son aguas destinadas a balnearios, deportes acuáticos, pesca deportiva, comercial y d subsistencia, que pueden ser empleada para el contacto humano total, se evidencia que los valores reportados de coliformes totales y fecales en la zona baja no cumplen con una de las condiciones que establece el Decreto N° 883, pues sólo cumplen con la condición del 10 % lo que implica por lo tanto que el recurso está comprometido con este parámetro. Hay que resaltar que el valor para el 90 % de las muestras de Coliformes Fecales es bastante alto referido a lo que establece la norma. El parámetro Moluscos infectados con *S. mansoni* se encontró ausente.

Una vez comparado los resultados obtenidos con los límites permisibles establecidos en el Decreto 883, se puede indicar que las aguas del río Miquija en cada uno de los subtipos propuestos se encuentra comprometida en al menos uno o dos parámetros, a saber: oxígeno disuelto (OD), coliformes totales y fecales; aún y que sin embargo algunos de sus parámetros cumplan con la normativa. Lo que hace presumir el progresivo deterioro del recurso generado por las diversas actividades antrópicas.

Tal y como se muestra en la Tabla 8, en el caso del río Goagoaza, para el tipo de agua 2, subtipo de agua 2A, que indica que son aguas destinadas a usos agropecuarios, que pueden ser empleadas para el riego de vegetales destinados al consumo humano, se evidencia que los valores reportados de coliformes totales y fecales en las zonas media y baja, consideradas como zonas críticas de estudio se encuentran por encima del límite permisible establecido en el Decreto N° 883, viéndose comprometido así el ecosistema y la salud de la población que se sirve del consumo de estos vegetales que siembran y riegan en estos espacios. El parámetro sólidos totales, se encuentran dentro de los límites permisibles.

Tabla 6: Comparación de los resultados contra los límites permisibles del decreto 883 según el tipo de agua en el río Miquija.

| Parámetros Evaluados | Valores Obtenidos | | | Decreto 883.Límites Permisibles. | | |
|--------------------------------------|-------------------|------------|--------|----------------------------------|----------------------|----|
| | Alta | Zona Media | Baja | 1B | Tipo de Agua 2A | 4A |
| Temperatura °C | 23,8 | 24,3 | 27,0 | | | |
| Oxígeno disuelto (O.D) (mg/L) | 1,5 | 1,7 | 1,9 | Mayor de 4,0 mg/L | | |
| pH (Adim) | 7,02 | 7,08 | 6,79 | 6,0 – 8,5 | | |
| Turbidez (FTU=UNT) | 0,16 | 0,01 | 0,25 | Menor de 250 UNT | | |
| Conductividad (mS/cm) | 0,11 | 0,10 | 0,15 | | | |
| Dureza (ppm= mg/L) | 95,82 | 91,65 | 99,99 | Límite 500 mg/L | | |
| Sólidos Totales Disueltos (ppm=mg/L) | 63,00 | 63,25 | 101,62 | No exceder los 1500 mg/L | No exceder 3000 mg/L | |

Tabla 7: Comparación de los resultados contra los límites permisibles del decreto 883 según el tipo de agua en el río Miquija (Continuación).

| Parámetros Evaluados | Valores Obtenidos | | | Decreto 883. Límites Permisibles. | | |
|------------------------------------|-------------------|------------|--|---|---|--|
| | Alta | Zona Media | Baja | 1B | Tipo de agua 2A | 4A |
| Coliformes totales (NPM/100 ml) | | | 1286,50 a) En el 90 % 1157,85 b) En el 10 % 128,65 | Promedio mensual menor a 10.000 NMP por cada 100 ml. (5.000 NMP por dos semana) | Promedio mensual menor a 1000 NMP por cada 100 ml. (500 NPM por dos semana) | a) Menor a 1000 NMP por cada 100 ml en el 90 % de una serie de muestras consecutivas. b) Menor a 5000 en el 10 % restante |
| Coliformes fecales (NPM/100 ml) | | | 1201,38 a) En el 90 % 1081,242 b) En el 10 % 120,138 | | Promedio mensual menor a 100 NMP por cada 100 ml. (50 NPM por dos semana) | a) Menor a 200 NMP por cada 100 ml en el 90 % de una serie de muestras consecutivas. b) Menor a 400 en el 10 % restante |
| Moluscos infectados con S. mansoni | | | | | | Ausentes. |

Finalmente para el tipo de agua 4, subtipo 4A, que indica que son aguas destinadas a balnearios, deportes acuáticos, pesca deportiva, comercial y de subsistencia, que pueden ser empleada para el contacto humano total, se evidencia que los valores reportados de coliformes totales y fecales

en las zonas media y baja no cumplen con una de las condiciones que establece el Decreto N° 883, pues sólo cumplen con la condición del 10 % lo que implica por lo tanto que el recurso está comprometido con este parámetro, ya que el otro 90 % de los valores de las muestras de coliformes

Tabla 8: Comparación de los resultados contra los límites permisibles del decreto 883 según el tipo de agua en el río Goaigoaza.

| Parámetros Evaluados | Valores Obtenidos | | | Decreto 883.Límites Permisibles. | |
|--------------------------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|---|--|
| | Alta | Zona Media | Baja | Tipo de Agua | |
| | | | | 2A | 4A |
| Temperatura °C | 25,9 | 26,3 | 26,7 | | |
| Oxígeno disuelto (O.D) | 1,6 | 1,4 | 1,4 | | |
| pH (Adim) | 6,82 | 6,89 | 6,95 | No aplica | No aplica |
| Turbidez (FTU=UNT) | 1,16 | 1,25 | 1,26 | | |
| Conductividad (mS/cm) | 0,10 | 0,11 | 0,10 | | |
| Dureza (ppm= mg/L) | 74,99 | 91,65 | 83,32 | | |
| Sólidos Totales Disueltos (ppm=mg/L) | 62,25 | 63,00 | 64,00 | No exceder 3000 mg/l | |
| Coliformes totales (NPM/100 ml) | | 2400 | 2400 | Promedio mensual menor a 1000 NPM por cada 100 ml. (500 NPM por dos semana) | a) Menor a 1000 NPM por cada 100 ml en el 90 % de una serie de muestras consecutivas. b) Menor a 5000 en el 10 % restante |
| | | a) En el 90 % 2160 | a) En el 90 % 2160 | | |
| | | b) En el 10 % 240 | b) En el 10 % 240 | | |
| Coliformes fecales (NPM/100 ml) | | 2400 | 2400 | Promedio mensual menor a 100 NPM por cada 100 ml. (50 NPM por dos semana) | a) Menor a 200 NPM por cada 100 ml en el 90 % de una serie de muestras consecutivas b) Menor a 400 en el 10 % restante |
| | | a) En el 90 % 1151,775 | a) En el 90 % 1151,775 | | |
| | | b) En el 10 % 127,975 | b) En el 10 % 127,975 | | |
| Moluscos infectados con S. mansoni | | | | Ausentes. | |

fecales y totales son bastante altos referidos a lo que establece la norma. El parámetro moluscos infectados con S.mansoni se encontró ausente.

Una vez comparado los resultados obtenidos con los límites permisibles establecidos en el Decreto 883, se puede indicar que las aguas del río Goaigoaza en cada uno de los subtipos propuestos se encuentra comprometida en al menos uno o dos parámetros, a saber: coliformes totales y fecales; aún y que sin embargo algunos de sus parámetros cumplan con la normativa. Lo que hace presumir el progresivo deterioro del recurso generado por la intervención de la mano del hombre. Llama la atención que, el oxígeno disuelto (OD) en este río denota niveles de concentración bajos, parámetro que es imprescindible para mantener la vida acuática aunque no se encuentra normado dentro de estos subtipos de agua.

3.5. Estimación de caudales mensuales a través de un modelo matemático

A continuación, se muestra los resultados obtenidos para cada río, una vez aplicada la metodología del modelo Box–Jenkins, utilizando el software especializado Gretl.

Río Miquija. El modelo que está mejor adaptado a los datos de caudal del río Miquija es estacional de período $s = 12$, integrado de orden 1, autorregresivo en la parte estacional (AR) de orden 1 y media móvil (MA) de orden 4, modelo SARIMA(0, 1, 4)(1, 1, 0)₁₂. La estacionalidad fue determinada por el periodograma de los datos, el orden de integración por la prueba de raíces unitarias, los órdenes AR y MA fueron determinados mediante una búsqueda exhaustiva de los modelos posibles.

Tabla 9: Modelo mejor aceptado a los datos del caudal del río Miquija: usando las observaciones 2008:02 – 2010:11. Variable dependiente ΔQ_t .

| Parámetro | Coefficiente | Desv. Típica | p-valor |
|------------|--------------|--------------|---------|
| Φ_1 | 0,347072 | 0,207622 | 0,0946 |
| θ_4 | -0,595524 | 0,153642 | 0,0001 |

| Raíz | Nro. | Parte Real | Módulo |
|-----------------|--------|------------|--------|
| MA | Raíz 1 | -1,1383 | 1,1383 |
| | Raíz 2 | 1,1383 | 1,1383 |
| | Raíz 3 | -1,1383 | 1,1383 |
| | Raíz 4 | 1,1383 | 1,1383 |
| AR (estacional) | Raíz 1 | 2,8812 | 2,8812 |

De acuerdo a los resultados de la Tabla 9, el modelo que mejor se adapte a los datos del río Miquija está dado por la ecuación (1)

$$\Delta Q_t = 0,347072\Delta_{12}Q_t - 0,595524e_{t,4} + e_t, \quad (1)$$

donde:

- ΔQ_t : Diferencia de caudal en un tiempo t ;
 - $\Delta_{12}Q_t$: Diferencia de caudal de 12 meses atrás;
 - e_{t-4} : error de 4 meses atrás;
 - e_t : error en el tiempo.
- Todos los caudales tienen unidades (L/s).

Río Goaigoaza. El modelo que está mejor adaptado a los datos de caudal del río Goaigoaza integrado de orden 1, autorregresivo (AR) de orden 4, por lo cual queda de la forma ARIMA(4, 1, 0).

Tabla 10: Modelo mejor aceptado a los datos del caudal del río Goaigoaza: usando las observaciones 2004:07 – 2006:09. Variable dependiente ΔQ_t .

| Parámetro | Coefficiente | Desv. Típica | p-valor |
|-----------|--------------|--------------|---------|
| phi_4 | -0,493620 | 0,157312 | 0,0017 |

| Raíz | Nro. | Parte Real | Módulo |
|------|--------|------------|--------|
| AR | Raíz 1 | 1,1930 | 1,1930 |
| | Raíz 2 | 1,1930 | 1,1930 |
| | Raíz 3 | -1,1930 | 1,1930 |
| | Raíz 4 | -1,1930 | 1,1930 |

De acuerdo a los resultados de la Tabla 9, el modelo que mejor se adapte a los datos del río Goaigoaza está dado por la ecuación (2)

$$\Delta Q_t = -0,493620\Delta Q_{t-4} + e_t. \quad (2)$$

Las raíces de los polinomios autorregresivos y media móvil de los modelos estimados en las Tablas 9 y 10 garantizan que los modelos cumplen con la hipótesis de Box–Jenkins, ya que todos los módulos de las raíces son mayores a 1, lo cual garantiza la estabilidad de la serie y permite realizar pronósticos.

Es importante resaltar que, estadísticamente estos modelos son considerados un modelo inicial por contar solo con 3 años de data mensual, ya que para realizar un modelo más formal, haría falta por lo menos 30 años en datos anuales de acuerdo a lo establecido por Gujarati [7].

3.6. Evaluación de caudal para ambos ríos

Mediante los modelos matemáticos estimados para cada río, dados en las ecuaciones (1) y (2), fue efectuado el pronóstico estadístico del caudal, cuyos resultados están en la Figuras 10 y 11.

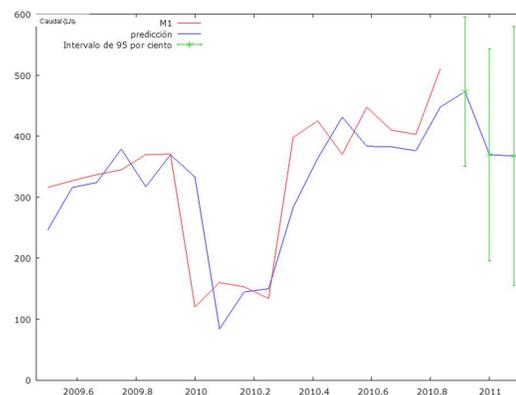


Figura 10: Pronóstico del caudal del río Miquija utilizando el modelo estimado.

