

septiembre – diciembre 2017, Vol. 24, N° 3, ISSN 1316–6832



Revista

INGENIERÍA UC

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

Disponible en:
Revista Ingeniería UC
www.ing.uc.edu.ve/revistaing
revista.ing.uc.edu.ve

VALENCIA – VENEZUELA

ISSN 1316-6832
Depósito legal pp 92.0200

Revista Ingeniería UC

Revista indexada en:
REVENCYT (Venezuela); Actualidad Iberoamericana (CIT-Chile);
IET/INSPEC (United Kingdom UK);
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

Editor Jefe

Dra. Lisbeth Manganiello
Universidad de Carabobo
Facultad de Ingeniería
Valencia, Venezuela

Comité Editorial

Dr. Adelmo Ortiz Conde
USB, Venezuela
Dr. Ángel Ríos Castro
Universidad de Castilla La Mancha, España
Dr. Antonino Caralli
Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Carlos Martínez
Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Enrique Barbien
University of Houston, USA
Dr. Guillermo Ramírez
Universidad Central de Venezuela, Venezuela
Dr. Herbert J. Sira R.
CINVESTAV-IPN, México
Dr. Johnny Bullon
Universidad de los Andes, Venezuela

Dra. Maura Vázquez de Ramírez
Universidad Central de Venezuela, Venezuela
Dr. Merlin Rosales
Universidad del Zulia, Venezuela
Dr. Pablo Baricelli
Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Roberto Callarotti
IVIC, Venezuela
Dr. Sergio Mora
Universidad de Santiago de Chile, Chile
Dr. Teodoro García
Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. José A. Díaz
Universidad de Florida, USA

Editores Honorarios

Dr. Edilberto Guevara
Facultad de Ingeniería
Universidad de Carabobo, Venezuela

Dr. Francisco Arteaga
Facultad de Ingeniería
Universidad de Carabobo, Venezuela

Asesores a la Editora Jefe:

Dr. Cristóbal E. Vega G.
IMYCA, Facultad de Ingeniería
Universidad de Carabobo

Ing. Jesús Jiménez, MSc.,
CATS, Facultad de Ingeniería
Universidad de Carabobo

Comité Técnico*

Dr. Eliecer Colina, ULA
Dr. Francisco García Sánchez, USB
Dr. Gian Franco Passariello, USB
Dr. Giovanni De Mercato, USB
Dr. Luis Vallés, UC
Dr. Alfredo Varela, UC
Dr. Sergio Pérez, UC
Dr. Antonio Bonsjak, UC
Dra. Susana Salinas de Romero, LUZ
Ing. Donato Romanello, MSc, UC
Ing. Thalia San Antonio, MSc, UC
Dra. Nereida Sánchez, UC
Ing. Lucila Martino, UC
Ing. Ricardo Villegas, MSc, UC

Ing. Paulino Del Pino, MSc, UC
Ing. Carlos Lameda, MSc, UNEXPO
Ing. Alfonso Alfonsi, UDO
Ing. Ángel Vellegas, UC
Dr. Demetrio Rey Lago, UC
Dr. Alfonso Zozaya, UC
Dr. José A. Díaz, UC
Dr. Guillermo Montilla, UC
Dra. Laura Sáenz, UC
Lic. Atilio Morillo, MSc, UC
Ing. Sergio Vellazana, MSc, UC
Lic. Reina Windevoxel, MSc, UC
Ing. Enrique Pérez, UC
Ing. María T. Cruz, UC

Dr. Cesar Seijas F, UC
Dr. Fernando Mora, USB
Dr. Enrique Cázarez Rivera, ITESM, México
Dra. Yadira Martínez, UC
Ing. Luis Llave, UC
Ing. Johel Rodríguez, MSc, UPV, España
Lic. Celeste Fernández, MSc, UC
Ing. José R. Pacheco, UC
Dr. Cristóbal E. Vega González, UC
Ing. Teddy Rojas, MSc, UC
Ing. Carlos Jiménez, MSc, UC
Dr. Luis Melián, UC
Ing. Antonio Millán, MSc, UC
Ing. Jesús Jiménez, MSc, UC