Tabla 11: Valores obtenidos de la predicción del caudal (\hat{Q}_t) en el río Miquija.

| \hat{Q}_t | Predicción (L/s) | Desviación Típica | Intervalo al 95 % |
|-------------|------------------|-------------------|-------------------|
| 2010:12 | 473,04 | 62,6008 | (350,34; 595,73) |
| 2011:01 | 369,78 | 88,5309 | (196,26; 543,30) |
| 2011:02 | 367,54 | 108,4280 | (155,03; 580,06) |

Río Miquija. Para intervalos de confianza del 95 %, los resultados del pronóstico del caudal para el río Miquija están en la Tabla 11.

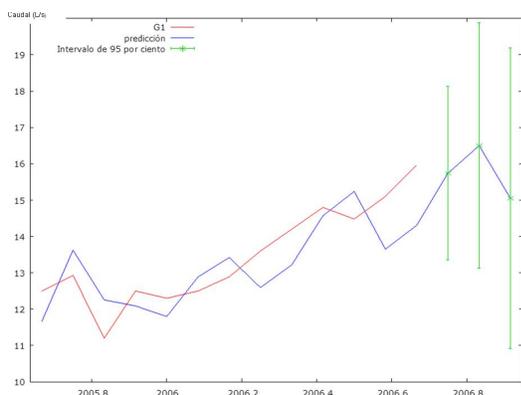


Figura 11: Pronóstico del caudal del río Goaigoaza utilizando el modelo estimado.

Tabla 12: Valores obtenidos de la predicción del caudal (\hat{Q}_t) en el río Goaigoaza.

| \hat{Q}_t | Predicción (L/s) | Desviación Típica | Intervalo al 95 % |
|-------------|------------------|-------------------|-------------------|
| 2006:10 | 15,74 | 1,2176 | (13,35; 18,13) |
| 2006:11 | 16,50 | 1,7219 | (13,12; 19,87) |
| 2006:12 | 15,05 | 2,1089 | (10,92; 19,18) |

Río Goaigoaza. Para intervalos de confianza del 95 %, los resultados del pronóstico del caudal para el río Goaigoaza están en la Tabla 12.

En las Figuras 10 y 11, se puede observar que los valores ajustados (en azul) siguen de cerca los valores de los datos originales en el tiempo, en un intervalo de confianza del 95 % (en Verde); lo que permite generar buenas estimaciones de caudal en el tiempo.

Para la evaluación del caudal, apoyados en el modelo matemático ajustado, junto con la curva pronóstico de los ríos Miquija y Goaigoaza, se puede inferir que el comportamiento de los presentes ríos ha sido No Estacionario a lo largo del tiempo. Lo que permite ratificar que los cambios de caudal en el tiempo también son atribuidos a las afectaciones ambientales evidenciadas, tales como: asentamientos ilegales, tala y quema de árboles, desarrollo de actividad agrícola, agropecuaria, balnearia y construcción de presas de gaviones, lo cual conduce a la disminución y desvío de estos recursos hídricos.

4. Conclusiones

Se seleccionaron 9 puntos para el monitoreo dentro de la subcuenca, de acuerdo al análisis del P.O.R.U, las encuestas y el recorrido por las zonas. La captación de las muestras se efectuó sobre 9 puntos de monitoreo para la obtención de los parámetros fisicoquímicos; contemplando 4 puntos críticos de ellos para los análisis microbiológicos. La concentración del oxígeno disuelto en el río Miquija en sus zonas: alta, media y baja es de 1,5 mg/L, 1,7 mg/L y 1,9 mg/L respectivamente, el cual se encuentra por debajo de los 4mg/L, según el subtipo de agua 1B establecidos en la norma. La concentración de coliformes totales y fecales en el análisis muestral de puntos críticos del río Miquija, en su zona baja es de 1157,85 NPM/100 mL y 1081,242 NPM/100 mL respectivamente, los cuales se encuentran por encima del límite permisible, según el subtipo de agua 2A y 4A establecido en la norma, mientras que el río Goaigoaza, en su zona media y baja es de 2160 NPM/100 mL para ambos sectores, los cuales se encuentran por encima del límite permisible, según el subtipo de agua 2A establecido en la norma. La concentración de coliformes fecales en el análisis muestral de puntos críticos del río Goaigoaza en su zona media y baja es de 1151,775 NPM/100 mL para ambos sectores, los cuales superan significativamente el límite permisible establecido por la norma, para el subtipo de agua 4A.

Con los datos de los caudales históricos, se logró identificar un modelo matemático para cada río en estudio, que estima en el tiempo los caudales mensuales, a través de la herramienta estadística Gretl se pudo realizar el estudio exhaustivo de la serie datos históricos, para lograr la mejor modelación de los datos. Las aguas presentes en los ríos Miquija y Goaigoaza, no cumplen con los límites permisibles establecidos en el Decreto 883 conforme a la clasificación del agua Tipo 1 (1B), Tipo 2 (2A) y Tipo 4 (4A). El comportamiento del caudal a lo largo del tiempo en los ríos Miquija y Goaigoaza ha sido No estacionario, pudiendo atribuir estos cambios a las afectaciones ambientales reflejadas en el

presente estudio. La calidad y caudal de agua en la subcuenca hidrográficas Miquija-Goaigoaza se encuentra comprometida para cada uno de los tipos de aguas y usos para los cuales pueden ser destinados estos recursos hídricos. Las fuentes de contaminación que están incidiendo en mayor proporción en los ríos Miquija y Goaigoaza son los agentes patógenos.

Reconocimientos

El presente Trabajo Especial de Grado fue reconocido por la Escuela de Ingeniería Química, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, Venezuela, con Mención Honorífica por su aporte de nuevos registros ambientales en la Subcuenca Miquija – Goaigoaza, ubicada en la vertiente norte del Parque Nacional San Esteban (PNSE), Estado Carabobo – Venezuela.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Nacional de Parques – INPARQUES por el apoyo recibido en el acceso y guía a la zona de estudio, así como también al Instituto Autónomo del Sistema Integrado de Emergencias, Desastres y Apoyo a la Gestión de Riesgo del Estado Carabobo, Venezuela - I.A.S.I.E.D.A.G.R.E.C por facilitar los equipos de campo para la determinación de los parámetros fisicoquímicos, finalmente a la Hidrológica del Centro - Hidrocentro C.A y la Secretaria de Ordenación del Territorio, Ambiente y Recursos Naturales por facilitar la data histórica que sirvió de base para la estimación de los caudales mensuales mediante los modelos matemático elaborado para cada río de estudio.

5. Referencias

- [1] M. A. Villa. Evaluación de la calidad del agua en la subcuenca del río Yacuambi. Propuestas de tratamiento y control de la contaminación. Tesis de Maestría, Universidad de Cádiz, Cádiz, España, 2011.
- [2] DEVIDA. Estudio de la calidad del agua en el valle del Río Apurímac. Reporte Técnico, DEVIDA, Perú, 2013.
- [3] COVENIN. COVENIN 2709:2002. Aguas naturales, industriales y residuales. Guía para las técnicas de muestreo. (1^{era} Revisión). COVENIN, 2002.

- [4] Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales. Decreto N° 883. Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos. *Gaceta Oficial de la República de Venezuela*, 5021(Extraordinario), 1995.
- [5] APHA, AWWA, and WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater, 1998.
- [6] D. Harris. *Análisis químico cuantitativo*. Reverté, España, 3 edition, 2007.
- [7] D. Gujarati. *Econometría*. McGraw-Hill Interamericana, México, 5 edition, 2010.

Tech note: bioremediation, enemy of cadmium

Yeimy Nieves, Norbis Parra, Samuel Villanueva*, Magaly Henríquez

Gerencia de Proyectos de Investigación, Desarrollo e Innovación, Centro Nacional de Tecnología Química, Caracas, Venezuela

Abstract.- At present there is a great concern for the contamination of agricultural soils due to the presence of heavy metals directly involved with damage to plants and humans. In order to determine the technologies developed worldwide aimed at the remediation of contaminated soil with cadmium. Specifically to the processes oriented in bioremediation, an information survey was developed consulting databases of patents and scientific publications. This research describes two technologies based on the use of plants and fungi respectively, which are of potential application to a cocoa producing region, located in Miranda State, Venezuela.

Keywords: biotechnology; soils; bioremediation; cadmium; cocoa; surveillance technological; intelligence competitive.

Nota técnica: biorremediación, enemigo del cadmio

Resumen.- En la actualidad existe una gran preocupación por la contaminación de suelos agrícolas debido a la presencia de metales pesados involucrados directamente con daños en plantas y humanos. Con la finalidad de determinar las tecnologías desarrolladas a nivel mundial orientadas a la remediación de suelos contaminados con cadmio, específicamente a los procesos orientados en la bioremediación, se desarrolló un levantamiento de información consultando bases de datos de patentes y de publicaciones científicas. En la presente investigación se describen dos tecnologías basadas en el uso de plantas y hongos respectivamente, las cuales son de potencial aplicación a una región productora de cacao, ubicada en el Estado Miranda, Venezuela.

Palabras clave: biotecnología; suelos; biorremediación; cadmio; cacao; vigilancia tecnológica; inteligencia competitiva.

Recibido: 26 noviembre 2018

Aceptado: 22 marzo 2019

1. Introducción

Desde la época precolombina el cacao *Theobroma Cacao L.* ha sido un cultivo de vital importancia, usado tanto para rituales como en la dieta de los habitantes de las Américas [1]. En Latinoamérica el cacao es cultivado en países como Ecuador, Perú, Brasil, México, El Salvador y Venezuela, la producción del período 2017-2018 en América es de alrededor de 748 mil toneladas lo que representa un 16,3 % de la producción mundial y aproximadamente 1.700 millones de dólares norteamericanos. No obstante, debido a las regulaciones implementadas el 1 de enero de 2019 por la Unión Europea sobre las concentraciones

permitidas de cadmio (Cd) en el chocolate y productos derivados de cacao, la exportaciones al mercado europeo estarán seriamente afectadas [2].

El cadmio es un metal pesado que no cumple ninguna función metabólica tanto en la planta de cacao como en humanos por lo que es considerado un metal tóxico debido a que puede ocasionar disfunción tubular renal, cálculos renales, alteración del metabolismo del calcio y esquelético, defectos endocrinos, reproductivos y respiratorios [3]. El cadmio entra en la alimentación humana con los vegetales y productos animales. Se fija a las plantas más rápidamente que el plomo. Esto ha generado una gran preocupación a nivel mundial por lo que se han tomado medidas al respecto, estableciéndose límites a la concentración de cadmio que pueden contener los alimentos y así sean aptos para el consumo humano, además de la ingesta semanal de cadmio según el peso corporal.

El *Theobroma Cacao L.* absorbe el cadmio

*Autor para correspondencia: S. Villanueva publicacionesgpidi.cntq@gmail.com

(Cd) del suelo y lo acumula en las almendras de cacao convirtiéndose en un riesgo para la salud de los consumidores [4]. Es importante tomar en cuenta en materia de exportación que, la comunidad europea es la región que importa más cacao y sus derivados en el mundo, con cantidades aproximadas de 6.000.000 de toneladas por año [2]. A partir del primero de enero de 2019 entrará en vigencia una nueva legislación para las importaciones de cacao y sus derivados en la que la comisión económica europea regulará el contenido de Cd en las importaciones de cacao.

En cuanto a la remediación de suelos para cultivos existen una cantidad interesante de tecnologías enfocadas en la biorremediación. Método que aplica agentes biológicos para la eliminación parcial o total de contaminantes y/o sustancias tóxicas del medio ambiente. A continuación presentaremos una sinopsis sobre las diferentes tecnologías aplicadas a la recuperación de suelos contaminados por metales pesados con la finalidad de que sean consideradas como posibles alternativas para la eliminación de cadmio en plantaciones de *Theobroma Cacao L.* [5].

2. Aspectos Teóricos y Antecedentes

El cadmio

El cadmio es un metal de color blanco azulado, dúctil, blando, maleable y con una densidad $8,642 \text{ g/cm}^3$. Es un elemento poco abundante en la naturaleza, constituye aproximadamente 0.1 ppm de la corteza terrestre y se encuentra asociado a compuestos de zinc. Específicamente en suelos no contaminados, el cadmio debe ser menor a 1 mg/kg . Como metal puro, no se encuentra en el ambiente, es más abundante en forma de óxidos complejos, sulfuros y carbonatos de zinc, plomo y menas de cobre. La concentración de cadmio en aire de áreas industriales varía de $9,1$ a $26,7 \text{ mg/m}^3$ y en áreas rurales de $0,1$ a 6 mg/m^3 . El tiempo de permanencia del cadmio en suelos es de hasta 300 años y el 90 % permanece sin transformarse [6].