Ing. Wilmer Sanz, MSc, UC
Ing. Carlos Hernández, MSc, UC
Ing. Enrique Flores, MSc, UC
Dra. Damelys Zabala, UC
Ing. Jennifer Aparicio, UC
Dra. Lilly Marcano, UC
Ing. César Martínez, UC
Ing. Alejandro Centeno, UC
Ing. Enrique Flores, MSc, UC
Ing. Franklin Camejo, UC
Ing. Vanesa Altomares, UC
Dra. Sandra Cabello, UC
Ing. Julio Pineda, UC

* 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/>

<http://revista.ing.uc.edu.ve/>

Correo-e: revistaing@uc.edu.ve

Diseño y Diagramación: Revista INGENIERÍA UC, Dirección de Investigación - IMYCA (C. Vega) - CATS (J. Jiménez) en L^AT_EX, Facultad de Ingeniería, Valencia, Venezuela
Web master: Ing. Francisco Ponte, Biblioteca Central, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela



Revista INGENIERÍA UC
VALENCIA - VENEZUELA

ISSN 1316–6832



Revista INGENIERÍA UC

ORGANO DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD DE CARABOBO

Valencia – Venezuela



Contenido General, (*General content*)

XVIII Editorial

J. L. Nazar, L. Manganiello

-
- 279 *Environmental assessment of the Urama Wetland, Venezuela*
Valoración ambiental del Humedal Urama, Venezuela
Nereida López, Edilberto Guevara Pérez
-
- 290 *VHDL Model of configurable neural networks applied to decoding in cognitive radio*
Modelo en VHDL de redes neuronales configurables aplicadas a decodificación en radio cognitivo
Cecilia E. Sandoval-Ruiz
-
- 302 *Susceptibility to the intergranular attack of duplex stainless steel exposed to nitric acid with 65% concentration in boiling*
Susceptibilidad al ataque intergranular del acero inoxidable dúplex expuesto al ácido nítrico con 65% de concentración en ebullición
Laura Sáenz Palencia, Felipa Pevalonic, Oskar García
-
- 309 *Study of the mathematical equation of the heart rate on the base of the viscous damped oscillator*
Estudio de la ecuación matemática de la frecuencia cardíaca en base del oscilador amortiguado viscoso
Aleida Cantor Rudas
-
- 314 *Evaluation of oil properties of fruit pulp pijiguao (*Bactris Gasipaes H.B.K*) for use in cosmetics industry*
Evaluación de las propiedades del aceite de la pulpa del fruto de pijiguao (*Bactris Gasipaes H.B.K*) para su aplicación en la industria cosmética
V. Mujica, M. Rodríguez, I. Lopez, D. Mendez
-
- 327 *On the Admissibility of LPV Descriptor Systems*
Sobre la admisibilidad de sistemas LPV descriptores
Addison Ríos, Miguel Narváez
-
- 341 *Synthesis and characterization of tertiary hydrotalcites and their oxides: $Me^{2+}Fe^{3+}Al^{3+}$ ($Me^{2+} = Co^{2+}, Mg^{2+}, Ni^{2+}$ o Zn^{2+})*
Síntesis y caracterización de hidrotalcitas terciarias y sus óxidos: $Me^{2+}Fe^{3+}Al^{3+}$ ($Me^{2+} = Co^{2+}, Mg^{2+}, Ni^{2+}$ o Zn^{2+})
E. Oviedo, P. Ayrault, S. Brunet, C. Linares
-
- 351 *Determination of the Behavior of the Hardness as a function of the Traction Effort in an AISI 1005 Steel*
Determinación del Comportamiento de la Dureza en función del Esfuerzo de Tracción en un Acero AISI 1005
I. Dauhajre, C. Alfonzo, A. Porrello, C. Torres
-

Contenido General (Continuación), (*General content*)

-
- 356 *Evaluation of solidifying agents in the process stabilization solidification applied to chemical sludges*
Evaluación de agentes solidificantes en el proceso estabilización/solidificación aplicado a lodos químicos
J. Pérez, Y. Noguera, B. Paricaguán
-
- 365 *Characterization of fertilizer based on potassium dihydrogen phosphite obtained with different metallic reducing agents*
Caracterización de fertilizante basado en el fosfito diácido de potasio obtenido con diferentes agentes reductores metálicos
A. Núñez, A. Rodríguez, J. Medina, B. Paricaguán
-
- 372 *Determination of constructive operation performances fitted to probability distributions by manual simulation means*
Determinación de rendimientos de operaciones constructivas ajustadas a distribuciones de probabilidad mediante simulación manual
G. Guerra, A. Tortosa, F. Soto, R. Marin
-
- 383 *Inference for stochastic differential equations models using filtering algorithms*
Inferencia para modelos de ecuaciones diferenciales estocásticas usando algoritmos de filtrado
S. Infante, A. Hernández, J. Ordoñez, L. Sánchez
-
- 400 *Depuration of gaseous emissions from the production of pentolite*
Depuración de las emisiones gaseosas procedentes de la producción de pentolita
I. Lopez, V. Mujica, M. Rodríguez
-
- 410 *Evaluation of uncertainty in deterministic models*
Evaluación de la incertidumbre en modelos determinísticos
Aleida Cantor Rudas
-
- 417 *Water quality assessment in a Caribbean saltwater wetland*
Evaluación de la calidad del agua en un humedal de agua salada del Caribe
R. Pérez, F. Riveiro, M. Jiménez–Noda, L. Manganiello, C. Vega, R. Cova, J. Moreno
-
- 428 *Tech note: Water quality index of Albarregas and Milla rivers of Merida State, Venezuela*
Nota técnica: Índice de calidad de agua de los ríos Albarregas y Milla del Estado Mérida, Venezuela
O. Mayorga, M. Ramírez, J. Mayorga
-
- 433 Author index (*Índice de autores*)
435 Índice de materias
437 Subjects index
-

Contenido General (Continuación), (*General content*)

Apéndices

- 1 **Normas para la presentación de artículos**
 - 4 **Authors Information**
 - 6 **Carta de compromiso**
 - 7 **Índices de Revista Ingeniería UC**
 - 8 **Comité editorial**
-

Editorial

La Revista INGENIERÍA UC en su número tres (3) correspondiente al lapso septiembre – Diciembre del año 2017, abre su edición con la siguiente reflexión: ¿qué podemos aprender de las crisis? Las crisis son momentos de prueba, fuertes y para nada alentadores. Pero en medio de los pesares las crisis tienen una cara positiva que muchas veces la desesperación no permite apreciar, en la palabra de Dios, La Biblia, él nos exhorta a sentirnos privilegiados porque después de pasar la prueba saldremos más que fortalecidos*. Ver la luz al final del túnel no es fácil y mucho menos cuando el panorama que nos arroja muestra todo lo contrario, no obstante el poder entregar este número de la Revista INGENIERÍA UC en medio de tantas carencias nos muestra que los universitarios somos las luces de este oscuro camino que nos llevara nuevamente a ver nuestra amada Venezuela y sus altas Casas de Estudio, nuestras universidades, resurgir con más fortaleza que nunca, nunca olvidemos lo que somos y nuestra misión en la vida, somos la Universidad de Carabobo – UC y seguiremos siendo UC por siempre.

Abrimos el presente número con una contribución de López y Guevara, donde se plantea la valoración ambiental del humedal, Urama, basando su estudio en los servicios que prestan y sus beneficios a la población. Sandoval–Ruiz, en su investigación, estudió los componentes de la etapa de codificación en sistemas de comunicación digital y su implementación con redes neuronales bajo el enfoque de radio cognitivo. Sáenz y colaboradores evaluaron la susceptibilidad al ataque intergranular del acero inoxidable dúplex SAF 2507, expuesto a ácidos inorgánicos de alta concentración, se observó un deterioro de la microestructura cuando se le realizaron análisis espectroscópicos. Cantor, nos expone en su trabajo la relación matemática entre la frecuencia cardiaca y un oscilador amortiguado viscoso, presentando analogías ambos sistemas, lo que permite el uso de una ecuación matemática para la explicación del comportamiento descrito. Mujica y colaboradores aportan en su trabajo un aplicación a la industria cosmética mediante el uso del aceite de pijiguo, las pruebas arrojan que se trata de un producto atóxico y con características comparables al aceite de oliva entre otros.