Contaminación de suelo por metales pesados

Los metales pesados están directamente relacionados con los riesgos por contaminación de

los suelos, toxicidad en las plantas y los efectos negativos sobre la calidad de los recursos naturales y el ambiente. Estos peligros dependen de la toxicidad específica del metal, la bioacumulación, persistencia y no biodegradabilidad [7]. En el suelo el mayor peligro reside en su acumulación por las plantas y la transferencia a los animales incluido el hombre [8]. En general, la distribución de metales pesados en los suelos es un fenómeno complejo que se ve influenciado por factores como el potencial redox, el pH, el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, el nivel de las aguas subterráneas y sus fluctuaciones, entre otros [9]. En los últimos años, se han realizado estudios con el fin de determinar la concentración de metales pesados como el cadmio en suelos y así analizar su presencia en diferentes cultivos de gran consumo humano e interés mundial.

En el campo ambiental, el cadmio es un elemento relativamente raro en la litosfera. Las principales fuentes de contaminación son: la minero metalurgia de metales no ferrosos, la metalurgia del hierro y acero, la fabricación de fertilizantes fosfatados, la incineración de residuos de madera, carbón o “plásticos”, la combustión de hidrocarburos y las aplicaciones industriales de cadmio [6].

Los procesos naturales de liberación de Cd como fuente de contaminación son insignificantes en comparación con el procedente de la actividad humana. La contaminación del suelo proviene de pigmentos, pinturas, baterías, PVC, aleaciones y fertilizantes químicos fosfatados. La concentración de cadmio promedio en los suelos va de $0,07$ a $1,1 \text{ mg/kg}$. A valores altos de pH el cadmio no es móvil posiblemente por la baja solubilidad de los carbonatos y fosfatos, aunque el pH y el potencial redox son importantes en su movilidad y alta afinidad con la materia orgánica, oxihidroxidos de hierro, alofano e imogolita, no así con las arcillas. En general podemos decir que a pH ácidos los oxihidroxidos de hierro y la materia orgánica controlan la solubilidad del cadmio y que a pH alcalinos el Cd precipita por lo que es inmóvil. La concentración de Cd en la solución del suelo va de $0,2$ a $6 \text{ } \mu\text{g/L}$, en suelos contaminados se ha llegado a reportar concentraciones hasta de $400 \text{ } \mu\text{g/L}$. Para

recuperar los suelos contaminados por cadmio, es recomendable entre otras cosas: lavados en suelos ácidos, encalar (para elevar el pH) y aumentar la capacidad de intercambio de cationes [10].

Cacao y cadmio

El cacao es un producto de exportación importante para economías en desarrollo como África, Asia, Oceanía, América Latina y el Caribe, su valor en el mercado global es de aproximadamente 12 mil millones de dólares. A pesar del futuro promisorio, se ha evidenciado la presencia de cadmio (Cd) en el grano de cacao y sus derivados. Las plantas de cacao expuestas a altos niveles de cadmio sufren una reducción importante en procesos vitales tales como la fotosíntesis, la absorción de agua y de nutrientes. En consecuencia, presentan clorosis, inhibición del crecimiento, pardeamiento de las puntas de las raíces y finalmente, su muerte [11, 12].

En este sentido, durante el año 2009, el Panel de contaminantes de La Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA por European Food Safety Authority) estableció una ingesta semanal de 2,5 mg/kg de peso corporal para el cadmio [1, 13]. Luego, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), a través del Comité de Expertos en Aditivos Alimentarios Conjunto FAO/OMS (JECFA Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives), en el año 2011, ratificó la misma ingesta, a través del documento Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain [14].

Debido a lo anteriormente planteado, la Unión Europea notificó al Comité de Medidas Sanitarias y Fitosanitarias de la Organización Mundial del Comercio, el Proyecto de Reglamento de la Comisión que modifica el Reglamento (EC) Nro. 1881/2006 en cuanto a los niveles máximos de cadmio en los productos alimenticios, en el cual incluye a otros alimentos que no fueron tomados en cuenta en el documento del año 2006, para los niveles máximos de cadmio permitido. Entre ellos están el cacao y los derivados del chocolate que se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Valores máximos (Vm) de Cd permitidos (mg/Kg) en cacao y productos derivados del chocolate para la Unión Europea [15]

| Productos de Cacao | Vm |
|--|-----|
| Chocolate con leche con un contenido de materia seca total de cacao < 30 % | 0,1 |
| Chocolate con leche con un contenido de materia seca total de cacao < 50 %; chocolate con leche con un contenido de materia seca total de cacao ≥ 30 % | 0,3 |
| Chocolate con leche con un contenido de materia seca total de cacao ≥ 50 % | 0,8 |
| Cacao en polvo vendido al consumidor final o como ingrediente en cacao en polvo edulcorado vendido al consumidor final | 0,6 |

La Unión Europea notificó que la adición al Reglamento 1881 de 2006 entra en vigencia a partir de enero de 2019 [16] y lo ratifica en el reglamento 488 del 12 de mayo de 2014 [15]. Específicamente para el cacao y sus derivados, la Comisión Europea se apoyó en que el chocolate y el cacao en polvo que se venden al consumidor final puede contener altos niveles de cadmio [16]. Como tales productos son consumidos por los niños hay que establecer los niveles máximos de cadmio para los distintos tipos de chocolates y de cacao en polvo de venta al consumidor final.

Proceso de biorremediación

La biorremediación describe una variedad de sistemas que utilizan organismos vivos como plantas, hongos, bacterias, entre otros para degradar, transformar o remover compuestos orgánicos tóxicos a productos metabólicos inocuos o menos tóxicos. La estrategia biológica a emplearse dependerá de las actividades catabólicas de los organismos, y por consiguiente de su capacidad para utilizar los contaminantes como fuente de alimento y energía. El proceso de biorremediación se caracteriza por ser ampliamente utilizado como parte de las tendencias de investigación en el campo biológico debido a que presenta grandes ventajas respecto a otros métodos que emplean mecanismos químicos y/o industriales que afectan negativamente el entorno biológico de las plantaciones. Es importante destacar que

durante este proceso ocurren reacciones de oxidoreducción, procesos de absorción e intercambio iónico e incluso reacciones de acomplejamiento y quelación a nivel molecular [17].

Una de las ventajas de esta tecnología es que la forma de biodegradar al contaminante dependerá de su estructura química y las especies microbianas empleadas, aunque no todos los compuestos orgánicos son susceptibles a la biodegradación, los procesos de biorremediación se han usado con éxito para tratar suelos, lodos y sedimentos contaminados [17].

Los suelos representan un sistema naturalmente equilibrado, con niveles importantes de vulnerabilidad a distintos factores como lo son: la contaminación de aguas residuales, desechos industriales por metales pesados y uso irracional de fertilizantes, ocasionando de forma temporal o permanente daños en su composición que pueden afectar los ecosistemas y los seres vivos.

De acuerdo con esto, durante los últimos años se han incrementado los estudios sobre la recuperación de suelos contaminados con metales pesados. Según el trabajo de González [18] resumió las principales alternativas biológicas que pueden usarse para la descontaminación haciendo énfasis en que el uso de plantas, requiere considerar a sus microorganismos simbióticos mutualistas de la rizosfera. El autor concluye que la interacción planta-microorganismos rizosféricos necesita considerarse para incrementar el éxito de las alternativas biológicas, que se utilicen con Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs). La utilidad de los microorganismos rizosféricos dependerá básicamente del nivel de contaminación, del tipo de contaminante del suelo y de los objetivos establecidos para la recuperación.

En este contexto, Ortiz-Cano *et al* [19] indicaron que la incorporación de micorrizas incrementó significativamente la concentración de Pb y Cd en raíz, tallo y hoja de quelite. Los investigadores concluyeron que la planta de *Amaranthus hybridus* L tiene la capacidad de concentrar en sus tejidos plomo y cadmio al crecer en suelos contaminados conforme aumenta la edad de la planta independientemente de la agregación de micorrizas (*Entrophospora columbiana*, *Glomus*

intraradices, *G. etunicatum*, *G. clarum*), lo que hace que esta especie represente una solución potencial para la remediación de suelos contaminados con metales pesados.

Los hongos utilizados en el estudio presentaron una relación simbiótica con las plantas. Observándose una asociación positiva y significativa entre el porcentaje de colonización y la concentración de Pb y Cd en los tejidos de raíz, tallo y hoja. Mejorándose la colonización micorrízica y la capacidad extractora de Pb y Cd conforme se incrementó la edad de la planta [19].

Por otra parte, Muga [20] reportó que cultivos de *Cosmos bipinnatus* ubicados en zonas agrícolas aledañas a depósitos de desechos tóxicos fueron capaces de acumular metales pesados en raíces y partes aéreas. El estudio se realizó en un período de dos meses, demostrando la capacidad de absorción del *Cosmos bipinnatus* y su uso potencial como agente fitorremediador de suelos contaminados con metales pesados.

3. Metodología

Una búsqueda en la base de datos PATENTSCOPE fue desarrollada usando la ecuación ((bioremediation OR biosorption) AND cadmium) en el campo título. Los resultados fueron recuperados para el periodo 01/01/2012 – 31/12/2017, se seleccionó una (1) patente por familia y las veintiuna (21) solicitudes y concesiones de patentes relevantes fueron almacenadas, tratadas y analizadas.

Para las publicaciones científicas, se utilizó la base de Google Académico y en cuanto a la literatura gris las plataformas correspondientes a la Universidad Central de Venezuela, Universidad Simón Bolívar, Universidad de Carabobo, Universidad de Los Andes y la Universidad del Zulia para el mismo periodo de tiempo.

4. Resultados y Discusión

A continuación, estarán esbozados los resultados obtenidos a través del desarrollo del área de conocimiento realizando un análisis y evaluación a profundidad de las tendencias de investigación e invención sobre el tema de interés.

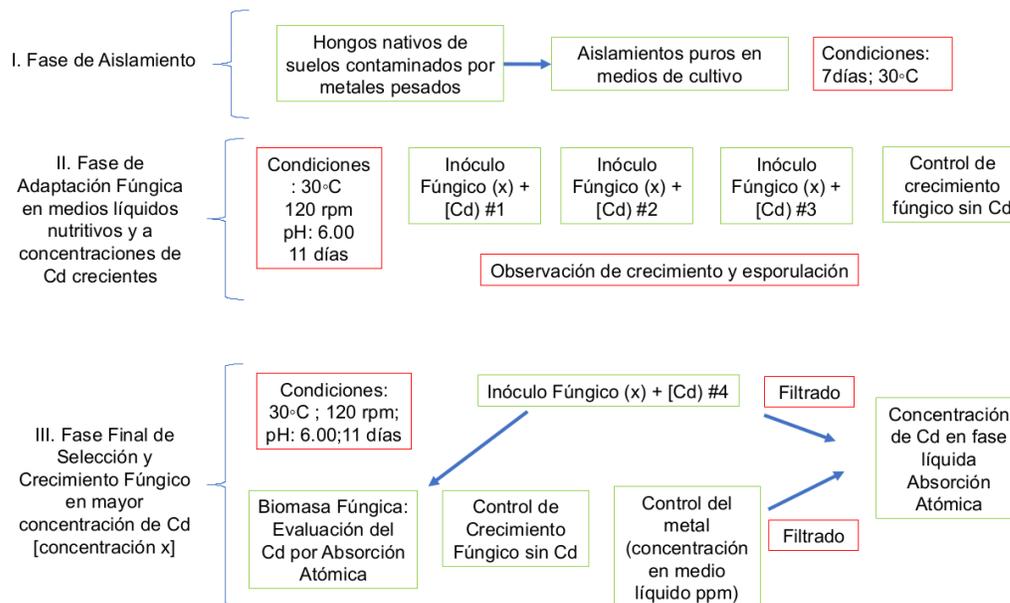


Figura 1: Metodología general para evaluar la capacidad de biosorción de hongos de vida libre nativos de suelos contaminados por Cd [17].