Ríos y Narváez, centran su trabajo en el análisis y síntesis de controladores estabilizantes, basados en realimentación estática de salida (SOF) para una clase de sistemas descriptores lineales a parámetros variantes (LPV), para ilustrar los resultados y el desempeño del control robusto, presentaron dos ejemplos numéricos. Oviedo y Colaboradores entre los aportes de su investigación se destaca que el catión divalente tiene gran influencia en los parámetros de la celda unidad de las hidrotalcitas sintetizadas, Por otro lado, no se encontró una relación directa entre las propiedades texturales de las hidrotalcitas obtenidas o sus óxidos con la naturaleza del metal divalente o la relación Fe^{3+}/Al^{3+} utilizada. Dauhajre y colaboradores describen el comportamiento de la dureza de un acero AISI 1005 al someterlo a diferentes esfuerzos de tracción, durante esta etapa se observó que el material va incrementando su dureza a medida que se va traccionando, seguidamente cuando se acerca al límite de fluencia esta propiedad mecánica comienza a disminuir hasta llegar al valor que tenía originalmente.

Pérez, Noguera y Paricaguán, estudiaron diferentes agentes solidificantes para el proceso de estabilización/solidificación aplicado a lodos químicos provenientes de la etapa de impresión en la producción de cartón corrugado, logrando reducir los niveles de plomo en el lixiviado en 98,9%. Nuñez

y Colaboradores, caracterizaron fertilizantes obtenidos de fosfito diácido de potasio sintetizado a partir del ácido fosfórico (H_3PO_4) por un proceso de óxido-reducción con los agentes reductores metálicos zinc (Zn) y magnesio (Mg). Para esto, se realizaron ensayos de pH, conductividad, densidad, fósforo total bajo el método espectrofotométrico molibdovanadofosfato, determinación de la cantidad de fósforo como fosfito en el fertilizante y metales presente tales como Zn, Mg y K, por medio del método de plasma de inducción acoplada (ICP). Guerra, Tortosa, Soto y Marín evaluaron los tiempos de ejecución de actividades constructivas para determinar estadísticos que faciliten el desarrollo de una metodología de simulación de dichos procesos y así obtener rendimientos adaptados a la realidad de cada empresa y obtener así tiempos certeros a la ejecución de la obra. Infante y colaboradores muestran dos modelos estocásticos que provienen del mundo de las finanzas, en el estudio empírico, se demuestra que los filtros tienen buena performance en la estimación de los estados y no se observó diferencias significativas entre los valores estimados y los valores verdaderos. López y colaboradores presentaron un método para reducir las emisiones de gases contaminantes provenientes de una empresa productora de pentolita. Empleando el método de Fine se puede reducir el grado de peligrosidad de 1500 a 30 al instalar el sistema, logrando pasar de una condición de alto riesgo a una de no emergencia en el ambiente de trabajo. Cantor en su trabajo presenta la evaluación de la incertidumbre en un proceso de medición de variables de manera directa e indirecta según el modelo matemático que se presente. Pérez y colaboradores estudiaron un humedal de la zona del Caribe Venezolano de gran importancia por ser considerado parque nacional y un reservorio de especies donde destacan las aves migratorias, los resultados del estudio son de gran utilidad para la entidad gubernamental a fin de regular la actividad del hombre en la zona. Cerramos la edición de este número con una interesante nota técnica de Mayorga, Ramirez y Mayorga donde se estudian la influencia de la ciudad sobre los ríos aledaños a la misma y como la falta de plantas de tratamientos afectan estos ecosistemas.

Nos despedimos deseando lo mejor para este año 2018 y como es costumbre en nosotros 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, ciencias afines.

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

Profesora *Lisbeth Manganiello*, PhD
Editora – Jefe

Environmental assessment of the Urama Wetland, Venezuela

Nereida López, Edilberto Guevara Pérez*

Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales (CIHAM-UC), Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Abstract.-

The connections between the state of the wetlands, the services they provide and the benefits for the population, have ecological, socio-cultural and economic values, which are decisive for decision-making in the management of the conservation of wetlands. The Convention on Biological Diversity (CBD) and the Ramsar Convention have done a fundamental job in the assessment of wetlands, in the context of programs on incentive measures. The valuation of the Urama wetland is based on the guidelines offered by the Ramsar Convention in its technical reports. It is classified in five (05) stages with the description of the methods for the evaluation and evaluation of the services of the wetlands. The methodology is with the method of Impact Evaluation, obtaining an integrated value of its components, whose result reaches a value equal to 2.029 US dollars ha/year at market prices of 2014, in an area of 2.131 hectares, a value that it is below the referential world rank equal to 3.300 US dollars ha year, which is a function of the identification of the components and services that allow the contribution of the wetland in terms of net benefits to the local, national and global economy.