4.1. Tecnologías de biorremediación utilizadas para evitar la biosorción de cadmio por plantas de cacao

a) Biosorción de cadmio por cepas fúngicas nativas de suelos contaminados, tecnologías con microorganismos

La biosorción es un fenómeno ampliamente estudiado para la biorremediación de metales como el cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb), níquel (Ni), zinc (Zn) y cobre (Cu). La biosorción está determinada por los mecanismos altamente específicos para absorber, traslocar y acumular nutrientes [21]. Por ello, los investigadores, Guerra y colaboradores en el 2014 [17] estudiaron adaptar, seleccionar y evaluar en medios nutritivos líquidos, la capacidad de biosorción de cadmio por cepas fúngicas nativas de vida libre, a fin de obtener las más eficientes. Las cepas fueron aisladas de suelos contaminados por metales pesados en cultivos de cacao del municipio de San Vicente de Chucuri y el Carmen (Departamento de Santander-Colombia) y de suelos mineros de la región de California (Departamento de Santander-Colombia) en Colombia donde tomaron 15 muestras de suelo al azar con una profundidad de 20 cm desde de la

superficie, con un peso aproximado de 1 Kg para cada muestra. La Figura 1 muestra un diagrama de la metodología empleada.

Entre los resultados, los autores seleccionaron tres (03) grupos de organismos con características morfológicas comunes (morfoespecies) destacadas por su capacidad de adaptación y crecimiento en soluciones nutritivas y suplementadas con concentraciones crecientes de cadmio, el cual afecta las características morfológicas y la esporulación de los microorganismos dependiendo de la cepas empleadas.

La Tabla 2 refleja que en medios líquidos, la acumulación de los hongos es elevada y cumplen con el siguiente orden creciente de actividad; *Penicillium*–L004 (88,93 %) < *Trichoderma*–L006 (96,06 %) < *Aspergillus*–L007 (98,63 %). Los resultados permiten inferir que las cepas L006 y L007 pudiesen ser empleadas en la remoción de metales pesados según la metodología desarrollada.

b) Tecnologías de Fitorremediación ó Fitoextracción de Suelos Contaminados con cadmio utilizando *Galinsoga parviflora* (*Albahaca silvestre*)

En el marco de ofrecer alternativas para la fitorremediación de suelos contaminados con

Tabla 2: Porcentaje de captación de metales pesados por cepas aisladas de suelos contaminados. Municipios: San Vicente de Chucuri, El Carmen y California (Santander) [17].

| Nomenclatura por sitio de muestreo | Morfoespecie fúngica | Concentración de [Cd] ppm, en el filtrado | Concentración de [Cd] ppm en la biomasa fúngica** | Porcentaje de captación de Cd |
|------------------------------------|--------------------------|---|---|-------------------------------|
| EC5 | <i>Aspergillus</i> –L007 | 1,11 | 80,09 | 98,63 |
| EC2 | <i>Trichoderma</i> –L006 | 3,20 | 78,00 | 96,06 |
| SV6 | <i>Penicillium</i> –L004 | 8,99 | 72,21 | 88,93 |
| – | Control | 81,20 | 0,00 | 0,00 |

EC: Suelos Cacaoteros del Municipio del Carmen, Departamento de Santander, Colombia;

SV: Suelos de la Región Cacaotera de San Vicente de Chucuri, Departamento de Santander, Colombia.

* ** los valores obtenidos corresponden a la medida obtenida de muestras evaluadas por absorción atómica por triplicado.

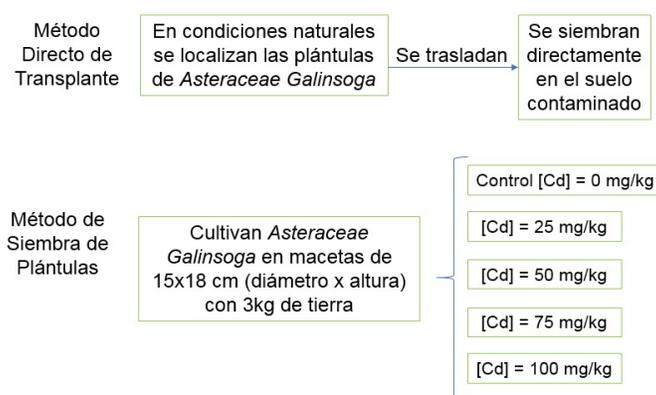


Figura 2: Metodología empleada por Mingan L., Lijin L, y col. como método de recuperación de suelos contaminados por cadmio utilizando la *Galinsoga parviflora* denominada comúnmente en Venezuela como: Albahaca silvestre bajo el registro de patente CN103447290B en la República Popular de China [21].

cadmio en plantaciones de cacao, los inventores Ming'an L., Lijin L, y col, patentaron en la República Popular de China bajo el registro (CN103447290B), un método de recuperación de suelos contaminados por cadmio utilizando la *Galinsoga parviflora* denominada comúnmente en Venezuela como Albahaca silvestre. La *Galinsoga p.* es una planta herbácea de florecimiento anual que se encuentra en mayor proporción en México y Argentina.

La Figura 2 muestra la metodología aplicada en la cual la *Galinsoga p.* en un lapso de 60 días, acumuló un promedio de 75 mg/kg de cadmio en forma de CdCl₂. El análisis estructural celular y de fotosíntesis indicó que las afectaciones al crecimiento y de biomasa no son significativas.

Los que nos permite inferir que su aplicación como herramienta para la remediación de suelos es prometedora [21].

4.2. Comparación de las tecnologías de microrremediación y fitoremediación de suelos contaminados con cadmio

Las nuevas tecnologías aplicadas para la recuperación de los suelos contaminados apuntan hacia el uso de métodos biorremediadores.

La metodología de microrremediación aplicada por la Universidad de Santander, se basó en las capacidades de crecimiento, adaptación y biosorción de hongos nativos con la finalidad de aplicarse en suelos agrícolas. Mostró resultados interesantes que indican una viabilidad técnica

Tabla 3: Comparación de los métodos de micorremediación y fitorremediación

| | | |
|--|---|---|
| Tecnología de remediación. | Biosorción de cadmio por cepas fúngicas nativas de suelos contaminados. | Fitorremediación de Suelos Contaminados con cadmio utilizando la <i>Galinsoga parviflora</i> (Albahaca silvestre). |
| Organismo o compuesto empleado. Disponibilidad del Organismo. | <i>Aspergillus</i> y <i>Trichoderma sp.</i> Se presentan naturalmente en diferentes ambientes, son hongos comunes de suelos agrícolas. | <i>Galinsoga parviflora</i> (Albahaca silvestre). Crece sin condiciones climáticas estrictas, es de fácil propagación, se puede cultivar con gran facilidad. Tiene éxito particularmente en suelos húmedos y se ve favorecido por un fotoperíodo largo y una alta intensidad de luz. |
| Aspecto económico. | Esta técnica resulta beneficiosa ya que los hongos de interés están disponibles en la naturaleza. | La Albahaca silvestre se reproduce rápidamente, al hacer una inversión en semillas luego se pueden obtener muchas plántulas, bien sea por la propia dispersión del viento, o de manera asexual. |
| Nivel Investigativo. | <i>In Vitro</i> , esto resulta ser una limitante ya que existen otros parámetros que evaluar a la hora de poner en práctica esta técnica, como lo es el pH del suelo, un factor determinante, y la interacción planta-hongo con el fin de maximizar los beneficios. Adicionalmente, debe existir un conocimiento técnico en cuanto a la manipulación de las cepas fúngicas a nivel de laboratorio en medio líquido. | <i>In Situ</i> , esto representa un gran avance, sin embargo hay que considerar que la Albahaca silvestre se debe cultivar bajo controles pertinentes ya que se puede convertir en maleza afectando así el desarrollo del cultivo. |
| Condiciones Mínimas. | Se deben considerar factores ambientales como el pH, la temperatura y la humedad, los cuales brindan las condiciones óptimas y son clave para el crecimiento de <i>Aspergillus sp.</i> y <i>Trichoderma sp.</i> | La Albahaca silvestre puede crecer en suelos con pocos requerimientos nutritivos. Es una hierba común que se encuentra a menudo en hábitat alterados y áreas agrícolas de muchas partes de regiones templadas y subtropicales del mundo. |

potencial como una herramienta para la extracción de cadmio. No obstante, el desarrollo de la invención, se encuentra a nivel de laboratorio, siendo necesario el estudio de diversos parámetros con el objetivo de conocer el alcance de la metodología y su escalamiento. En cuanto al proceso de fitorremediación registrado por la inventora Lin Lijin, es de menor desarrollo tecnológico, requiere una baja inversión y control. Sin embargo, la actividad de acumulación de las plantas depende de la concentración de cadmio en los suelos contaminados. Ambos procesos requieren de posteriores estudios para determinar su viabilidad técnica y económica.

Es importante recordar que los últimos años

los avances en las áreas de biotecnología e ingeniería recombinante han permitido potenciar las actividades y propiedades de los microorganismos. Los resultados alcanzados por las técnicas de biorremediación representan un primer paso hacia la solución de los suelos contaminados por metales pesados. En la Tabla 3, se comparan algunos aspectos de las diferentes tecnologías estudiadas.

5. Conclusiones

De acuerdo con la revisión realizada los estudios se centran en el uso de técnicas biorremediadoras basadas en biosorción de cadmio por cepas fúngicas nativas de suelos contaminados y fito-

rremediación de suelos contaminados con cadmio utilizando la *Galinsoga parviflora* (Albahaca silvestre). Siendo altamente efectiva el uso de las cepas fúngicas en medio acuoso, los tres tipos de cepas estudiados *Aspergillus-L007*, *Trichoderma-L006* y *Penicillium-L004* presentaron porcentajes de biosorción de cadmio en medio líquido de 98,63 %, 96,06 % y 88,93 % respectivamente a nivel de laboratorio. En el caso de la *Galinsoga parviflora* como técnica de fitorremediación fue patentada por investigadores de la República Popular de China, resultando una tecnología efectiva para suelos altamente contaminados por metales pesados, en este caso cadmio, tomando en cuenta que debe aplicarse previo al desarrollo de cultivos, donde exista una incidencia de luz solar considerable con una humedad controlada del 80 %.

Ambas biotecnologías tienen un uso potencial en suelos y aguas de riego contaminados con cadmio. La biorremediación mediante cepas fúngicas podría emplearse a través del agua de riego del cultivo de cacao. Por otra parte, el tratamiento de fitorremediación con *Galinsoga parviflora* tiene facilidades para ser aplicado a suelos. Sin embargo, para garantizar el éxito del control del cadmio en el fruto del árbol de *Theobroma Cacao L.* debe considerarse un estudio a nivel de laboratorio de ambas biotecnologías aplicadas de acuerdo a las características climatológicas de la región, y posteriormente llevar a escala piloto. Para el desarrollo de las cepas fúngicas, se requiere de un personal especializado, mientras que para la fitorremediación con *Galinsoga parviflora* es suficiente con conocimientos básicos de *buenas prácticas agrícolas*.

6. Referencias

- [1] M.A. Arvelo, T. Delgado, S. Maroto, J. Rivera, I. Higuera y A. Navarro. Estado actual sobre la producción y el comercio del cacao en América. Reporte técnico, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C. (CIATEJ), Jalisco, México, 2016.
- [2] A. Ramirez. Toxicología del cadmio. conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. *Anales de la Facultad de Medicina*, 63(1):51 – 64, 2002.
- [3] M.P. Benavides, S.M. Gallego, and M.L. Tomaro. Cadmium toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(1):21 – 33, 2005.
- [4] E. Chavez, Z.L. He, P. J. Stoffella, R.S. Mylavarapu, Y.C. Li, and V.C. Baligar. Chemical speciation of cadmium: An approach to evaluate plantavailable cadmium in ecuadorian soils under cacao production. *Chemosphere*, 150:57 – 62, febrero 2016.
- [5] G. Hernández-Ruiz, N. Álvarez Orozco y L. Ríos-Osorio. Biorremediación de organofosforados por hongos y bacterias en suelos agrícolas: revisión sistemática. *Corpoica Cienc Tecnol Agropecuaria*, 18(1):139 – 159, Enero – Abril 2017.
- [6] M. McBride. Comments on “adsorption of heavy metals by silicon and aluminum oxide surfaces on clay minerals”. *Soil Science Society of America Journal*, 55(5):1508, 1991.
- [7] S. Wang, Y. Wang, R. Zhang, W. Wang, D. Xu, J. Guo, P. Li, and K. Yu. Historical levels of heavy metals reconstructed from sedimentary record in the hejiang river, located in a typical mining region of southern china. *Sci Total Environ*, 532:645 – 654, Noviembre 2015.
- [8] X. Liu, Q. Song, Y. Tang, W. Li, J. Xu, J. Wu, F. Wang, and P.C. Brookes. Human health risk assessment of heavy metals in soil-vegetable system: a multi-medium analysis. *Sci Total Environ*, Octubre 2013.
- [9] D. Jordanova, S. Rao Goddu, T. Kotsev, and N. Jordanova. Industrial contamination of alluvial soils near Fe/Pb mining site revealed by magnetic and geochemical studies. *Geoderma*, 192:237–248, Enero 2013.
- [10] X. Xian. Effect of chemical forms of cadmium, zinc, and lead in polluted soils on their uptake by cabbage plants. *Plant and Soil*, 113:257 – 264, Enero 1989.
- [11] C. Jiménez-Tobón. Estado legal mundial del cadmio en cacao (*Theobroma cacao*): fantasía o realidad. *Producción + Limpia*, 10(1):89 – 104, Junio 2015.
- [12] C. Nava-Ruiz y M. Méndez-Armenta. Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *Arch Neurocién México*, 16(3):140 – 147, julio – septiembre 2011.
- [13] S. Clemens, M.G. Aarts, S. Thomine, and N. Verbruggen. Plant science: the key to preventing slow cadmium poisoning. *Trends Plant Sci*, 18(2):92 – 99, febrero 2013.
- [14] European Food Safety Authority. Cadmium in food: Scientific opinion of the panel on contaminants in the food chain. *EFSA Journal*, 7:1–139, 2009.
- [15] Reglamento (UE) Nro. 488/2014 de la comisión de 12 de mayo de 2014 que modifica el reglamento (CE) Nro. 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de cadmio en los productos alimenticios, Comisión Europea, Bruselas, Bélgica.