Keywords: wetland; valuation methods; integration; benefits.

Valoración ambiental del Humedal Urama, Venezuela

Resumen.-

Las conexiones entre el estado de los humedales, los servicios que prestan y los beneficios para la población, tienen valores ecológicos, socioculturales y económicos, determinantes para la toma de decisiones en la gestión para la conservación de los humedales. El Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) y Convención de Ramsar han realizado una labor fundamental en la valoración de los humedales, en el contexto de programas sobre medidas incentivadoras. La valoración del humedal Urama se basa en los lineamientos que ofrece la Convención Ramsar en sus informes técnicos. Se clasifica en cinco (05) etapas con la descripción de los métodos para la evaluación y valoración de los servicios de los humedales. La metodología es con el método de Evaluación de Impactos, obteniendo un valor integrado de sus componentes, cuyo resultado alcanza un valor igual a 2029 dólares americanos ha/año a precios de mercado del año 2014, en un área de 2.131 hectáreas, valor que se encuentra por debajo del rango mundial referencial igual a 3300 dólares americanos ha/año, lo cual es función de la identificación de los componentes y servicios que permiten la contribución del humedal en términos de beneficios netos a la economía local, nacional y mundial.

Palabras clave: humedal; métodos de valoración; integración; beneficios.

Recibido: noviembre 2017

Aceptado: diciembre 2017

1. Introducción

La Convención sobre los Humedales, conocida generalmente como Convención de Ramsar, por el nombre de la localidad iraní donde se aprobó en 1971, fue el primero de los tratados intergubernamentales mundiales sobre conservación y uso racional de los recursos naturales. La misión

*Autor para correspondencia

Correo-e: eguevara99@gmail.com (Edilberto Guevara Pérez)

de la Convención de Ramsar es la conservación y el uso racional de los humedales, a través de la acción en el ámbito nacional y mediante la cooperación internacional, a fin de contribuir al logro de un desarrollo sostenible en todo el mundo. La Convención sirve de marco para la cooperación internacional y se elaboró a raíz de la preocupación despertada en el decenio de 1960 por el fuerte descenso de las poblaciones de aves acuáticas, especialmente la de patos [1].

El acuerdo entró en vigor en 1975, siendo el primer acuerdo multilateral sobre el medio ambiente que se firmó a escala mundial. La red de sitios Ramsar constituye la mayor red de áreas de importancia internacional reconocidas oficialmente en el mundo [2]. Esta red de humedales, hasta el mes de octubre de 2017 presenta 169 número de partes contratantes, 2.285 sitios designados Ramsar con una extensión de 220,807,915 hectáreas; constituye el eje principal de una red mundial de humedales que mantienen funciones vitales y prestan servicios de los ecosistemas tanto para las personas como para la naturaleza [2].

En 1988 Venezuela ratifica el tratado intergubernamental, para ser parte contratante de la Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional (Ramsar 1971), especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas, publicado en la Gaceta Oficial N° 34053 del 06/09/88. Para ese mismo año se designa sitio Ramsar al Refugio de Fauna Silvestre Cuare, Falcón y en 1996, el Parque Nacional Archipiélago de Los Roques, Laguna de Tacarigua, Laguna de La Restinga y Ciénega de Los Olivitos, decretados como sitios Ramsar en Venezuela. Hasta la fecha se ha logrado la creación de cinco (5) sitios y 265,668 hectáreas, por ser humedales de excepcional importancia como reservorios de recursos alimenticios y de biodiversidad [2, 3].

Para el área de estudio, humedal de Urama, la Gobernación del estado Carabobo, Venezuela, mediante el Decreto N° 2322 y el Decreto N° 2323 de fecha 07 de junio de 2004, declara el Área de Especial Interés y Protección Ambiental del Paisaje del Humedal de Urama y la Normativa para su Manejo y Reglamentación, lo cual constituye una base legal para el estudio de valoración del

humedal Urama.

Los humedales son extensiones de marismas, pantanos y turberas o superficies cubiertas de agua, sean estas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda a seis metros [1].