- [16] Amending regulation. (2013). (EC) Nro. 1881/2006 as regards maximum levels of cadmium in foodstuffs, World Trade organization, European Comission, Bruselas, Belgica.
- [17] B. Guerra, A. Sandoval Meza, L. Manrique González y S. Barrera Rangel. Ensayos preliminares *in vitro* de biosorción de cadmio por cepas fúngicas nativas de suelos contaminados. *Innovaciencia*, 2(1):53 – 58, Octubre 2014.
- [18] M. González-Chávez. Recuperación de suelos contaminados con metales pesados utilizando plantas y microorganismos rizosféricos. *Terra Latinoamericana*, 23:29 – 37, Agosto 2003.
- [19] H. Ortiz-Cano, R. Trejo-Calzada, R. Valdez-Cepeda, J. Arreola-Ávila, A. Flores-Hernández y B. López-Ariza. Fitoextracción de plomo y cadmio en suelos contaminados usando quelite (*Amaranthus hybridus L.*) y micorrizas. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 15(2):161 – 168, Julio 2009.
- [20] J. Muga-Paredes. Fitoextracción de cadmio en el suelo por medio del cultivo de cosmos (*Cosmos bipinnatus*), del distrito e corcon, harochirí 2017. Trabajo especial para obtener el título profesional de: Ingeniero ambiental, Universidad César Vallejo. Facultad de Ingeniería. Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Lima, Perú, 2017.
- [21] L. Ming'an, L. Lijin, R. Yajun, W. Zhihui, L. Xiulan, and J. Qian. CN103447290B A method of heavy metal cadmium contamination orchard soil remediation galinsoga based, 2016.

Tech note: technologies for the production of isopropyl alcohol (IPA)

Greysi Moreno–Cedeño, Natasha Tellería–Mata, Samuel Villanueva*, Magaly Henríquez

Gerencia de Proyectos de Investigación, Desarrollo e Innovación, Centro Nacional de Tecnología Química, Caracas, Venezuela

Abstract.- The objective of this technical note is identify the worldwide patented isopropyl alcohol (IPA) production technologies for the period 1900 – 2018. The data was collected through a keyword equation in the Patent Inspiration® patent base. The search conducted on 09/03/2018 showed an amount of 89 patent applications and concessions, of which 40 were relevant. From the analysis, three methods of obtaining IPA were identified: acetone hydration, hydration of propylene and by enzymatic activity of genetically modified bacteria. For the description of the technologies, the patents CN103449967B (2015), US5808161A (1998) and EP3348646A1 (2018) respectively, were selected. As a recommendation, the execution of economic feasibility studies for the production of IPA in Venezuela with national raw materials is proposed.

Keywords: IPA production; alcohol manufacturing; alkene hydration; acetone hydration; genetic modification of bacteria application.

Nota técnica: tecnologías para la producción de alcohol isopropílico (IPA)

Resumen.- La presente nota técnica tiene como objetivo identificar las tecnologías de producción de alcohol isopropílico (IPA, por sus siglas en inglés) patentadas a nivel mundial para el periodo 1900-2018. Se realizó el levantamiento de datos a través de una ecuación de palabras claves en la base de patentes Patent Inspiration®. La búsqueda realizada el 03/09/2018 mostró una cantidad de 89 solicitudes y concesiones de patentes, de las cuales 40 fueron relevantes. Del análisis, se identificaron tres métodos de obtención de IPA: hidratación de acetona, hidratación de propileno y por actividad enzimática de bacterias genéticamente modificadas. Para la descripción de las tecnologías fueron seleccionadas las patentes CN103449967B (2015), US5808161A (1998) y EP3348646A1 (2018) respectivamente. Como recomendación, se propone la ejecución de estudios de viabilidad económica para la producción de IPA en Venezuela con materias primas nacionales.

Palabras claves: producción de IPA; manufactura de alcoholes; hidratación de alquenos; hidratación de acetonas; aplicación de modificación genética de bacterias.

Recibido: 29 octubre 2018

Aceptado: 25 febrero 2019

1. Introducción

El 2–propanol, también llamado alcohol isopropílico, isopropanol, o IPA; es un disolvente de gran utilidad para las industrias farmacéutica, química y petroquímica. Cumple funciones como alcohol farmacéutico de fricción, disolvente en la formulación de pinturas, lacas, diluyentes, tintas, adhesivos, limpiadores de uso general, desinfectantes, cosméticos, artículos de tocador, desincrustantes, productos farmacéuticos, aceites

de motor y como intermediario químico para la producción de isopropilaminas, isopropiléteres y ésteres de isopropilo [1]. Su producción industrial es principalmente a través de la combinación de agua y propileno en una reacción de hidratación y en menor grado por medio de la hidrogenación de acetona.

En el caso de la hidratación existen dos vías de producción, la indirecta con ácido sulfúrico y la directa con catalizadores soportados. En el primer proceso se puede emplear un propileno de baja calidad, que predomina en EE.UU., mientras en el segundo es requerido un propileno de alta pureza, el cual es comúnmente utilizado en Europa. Es importante resaltar que estos procesos principalmente producen IPA en lugar de 1-

*Autor para correspondencia: S. Villanueva publicacionesgpidi.cntq@gmail.com

propanol debido a que la adición de agua o ácido sulfúrico al propileno cumple la regla de Markovnikov [2]. A pesar de que estas tecnologías son ampliamente conocidas, se hace necesario explorar las novedades respecto a la manufactura del alcohol.

En Venezuela, Pequiven S.A. es el mayor importador de IPA, seguido por entes privados dedicados al procedimiento aduanero de productos químicos, tal como lo es Integrity International Trading Venezuela C.A. A pesar de la tutela de Pequiven S.A. en materia de importación, la disponibilidad del IPA no es constante debido a los costos que esta acción implica. En consecuencia, la venta de 2-propanol en el mercado nacional queda sujeta a altos precios por parte de los importadores privados, basando su costo en el valor de divisas ilícitas o libertades de especulación de precios.

Con el fin de orientar el fortalecimiento del motor industrial nacional y apoyar en la reducción de importación de productos medios del sector petroquímico por medio de la elaboración de documentos de Vigilancia Tecnológica e Inteligencia Competitiva (VTelC). Se describen brevemente las posibles vías de producción del 2-propanol según las tecnologías patentadas hasta el momento, ventajas y su evolución histórica.

2. Metodología

El informe está basado en el abordaje informativo de la producción y los aspectos teóricos-técnicos de IPA. Se utilizó la ecuación de búsqueda

**((production OR manufacture OR obtaining)
AND (“Propan-2-ol” OR C3H7OH OR C3H8O
OR “2-Propanol” OR Isopropanol OR
“Rubbing alcohol” OR “sec-Propyl
alcohol” OR “s-Propanol” OR “iPrOH” OR
“Dimethyl carbinol” OR IPA))**

en el campo título de la plataforma de búsqueda Patent Inspiration®. Los resultados fueron recuperados para el periodo 1900-2018 (89 solicitudes y concesiones de patentes), almacenados, tratados y analizados. La búsqueda se realizó el 3 de septiembre de 2018.

3. Discusión de resultados

El análisis indicó que la primera patente para la producción de IPA fue concedida en el año 1930 a una empresa inglesa denominada Imperial Chemical Industries. El proceso se basó fundamentalmente en la hidrogenación de acetona en la fase de vapor con un catalizador de cobre y/o plata, el cual posteriormente sería cambiado por óxido azul de tungsteno por la misma empresa; junto con un óxido o hidróxido de un metal divalente [3]. Para el año 1947, fue publicada la obtención de IPA mediante la absorción de propileno y subproductos de éter diisopropílico ($C_6H_{14}O$) en fase líquida con ácido sulfúrico (H_2SO_4). Luego, varios procesos fueron patentados [4, 5] destacando como patrón la producción del alcohol por medio de la hidratación del propileno (C_3H_6). En ese sentido, la patente US5808161A, publicada en el año 1995 por la empresa ExxonMobil Oil Corp. describe claramente la tecnología [6].

Debido al interés de un grupo de países que contaban con una producción excedente de acetona de manera secundaria, las solicitudes y concesiones de patentes relacionadas a la hidratación de acetona repuntaron años después. Siendo China uno de los países líderes en patentamiento en la producción de 2-propanol bajo la tecnología de hidratación. Al respecto, la patente JPH0341038A, publicada en el año 1989 por la empresa Mitsui Chemicals, presentó la hidrogenación de acetona en presencia de un catalizador de óxido de cobre u óxido de cromo entre (60 a 200)°C [7]. Mientras que en el año 1998 la solicitud JPH0356428A mostró un proceso similar con rutenio (Ru) como catalizador y la patente JPH03141235A con níquel Raney® [8, 9]. Para el año 2015, la empresa Jiangsu Nine Heaven High Tech Co. Ltd obtuvo la concesión de la patente CN103449967B en la cual se incrementa la conversión de acetona hasta un 99,9 % y el rendimiento de isopropanol puede alcanzar el 99,5 %. Al mismo tiempo que la emisión de desechos orgánicos durante el proceso es muy baja [10].

En función de los avances e invenciones alcanzadas a nivel mundial en las décadas de 1990 y 2000 en las áreas de biotecnología y bioingeniería,

la empresa Genomatica Inc. presentó para el año 2010, la solicitud de patente US20100323418A1 titulada “Organismos para la producción de isopropanol, n-butanol e isobutanol”, luego concedida bajo el número US8993285B2 [11] donde microorganismos no naturales con genes que codifican enzimas catalizan isopropanol a partir de la 4-hidroxibutiril-CoA. Al año siguiente, su solicitud US2011201068A1 "Microorganismos y métodos para la co-producción de isopropanol con alcoholes primarios, diólos y ácidos", luego concedida bajo el número US8715971B2 en el año 2014, dio a conocer un proceso a partir de organismos microbianos con la capacidad de biosintetizar IPA en modo n-propanol (C_3H_8O)/IPA, 1,4-butanodiol ($C_4H_{10}O_2$)/IPA, 1,3-butanodiol ($C_4H_{10}O_2$)/IPA o ácido metilacrílico ($C_4H_6O_2$)/IPA. En ese sentido, ambos trabajos promovieron en el área de síntesis de compuestos orgánicos de interés industrial, una oleada creciente de investigaciones, procesos y mejoras en el segmento de producción de IPA a partir de procesos microbiológicos.

Por otro lado, la empresa Mitsui Chemicals Inc., líder en patentamiento y comercialización de IPA, conociendo las ventajas de la biotecnología mostró en el año 2013, bajo la solicitud de patente US2013005008A1, un proceso basado en la bacteria *Escherichia coli* (*E. coli*) con actividad enzimática potenciada como un sistema para la producción del alcohol a partir de materia vegetal [12] y con la solicitud US20130211170A1, la desactivación del represor transcripcional GntR en sinergia con un grupo de enzimas auxiliares para mayor eficiencia del proceso [13]. Otra empresa que resalta dentro del segmento de producción de compuestos orgánicos de interés industrial, es Evonik Industries AG, con la solicitud EP3348646A1, describiendo un método para la obtención de acetona, IPA, butanol y etanol desde un proceso de fermentación usando agua como absorbente. La tecnología es escalable de kilos a toneladas, no produce azeótropos, los rendimientos globales superan el 95 % en peso, los requerimientos energéticos son mínimos y la pérdida de absorbente es baja [14].

A continuación serán descritos los procesos patentados más representativos y relevantes para

la obtención del IPA que involucran reacciones de hidrogenación de propileno, hidratación de acetona y métodos de biotecnología combinados con ingeniería recombinante.

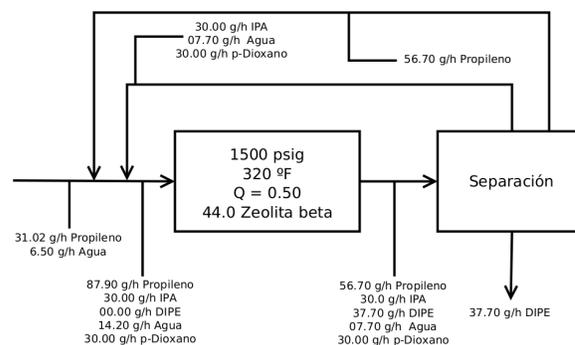


Figura 1: Diagrama de bloque de proceso expuesto en la patente US5808161A para la producción de IPA y éter diisopropílico por hidratación de propileno. Adaptado de [6]

US5808161A: Proceso para la producción de éter diisopropílico e isopropanol empleando un disolvente.

Solicitud de patente publicada en el año 1998 introducida por la empresa ExxonMobil Oil Corp. presenta un proceso, cuyo diagrama de flujo se muestra en la Figura 1, que inicia con la alimentación de una corriente olefínica rica en propileno y agua junto con p-dioxano como disolvente en la zona de eterificación e hidratación, haciendo uso de un reactor de lecho fijo en presencia de un catalizador ácido como zeolita beta, impregnada con dióxido de zirconio (ZrO_2). Los catalizadores tipo zeolita Y, ZSM-35 y MCM-22 también pueden ser empleadas. La reacción se realiza entre los 100 y 250 °C a una presión de 500 a 2000 psi. La relación olefina/agua empleada en la tecnología es aproximadamente de 0,52. Del efluente se recuperan el éter diisopropílico, IPA, disolvente inerte y el agua para luego ser incorporados en la zona de reacción.

En la invención, con la implementación de una temperatura de 330 °C y una alimentación de 40 % en peso de propileno, 9 % en peso de hidrógeno y 51 % de p-dioxano son obtenidos 40 % de propileno, 30,2 % de IPA, 23,9 % de DIPE, 5 % agua y 0,8 % de oligómeros en porcentaje másico.

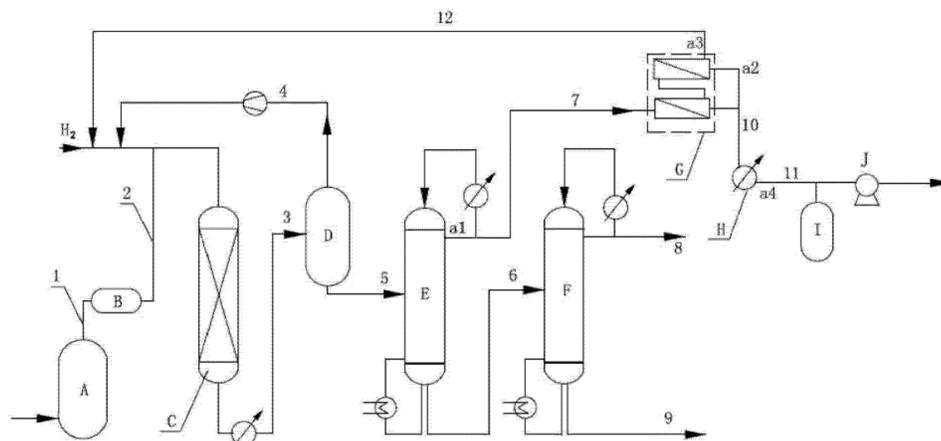


Figura 2: Diagrama de flujo de procesos para la producción de 2-propanol por medio de hidratación de acetona según la patente “CN103449967B” [10].

Leyenda:

- | | | | |
|-------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|
| A) evaporador; | B) sobrecalentador; | C) reactor de hidrogenación; | D) separador de gas-líquido; |
| E) primer fraccionador; | F) segundo fraccionador; | G) aparato de pervaporación; | H) condensador; |
| I) tanque de permeado; | J) bomba de vacío. | | |

CN103449967B: Proceso y dispositivo para aumentar el rendimiento de producción de isopropanol por medio de la hidrogenación de acetona.

La invención trata de un procedimiento para aumentar el rendimiento de IPA producido por hidrogenación de acetona. De acuerdo a lo mostrado en la Figura 2, la acetona ingresa al evaporador A para luego ser sobrecalentada en el equipo B, con el fin de evitar la formación de espuma líquida de arrastre que perjudique al catalizador de hidrogenación. La corriente vaporizada y sobrecalentada, se mezcla con hidrógeno para alimentar al reactor de hidrogenación C. El producto de reacción contenido en la corriente 3, se basa en IPA y compuestos no reaccionantes a base de hidrógeno que son ingresados al separador D en donde la mezcla líquido-vapor es condensada. En el separador D es obtenido por el tope una corriente 4 gaseosa rica en hidrógeno, la cual es comprimida y reingresada a la corriente 2 de alimentación del reactor de hidrogenación C; mientras que por el fondo es obtenida la corriente 5 líquida, compuesta por los productos de reacción.

La corriente líquida es ingresada en una columna de rectificación E para separar componentes

ligeros, siendo la corriente 7 extraída de la parte superior con isopropanol al 81 %, acetona al 8 % y agua 11 % en peso, formando un azeótropo ternario, el cual alimenta un equipo de pervaporación G, con membranas compuestas de quitosano, alcohol polivinílico, alginato de sodio, sílice o tamiz molecular.

El equipo de pervaporación G tiene como objetivo la deshidratación de la corriente 7, la cual resulta en la separación de IPA y acetona en la corriente 12 y del agua vaporizada como material permeado en la corriente 10. La corriente orgánica 12 es devuelta al reactor de hidrogenación para mejorar el rendimiento del proceso, mientras que la corriente acuosa 10 es condensada y almacenada en el tanque de permeado I. La corriente de fondo 6 del primer fraccionador E compuesta de IPA crudo, es ingresada en el segundo fraccionador F con el propósito de refinar el producto, obteniendo así por el tope una corriente 8 con IPA refinado con menos de 0,01 % en peso de agua y una corriente 9 de compuestos pesados por el fondo.

Entre las variables principales del proceso pueden destacar una relación de 4:1 en la alimentación del reactor de hidrogenación, las columnas de fraccionamiento cuentan con 30

platos teóricos y operan a presión atmosférica con una relación de reflujo equivalente a 4. El reflujo es empleado para controlar la temperatura del fondo, la cual es de aproximadamente 88 °C en el fraccionador E y de 100 °C en la columna F; mientras que en el tope la temperatura ronda los 56 °C para el primero y los 82 °C en el segundo. Respecto al equipo de pervaporación G, se emplea una temperatura de 120 °C y una presión absoluta en el lado de la materia prima de aproximadamente 0,2 MPa y de 2 MPa en el lado permeado. Siguiendo los parámetros mencionados, se obtiene una pureza de 99,99 % en peso para el IPA, 99,9 % para la acetona y un rendimiento de 99,5 % para el isopropanol.

EP3348646A1: Proceso microbiano para la producción de acetona, isopropanol, butanol y/o etanol mediante la absorción del producto por el agua.

La solicitud de patente publicada en el año 2018 e introducida por la empresa alemana Evonik Industries AG, muestra un proceso microbiano de reacondicionamiento de acetona en tres etapas, en el cual se emplea agua como absorbente. La tecnología es ambientalmente amigable, económica, escalable y sin presencia de azeótropos. El producto mayoritario es la acetona con un rendimiento global del 95 % en peso y se obtienen en menor proporción IPA, butanol y/o etanol. La *Escherichia coli* (*E. coli*) es la bacteria empleada en la biosíntesis. No obstante, es de gran importancia tomar en cuenta la recomendación del inventor de utilizar microorganismos genéticamente modificados para optimizar los resultados.

La Figura 3, muestra un diagrama de bloque del proceso que consta de tres etapas. La primera es la eliminación de la acetona del caldo de fermentación mediante la extracción con aire, dióxido de carbono (CO₂), hidrógeno (H₂), gas de síntesis, nitrógeno (N₂), monóxido de carbono (CO), oxígeno (O₂) o metano (CH₄). En la segunda etapa, la acetona es obtenida mediante el lavado de la corriente gaseosa por absorción con agua (H₂O). De acuerdo a la patente, el agua (H₂O) posee una tasa de pérdida menor al 5 % para una relación (H₂O)/acetona

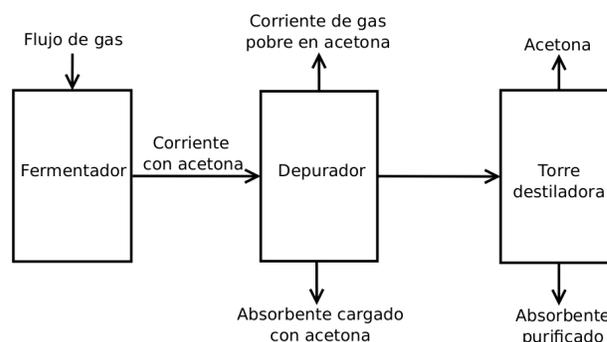


Figura 3: Diagrama de proceso para producción de acetona, isopropanol, butanol y/o etanol mediante la absorción de agua por el producto según la patente EP3348646A1.

de 19,5. En la tercera fase del proceso se lleva a cabo la separación destilativa a presión reducida de la acetona y los componentes secundarios, IPA, etanol (C₂H₆O), butanol (C₄H₁₀O) y el absorbente (H₂O), permitiendo la recirculación del absorbente purificado en la segunda etapa.

4. Conclusiones

Del estudio evolutivo de las tecnologías de producción de alcohol isopropílico (en inglés IPA) a partir del primer registro de patentes en el año 1930, se visualizan dos (02) grupos importantes según área de desarrollo: Síntesis Orgánica y Biotecnología-ingeniería recombinante. La primera representada por las reacciones de hidratación de propileno (1930 – 1946) e hidratación de acetona (1947 – 2016) y el segundo por la biosíntesis de microorganismos modificados genéticamente (2010- actualidad). Además se observaron incrementos sustanciales en los rendimientos globales desde 30,2 %, 80 % y 99,5 % según la evolución de las tecnologías.

En función de la disponibilidad de materias primas y del desarrollo de la industria petrolera nacional, se recomienda el estudio de aplicación de corrientes de propileno producidas en el país. No obstante, es importante evaluar esfuerzos orientados en el área de la biotecnología con la finalidad de profundizar procesos de mejores rendimientos, amigables con el ambiente y de mayor relación costo-beneficio.