Generalmente un ecosistema intacto y saludable, que no haya sido degradado por el impacto humano, es más diverso en lo que a especies se refiere que un sistema degradado y posee un mayor valor económico para los seres humanos gracias a los servicios que presta. La pérdida de especies indica un deterioro del ecosistema del que depende y hace disminuir la resiliencia de los ecosistemas [4].

Los servicios de los ecosistemas que proporcionan los humedales como agua, peces, recarga de reservas de aguas subterráneas, purificación del agua y tratamiento de desechos, control de inundaciones y protección contra tormentas, posibilidades de uso recreativo y espiritual, son esenciales para la supervivencia del ser humano. Esos servicios se pueden valorar en 14 billones de dólares EE.UU. anuales [4].

Los humedales, aunque proporcionan una variedad de importantes servicios ambientales a la sociedad, año tras año se degradan de forma acelerada por el desarrollo sin planificación de estos espacios y por desconocimiento de la legislación nacional e internacional. La disminución, pérdida o destrucción de humedales generan costos importantes a la sociedad. Estas pérdidas y alteraciones también comprometen los beneficios tan importantes que proporcionan los humedales incluyendo hábitat para una gran variedad de plantas y animales, protección de la calidad de agua, y reducción de daños por inundaciones [5].

En este estudio se presenta un marco de referencia para desarrollar una evaluación integrada de los servicios de los ecosistemas de humedales y se basa en cinco etapas claves que definen los Informes Técnicos de Ramsar N° 3 y N° 27 de la serie de publicaciones técnicas del Convenio sobre Diversidad Biológica (CDB), para llevar a cabo un cálculo del valor ambiental aplicado al

humedal Urama. En el informe se utilizan las definiciones de inventario, evaluación y monitoreo de humedales adoptadas por la Convención de Ramsar e incorporadas en el marco integrado para el inventario, la evaluación y el monitoreo de los humedales. Según estas definiciones el inventario de humedales ofrece el punto de apoyo para orientar el desarrollo de la evaluación y monitoreo apropiados [6].

El inventario de humedales se utiliza para recabar información sobre las características ecológicas de los humedales; la evaluación considera las presiones, los valores y riesgos conexos de los cambios negativos en las características ecológicas; y el monitoreo, que puede incluir tanto estudios como reconocimiento, brinda información sobre la cuantía de los cambios. Tomados en conjunto, esos procedimientos proporcionan los criterios necesarios para formular estrategias, políticas e intervenciones de manejo con el fin de mantener el carácter ecológico de un humedal, y en particular incorporar los resultados de las valoraciones económicas [6].

De acuerdo con lo establecido en los objetivos para el Cuarto Plan Estratégico 2016-2021 de la Convención de Ramsar, el uso racional de los humedales está basado en el mantenimiento de sus características ecológicas, logrado mediante la implementación de enfoques por ecosistemas, dentro del contexto del desarrollo sostenible, siendo relevante desarrollar los estudios de valoración ambiental de los humedales a partir de la definición de la política y del método de valoración [7].

La evaluación integral del procedimiento de valoración se aplica al humedal Urama; la información básica para el análisis se ha extraído del estudio del impacto ambiental para el desarrollo de un proyecto de construcción de la autopista Troncal 3 de dos canales y un hombrillo, incluyendo dos distribuidores para enlazar la vía principal con el par vial Morón – Tucacas y con la autopista Centro-occidental ubicada en el sector Alpargatón, Urama, estado Carabobo, cuyo recorrido es de 16 Km, pasando por parte del área del humedal en el sentido sur-norte lado este del humedal [8].

2. Metodología

La metodología aplicada para la evaluación y valoración integrada de servicios de humedales se divide en cinco (05) etapas principales descritas en los lineamientos de los Informes Técnicos de Ramsar N° 3 y N° 27 de la serie de publicaciones técnicas del Convenio sobre Diversidad Biológica (CDB).

Se parte de la definición de la política en el momento de la valoración, ya sea: a) Análisis de opciones comparativas, para evaluar los efectos (costos y beneficios estimados) de opciones de desarrollo de alternativas para un determinado humedal con el fin de adoptar decisiones documentadas sobre las posibilidades (e imposibilidades) del uso sostenible y multifuncional de los servicios del humedal, b) Evaluación del Valor Económico Total (VET), para determinar la contribución total de los ecosistemas a la economía local o nacional y al bienestar humano y c) Evaluación del impacto, para analizar los efectos de un proyecto propuesto sobre los servicios del humedal y su valor (incluidos los valores ecológicos, socioculturales y económicos) [6].