5. Referencias

- [1] J. Nitz, M. Gerdorn, S. Kohlstruck, and W. Bluemke. EP3348646A1 - Mikrobielles verfahren zur herstellung von acetone, isopropanol, butanol und/oder ethanol umfassend die produktabsorption durch wasser. Patent, 2018.
- [2] D. Gutsche y D. Pasto. *Fundamentos de química orgánica*. Reverté, Madrid, España, 1979.
- [3] Imperial Chemical Industries LTC and G. Horsley. GB327224A - Production of isopropyl alcohol. Patent, 1929.
- [4] Distillers Co (Yeast) Ltd. and Distillers Co Ltd. GB642905A - Manufacture of isopropyl alcohol. Patent, 1947.
- [5] W. Bell, S. Brown, and J. Trewella. US5569789A - Multistage indirect propylene hydration process for the production of diisopropyl ether and isopropanol. Patent, 1996.
- [6] S. Brown and J. Trewella. US5808161A - Process for the production of diisopropyl ether and isopropanol employing a solvent. Patent 19, 1980.
- [7] H. Atsuhiko, H. Kato, N. Kitano, and Y. Ono. JPH0341038A - Production of isopropanol. Patent, 1989.
- [8] R. Hamana, H. Hase, and M. Inaba. JPH0356428A - Production of isopropyl alcohol. Patent, 1998.
- [9] H. Fukuhara and K. Taniguchi. JPH03141235A - Production of isopropanol. Patent, 1998.
- [10] G. Xuehong, K. Weifang, Y. Congli, and Q. Zusen. CN103449967B - Process and device for increasing yield of acetone-hydrogenation isopropanol production. Patent, 2013.
- [11] A. Burgard. US8993285B2 - Organisms for the production of isopropanol, n-butanol, and isobutanol. Patent, 2009.
- [12] Y. Matsumoto, J. Hirano, T. Morishige, T. Shirai, H. Takahashi, K. Amano, N. Takebayashi, M. Wada, H. Shimizu, C. Furusawa, and T. Hirasawa. US2013005008A1 - Highly productive isopropyl alcohol - producing bacterium. Patent 19, 2013.
- [13] K. Amano, T. Shirai, H. Takahashi, J. Hirano, Y. Matsumoto, N. Takebayashi, M. Wada, H. Shimizu, C. Furusawa, and T. Hirasawa. US9267156B2 - Isopropyl alcohol-producing bacterium having improved productivity by GntR destruction. Patent, 2010.
- [14] K. Amano, T. Shirai, J. Hirano, Y. Matsumoto, N. Takebayashi, M. Wada, H. Shimizu, C. Furusawa, and T. Hirasawa. US2013211170A1 - Isopropyl alcohol-producing bacterium having improved productivity by GntR destruction. Patent, 2013.

Índice de materias

A

algoritmo de búsqueda armónica, 61
análisis de sequías, 14
aplicación de modificación genética de bacterias,
119
aquatermolisis, 23, 96

B

biomasa granular, 44
biomasa suspendida, 44
biorremediación, 110
biotecnología, 110

C

cacao, 110
cadmio, 110
concentración micelar crítica (CMC), 4
crudos pesados, 23

D

dispersantes, 4

E

Erosión de suelos, 72
estudio de caudales, 96

G

gases ácidos, 23

H

heurísticas, 31
hidratación de acetonas, 119
hidratación de alquenos, 119

I

inteligencia competitiva, 110
inyección de vapor, 23

L

lógica difusa, 61

M

manufactura de alcoholes, 119
Modelo J-Bessel, 72
modelo matemático, 96

O

optimización, 31, 61

P

parámetros de calidad, 96
precipitación pluvial, 14
producción de IPA, 119
Producción de sedimentos, 72

R

ríos, 96
reactor de carga secuencial, 44
recuperación térmica, 23
resinas, 4

S

sequías hidrometereológicas, 14
software, 31
suelos, 110
surfactantes, 4

T

tensión interfacial, 4

V

vigilancia tecnológica, 110

Subjects index

A

acetone hydration, 119
acid gases, 23
alcohol manufacturing, 119
alkene hydration, 119
aquathermolysis, 23

B

bioremediation, 110
biotechnology, 110

C

cadmium, 110
cocoa, 110
critical micelle concentration (CMC), 4

D

dispersants, 4
drought analysis, 14

F

fuzzy logic, 61

G

genetic modification of bacteria application, 119
granular biomass, 44

H

harmony search algorithm, 61
heavy oil, 23
heuristics, 31
hydrometeorological droughts, 14

I

intelligence competitive, 110
interfacial tension, 4
IPA production, 119

J

J-Bessel model, 72

M

mathematical model, 96

O

optimization, 31, 61

Q

quality parameters, 96

R

rainfall, 14
resins, 4
rivers, 96

S

sediment yield, 72
sequencing batch reactor, 44
software, 31
soil erosion, 72
soils, 110
steam injection, 23
study of flows, 96
surfactants, 4
surveillance technological, 110
suspended biomass, 44

T

thermal recovery, 23

Índice de autores (*Author index*)

A

Almarza, Ángel, 61
Arteaga, Francisco, 61

B

Balza, Elianny, 96
Bolívar, Alejandro, 61

C

Cárdenas, Samuel, 72
Castro, Yefrenck, 23
Centeno, Alejandro, 61
Chávez-Bosquez, Oscar, 31
Cieza, Lorenzo, 14
Cova, Rosalyn, 96

F

Freytez, Estefania, 44

G

Guevara, Edilberto, 44, 72
Gutiérrez, Beatriz, 4

H

Henríquez, Magaly, 110
Hernández-Ocaña, Betania, 31
Hernández-Torruco, José, 31

J

Jiménez-Castellano, Isela, 31
Jiménez-Noda, Milagros, 96

L

Labrador, Henry, 4

M

Márquez, Adriana, 44, 72
Manganiello, Lisbeth, 96
Mejía, Jesús, 14
Moreno, Jesús, 96

N

Nieves, Yeimy, 110

P

Pérez, Sergio, 44
Parra, Norbis, 110
Pire, María, 44

R

Rey, Demetrio, 61, 72

S

Sánchez, Diego, 23

V

Vega, Cristóbal, 96
Villanueva, Samuel, 110
Viloria, Alfredo, 23

Z

Zapata, María, 96

Apéndices

Línea editorial

Misión científica

Revista Ingeniería UC es el principal organismo de difusión científica y tecnológica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.

El objetivo de Revista Ingeniería UC es la difusión de trabajos científicos tecnológicos en todas las áreas de la ingeniería, así como también ciencias afines aplicadas a la ingeniería.

Revista Ingeniería UC está adscrita a la Dirección de Investigación de la Facultad de Ingeniería. Es considerada por todos sus profesores como uno de los patrimonios más importantes de la Facultad de Ingeniería. Su primer volumen aparece en diciembre de 1992. Fundada por Dr. Edilberto Guevara en 1992 (actualmente Editor Honorario).

nivel local, Universidad de Carabobo y sus estado de influencia; nivel nacional, toda Venezuela; así como nivel internacional.

Todos los artículos son revisados por el Comité Editorial y arbitrados, a doble ciego, por el Comité Técnico y por especialistas en la materia.

Revista Ingeniería UC es publicada cada cuatro meses bajo los auspicios del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo (CDCH-UC).

Cobertura temática

Revista Ingeniería UC considerará para su difusión trabajos *originales e inéditos* (Los autores deben enviar la cartar de compromiso), en español e inglés. Manuscritos en las áreas de la ingeniería de todas sus especialidades, pero en particular en las áreas de industrial, eléctrica, mecánica, civil, química y telecomunicaciones; así como de las ciencias básicas aplicadas a la ingeniería: matemáticas, física, química, computación, biología, ciencias ambientales, bioingeniería, biotecnología, estadística, etc.

Foro de Revista Ingeniería UC

La audiencia a la cual está dirigida consta de todos los investigadores en las áreas de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas. En particular a los investigadores, profesores y estudiantes de Doctorado, Maestría y pregrado en las áreas de ingeniería y ciencias básicas afines. Esta audiencia es extendida a los gerentes de las áreas de innovación y desarrollo tecnológico del sector industrial. El foro tiene cubre las comunidades a

Editorial line

Scientific mission

Revista Ingeniería UC is the main body for scientific and technological diffusion at Facultad de Ingeniería of Universidad de Carabobo.

The Revista Ingeniería UC objective is the diffusion of scientific – technological works in all areas of engineering, as well as related sciences applied to engineering.

Revista Ingeniería UC is subscribed to Dirección de Investigación of Facultad de Ingeniería. It is considered by all its professors as one of the most important patrimonies of the Faculty of Engineering. Its first volume appears in December of 1992. Founded by Dr. Edilberto Guevara in 1992 (currently Honorary Editor).

Thematic coverage

Revista Ingeniería UC will consider for its diffusion original and unpublished works (The authors must send the commitment letter), in Spanish and English. Manuscripts in engineering areas of all its specialties, but particularly in the areas of industrial, electrical, mechanical, civil, chemical and telecommunications; as well as the basic sciences applied to engineering: mathematics, physics, chemistry, computation, biology, environmental sciences, bioengineering, biotechnology, statistics, etc.

Revista Ingeniería UC forum

The target audience is made up of all researchers in the areas of science, technology, engineering and mathematics. In particular the researchers, professors and students of Doctorate, Master's and undergraduate in the areas of engineering and related basic sciences. This audience is extended to innovation and technological development areas managers of the industrial sector. This forum has covers local communities, Universidad de

Carabobo and their state of influence; national level, all of Venezuela; as well as international level.

All articles are reviewed by Editorial Committee and refereed, double-blinded, by Technical Committee and by specialists in the field.

Revista Ingeniería UC is published every four months under the auspices of Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo (CDCH-UC).

Normas para la presentación de artículos

Generales

Línea editorial

Revista Ingeniería UC, considerará para su difusión trabajos *originales e inéditos* en ingeniería, en particular las áreas de industrial, eléctrica, mecánica, civil, química y telecomunicaciones; así como de las ciencias aplicadas a la misma.

Tipos de trabajos

- a Artículos de investigación inéditos con un máximo de veinte (20) páginas.
- b Notas técnicas con un máximo de cinco (5) páginas.
- c Artículos de actualización científica que resuman el Estado del Arte de un área específica de la ingeniería con un máximo de doce (12) páginas.
- d Artículo invitados especiales con un máximo de veinte (20) páginas.
- e Cartas al editor.
- f Artículos de tendencia tecnológica, estudios de prospectiva de I+D+i a medio y largo plazo de alta utilidad en el campo industrial.

Al enviar un artículo a Revista Ingeniería UC, el autor está comprometido formalmente con que el trabajo consignado es original e inédito, de igual manera manifiesta su conocimiento de las normas de la revista y acepta que sea sometido al proceso de arbitraje.

Estilo

La redacción de los trabajos puede realizarse en idioma castellano o inglés. El trabajo original debe ser redactado en formato \LaTeX o en su defecto en Microsoft Word.

Los trabajos en Word deben emplear una fuente de la familia Times, estar almacenado en

disco compacto (CD) o en su defecto enviarse por vía electrónica al correo de la revista revistaing@uc.edu.ve.

Los trabajos en \LaTeX deben incluir los archivos pdf, tex y una carpeta comprimida con las figuras en eps (o png)

Figuras

Las figuras deben ser en escalas de grises claros, no color, en formato vectorializado preferiblemente png o eps (también se admiten los formatos CompuServe gif o jpg, si estas son de alta calidad y trabajó en word) deben añadirse en archivos independientes y numeradas. Las leyendas o descripciones de la figuras no pueden estar embutidas en éstas, deben ser incluidas en el texto del trabajo y en un archivo aparte llamado Leyenda de Figuras.

Tablas:

Las tablas no pueden ser resaltadas por ningún tipo de color. Solamente los textos a resaltar mediante “negritas”. También deben incluirse las tablas en archivos aparte numerados y es necesario incluir un archivo con las leyendas de las tablas.

Toda tabla y/o figura deben ser numerada en arábigo (1, 2, ...), citada y suficientemente comentada en el texto del trabajo. La cita sería en la forma: “en la Figura 3”, “en la Tabla 2”, por ejemplo (sin abreviar). Toda tabla o figura debe tener un ancho máximo de 17,5 cm.

No es estilo de la revista frases como; “en la Figura siguiente” o en la “Tabla anterior”

El orden a seguir para la redacción del trabajo es el siguiente:

1. Portada.
2. Introducción.
3. Metodología o Desarrollo de la investigación.
4. Análisis y discusión de resultados.
5. Conclusiones.

6. Referencias.

La portada debe contener:

- Título del trabajo en castellano y en inglés, con un máximo de 20 palabras.
- Nombre(s) del autor(es) y su dirección(es) institucionales completa(s), dirección postal, correo electrónico del autor para correspondencia (sólo será publicado el correo electrónico del autor para correspondencia).
- Resumen del trabajo en castellano y en inglés (Abstract) con una extensión máxima de 200 palabras.
- Al final tanto del resumen como del abstract debe agregarse entre tres (3) a cinco (5) palabras clave.

Los encabezamientos de cada sección se escriben tipo título, mayúsculas sólo en la primera letra.

citas

Las citas de referencias en el texto, contendrán el nombre del autor principal seguido de corchetes con el número correspondiente a la referencia, por ejemplo: Engelbrecht [11], o simplemente el número de la referencia bibliográfica [11], sin citar al autor.

Referencias

Para los artículos en L^AT_EX se usará el estilo de bibliografía “unsrt”.

Las referencias bibliográficas se escribirán en orden de citación, deben ser completas y contener todos y cada uno de los datos para identificarla.

Se pueden citar:

- Artículos de revistas.
- Artículos de memorias de congresos.
- Artículos en colecciones.

- Capítulos de libro.
- Memorias de congresos.
- Libros
- Tesis doctorales
- Trabajos especiales de grado.
- Informes técnicos.
- Manuales técnicos.

No se permiten direcciones electrónicas ni páginas web.

En el caso de artículos de revista contendrán:

- Autor(es) (Apellidos nombres, tipo título).
- Título.
- *Nombre de la revista,*
- volumen,
- número,
- páginas y
- año de publicación

Por ejemplo:

[9] A. Carucci, A. Chiavola, M. Majone, and E. Rolle. Treatment of tannery wastewater in a sequencing batch reactor. *Water Science and Technology*, 40(1):253–259, 1999.

[10] A. Méndez, A. Agüero, E. Manrique y C. Ovalles. Cambios en la composición química de crudos medianos en procesos térmicos de recuperación mejorada. *Revista Sociedad Venezolana de Química*, 24(2):24–35, 2001.

En caso de libros ha de incluirse: Autor(es), *título*, editorial, lugar de publicación y año de publicación.

Por ejemplo:

[11] A. Engelbrecht. *Fundamentals of computational swarm intelligence*. John Wiley & Sons, 1 edition, 2006.

En caso de colección editada: Autor(es). Título, En: editor, año, *título*, volumen, editorial, lugar,

número de páginas y año de publicación.

Por ejemplo:

[20] C. Cobos, H. Dulcey, J. Ortega, M. Mendoza, and A. Ordoñez. A Binary Fisherman Search Procedure for the 0/1 Knapsack Problem. In O. Luaces, J.A. Gámez, E. Barrenechea, A. Troncoso, M. Galar, H. Quintián, and E. Corchado, editors, *Advances in Artificial Intelligence*, pages 447–457, Cham, 2016. Springer International Publishing.

Se recomienda a los autores tener en cuenta las normas internacionales de nomenclatura para la utilización de símbolos, unidades y abreviaturas. Adicionalmente, el uso de coma (,) como separador decimal

Notas Finales

Los artículos serán sometidos al proceso de arbitraje, doble ciego por pares, previo a su publicación. Se podrán entregar separatas por tema a solicitud del autor, cuyo costo será a convenir

Authors Information

General

Editorial line

Revista INGENIERÍA UC will consider for publication original and unpublished contributions in engineering, in particular areas of industrial, electrical, mechanical, civil, chemical and telecommunications, and applied science.

Type of Manuscripts:

- a Unpublished research articles with a maximum length of twenty (20) pages.
- b Technical Notes, with a maximum of five (5) pages.
- c State of the Art Articles (Update Articles) of a specific engineering field (maximum of twenty (20) pages).
- d Articles sent by invited guests, maximum of twenty (20) pages.
- e Letter to Editor.
- f Technological trend articles, medium and long-term R & D + i prospective studies of high utility in the industrial field.

Submitting an article to Revista Ingeniería UC, the author is formally committed to the consigned paper is original and unpublished, he manifest his knowledge of Revista Ingeniería UC standards and that his work will be refereed.

Article Style

Articles may be sent either in Spanish or English. The original work should be written using \LaTeX or in Microsoft WORD.

The Microsoft WORD works must employ font of Times family, to be stored in compact

disk (CD) or send electronically by email to revistaing@uc.edu.ve.

The works in \LaTeX must include the files pdf, tex and a folder with the figure in eps.

The figures must be in gray scale, no color, preferable in format png or eps (also admit the formats CompuServe gif or jpg if these are of high quality) must to be added in records separated and numbered. Figures caption or descriptions can not be into these, must be includes in the text of the work and in a apart file called Figure Caption.

The table can not be protruded by any type of color. Only the texts to be produced by means of "bold type". Also must to be included in others files numerated and it is necessary to include a file with table caption.

All table and/or figure must be numbered in arabic (1, 2, 3, . . .) and cited in the text of the work. The quote would be in the manner: "In Figure 3", "in Table 2", for example (without abbreviating). All board or figure must have a wide maximum of 17,5cm.

The writing sequence for the articles shall be as following:

1. Title page.
2. Introduction.
3. Methodology or Research development.
4. Analysis and Discussion of results.
5. Conclusions.
6. References.

The Title page should contain:

- Title of the work in Spanish and English, maximum 20 words.
- Full name(s) of author(s) with Full Institutional Address(es) (Address, Telephone, Email).
- Summary of the work in Spanish and in English (Abstract) with a maximum of 200

words for Unpublished, State of the Art articles and Technical Notes.

- At the end of the Summary in Spanish and Abstract in English three to five (3 to 5) Key Words should be added.

Text references must contain the name of the main author followed by the corresponding number of reference; for example: Engelbrecht [11], or simply [11] with no author name.

For L^AT_EX work will use bibliography style “unsrt”.

References will be written in order of citation, complete and should contain: author(s) (in caps and lower case), full title, journal, volume, number, pages and year of publication. For example:

[9] A. Carucci, A. Chiavola, M. Majone, and E. Rolle. Treatment of tannery wastewater in a sequencing batch reactor. *Water Science and Technology*, 40(1):253–259, 1999.

[10] A. Méndez, A. Agüero, E. Manrique y C. Ovalles. Cambios en la composición química de crudos medianos en procesos térmicos de recuperación mejorada. *Revista Sociedad Venezolana de Química*, 24(2):24–35, 2001.

In the case of Books: Author(s) (in caps and lower case), *title*, publisher, place and year of publication should be included. For example:

[11] A. Engelbrecht. *Fundamentals of computational swarm intelligence*. John Wiley & Sons, 1 edition, 2006.

Work in an edited collection: Author(s) (in caps and lower case), *title*. In: editor, *title*, volume, publisher, place and year. For example:

[20] C. Cobos, H. Dulcey, J. Ortega, M. Mendoza, and A. Ordoñez. A Binary Fisherman Search Procedure for the 0/1 Knapsack Problem. In O. Luaces, J.A. Gámez, E. Barrenechea, A. Troncoso, M. Galar, H. Quintián, and E. Corchado, editors, *Advances in Artificial Intelligence*, pages 447–457, Cham, 2016. Springer International Publishing.

It is recommended to the authors to follow the International Nomenclature Norms (symbols, units

and abbreviations). Additionally, use comma(,) as decima separator.

Final Notes

Articles will be submitted for the reviewing process before they can be published. Offprints can be sent for article with a request from the Author(s). Any charge will be arranged by mutual agreement.

Carta de compromiso

Envíe junto con su trabajo la siguiente carta al Comité Editorial de Revista Ingeniería UC:

Ciudadanos
Director Editor en jefe y demás
Miembros del Comité Editorial
Revista INGENIERÍA UC
Presente.

Por medio de la presente envío a Ud.(s) el manuscrito del trabajo titulado:

para que sea sometido a evaluación para la publicación.

Manifiesto que:

Este trabajo es original e inédito: no ha sido publicado, no es duplicado, ni redundante; no está siendo sometido simultáneamente a arbitraje para su publicación por ningún medio de difusión, que los datos son originales y verídicos.

El autor y los coautores ceden los derechos de autor a la Revista INGENIERÍA UC, pero mantiene sus derechos como autor intelectual.

El trabajo, tanto en su texto como las tablas y figuras ha sido elaborado de acuerdo a las Instrucciones para los Autores publicadas por Revista INGENIERÍA UC, y que las referencias están directamente relacionadas con el trabajo.

Se designa como autor de correspondencia al autor o coautor que lo indique, con quien el Comité Editorial mantendrá comunicación a través del correo electrónico revistaing@uc.edu.ve, quien será responsable ante autores y coautores y dará respuesta rápida a los requerimientos del Comité Editorial.

No se conocen conflictos de intereses, y de haberlos los autores y coautores están obligados a indicarlo en el original, junto a la fuente de financiamiento.

Firma:

Nombre y apellido:

El autor para correspondencia:

Compromise letter

Send together with your paper the following letter to Editorial Committee:

Citizens
Director Chief Editor and other
Members of Editorial Committee
Revista INGENIERÍA UC
Present.

I hereby send you the manuscript of the work entitled:

to be submitted for evaluation to publication.

I declare that:

This work is original and unpublished: it has not been published, it is not duplicated, nor redundant; it is not being simultaneously submitted to arbitration for publication by any diffusion means, that the data are original and truthful.

The author and coauthors assign the copyright to Revista INGENIERÍA UC, but maintains their rights as an intellectual author.

The work, in its text as the tables and figures has been elaborated according to the Authors Instructions published by Revista INGENIERÍA UC, and that the references are directly related to the work.

The author or coauthor who indicates it is designated as correspondence author, with whom Editorial Committee will maintain communication via email revistaing@uc.edu.ve, who will be responsible for the authors and co-authors, and will respond quickly to the requirements of the Editorial Committee.

There are no known interest conflicts, and if there are the authors and coauthors are obliged to indicate in the original, next to funding source.

Signature:

First name and surname:

Correspondence author:

Índices de Revista Ingeniería UC

Revista Ingeniería UC está indexada en:



Universidad de Carabobo

Autoridades

Jessy Divo de Romero

Rectora

Ulises Rojas

Vicerrector Académico

José Ángel Ferreira

Vicerrector Administrativo

Pablo Aure

Secretario

Reimer Romero

Director Ejecutivo (e) CDCH-UC

Autoridades de la Facultad de Ingeniería

Prof. José Luis Nazar

Decano

Prof. Enrique Pérez Pérez
Director Esc. Ing. Industrial

Prof. Manuel Elías Jiménez Bahri
Asistente al Decano

Prof. Reny Marin
Director Consejo Facultad

Prof. César Rodolfo Ruiz
Director Esc. Ing. Eléctrica

Prof. Carlos Brito
Director de Asuntos Estudiantiles

Prof.^a Marianna Barrios León
Directora de Postgrado

Prof. Carlos R. Alfonzo A.
Director Esc. Ing. Mecánica

Prof. Edson Martínez Oberto
Director Esc. Ing. Civil

Prof. Luis E. Di Stefano
Director de Administración

Prof. Carlos Hernández
Director Esc. Ing. Química

Prof. Carlos Cochiarella
Director de Asuntos Profesorales

Prof. Pablo Baricelli
Director del Centro de Investigaciones
Químicas

Prof. Ángel D. Almarza M.
Director de Investigación y Producción
Intelectual

Prof.^a María Teresa Cruz
Directora de Docencia y Desarrollo Curri-
cular

Prof. César O. Seijas Fossi
Director del Centro de Procesamiento de
Imágenes

Prof. César Cuperto Ruiz P.
Director Esc. Ing. de Telecomunicaciones

Prof.^a Lin Hurtado
Directora Estudios Básicos

Prof.^a Marlin Gómez
Directora de Extensión

Prof. Jesús J. Jiménez Grimán
Director del Instituto de Matemática y
Cálculo Aplicado

Prof. David E. Duarte G.
Dirección de Tecnologías de la Información
y Comunicación

REVISTA INGENIERÍA UC

La Revista Ingeniería UC es una publicación periódica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, adscrita a la Dirección de Investigación. Es arbitrada, indizada en REVENCYT (Venezuela) ; Actualidad Iberoamericana (CIT-Chile); IET/INSPEC (Unitec Kingdom UK); LATIDEX-Catálogo (México); REDALYC (México); Periódica (México) y está incluida en Ulrich's International Periodical Directory (USA), de Publicación Internacional; Emerging Sources Citation Index, Thomson Reuters.

Se publica cada cuatro meses bajo los auspicios del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo (CDCH-UC). Se aceptan trabajos en Castellano e Inglés. Todos los trabajos son revisados por el Comité Editorial, Arbitrados por el Comité Técnico y por especialistas en la materia.

Dirección postal: Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Bárbula-Valencia, Código Postal 2008, estado Carabobo, Venezuela.

Correo-e: revistaing@uc.edu.ve

Página Web: <http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/>; <http://revista.ing.uc.edu.ve/>

Revista Ingeniería UC, ISSN 1316–6832
Abril 2019, Volumen 26
Número 1

Revista Ingeniería UC se encuentra indexada en:
Revencyt (Venezuela) – índice de revistas venezolanas de ciencia y tecnología;
Actualidad Iberoamericana (Chile) CIT;
IET/INSPEC (United Kingdom); Latindex (México); Redalyc (México);
Periódica (México);
Emerging Sources Citation Index, Thomson Reuters.

Contenido general: páginas V y VII.



Revista INGENIERÍA UC
Impreso en Publicaciones de la
Facultad de Ingeniería de la
Universidad de Carabobo,
Campus de Bárbula,
Venezuela