Para el caso del estudio del humedal Urama, se analiza el momento de valoración para la situación “c”. Este método es especialmente pertinente cuando se trata de analizar situaciones en que la alteración de un humedal determinado tiene repercusiones ambientales específicas, considerando efectos e impactos de las actividades desarrolladas y por desarrollarse sobre el humedal. Las pérdidas de valores del humedal derivadas de los daños ocasionados al ecosistema y sus recursos representan los costos de las actividades. Tales daños equivalen a las pérdidas de beneficios netos de la producción; es decir, los beneficios económicos de la producción menos los costos, [1].

Para el análisis se consideran los beneficios que se generan por los servicios de aprovisionamiento y los obtenidos por las medidas ambientales a ser aplicadas en el área del proyecto para los servicios de regulación y culturales, recreativos y económicos. La evaluación integrada, considera igualmente el resultado del análisis de sensibilidad

del proyecto de vialidad, la cual valora el humedal según sea el nivel en que el ambiente puede ser afectado por el proyecto a ejecutarse; en cuanto al valor económico de las medidas ambientales propuestas [8].

Las fases son las siguientes:

1. Análisis de políticas;
2. Análisis de interesados directos;
3. Análisis de funciones (inventario: identificación y cuantificación de servicios);
4. Valoración de servicios del humedal. Así mismo, la metodología incluye una quinta fase fundamental,
5. Comunicación y difusión, sobre la necesidad de comunicar el valor de los humedales a todos los interesados directos y a los encargados de la adopción de decisiones [6].

En la Figura 1, se muestran las fases desarrolladas para obtener la valoración del humedal. En lo que sigue se describen las cinco fases para la metodología aplicada.

2.1. Análisis de los procesos de políticas y los objetivos del manejo

Se parte de la política gubernamental del Estado Carabobo establecida según Decreto N° 2322 en el que se declara como Área de Especial Interés y Protección Ambiental del Paisaje del Humedal de Urama, que tiene como objetivo asegurar la conservación integral de este espacio de la geografía carabobeña.

Está delimitada por una poligonal en base de cartografía nacional a escala 1:25.000 No. (6547 IV SO- 6547 IV SE- 6547 III NE – 6547 III NO), comprendida entre los puntos: Botalón PP1 (N1164325 - E566350), Botalón PP2 (N1164326 - E579225), Botalón PP3 (N1164327 - E 582000), Botalón PP4 (N1164328 - E582000) y Botalón PP5 (N1164329 - E 565125), correspondiente a la planicie aluvial de los ríos Alpargatón, Urama, El Roble, Canoabito y El Fraile, ubicado entre los sectores La Raya y Alpargatón en jurisdicción del



Figura 1: Marco general para la evaluación y valoración integrada de los servicios de humedales [6].

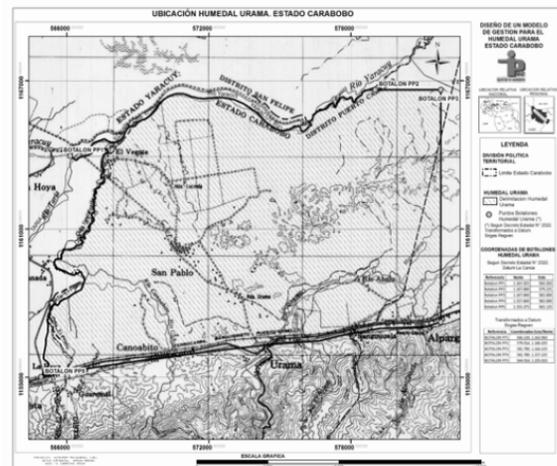


Figura 2: Ubicación local del paisaje protegido del humedal Urama, Venezuela.

Municipio Juan José Mora [9]. La ubicación se muestra en la Figura 2.

Adicional al Decreto N° 2322, se cuenta con el Decreto N° 2323, mediante el cual la Gobernación del Estado Carabobo, establece la Normativa para el Manejo y la Reglamentación del Área de Especial Interés y Protección Ambiental del Paisaje del Humedal de Urama, cuyo objetivo es conservar y preservar la interacción armónica entre la naturaleza y las diversas actividades antrópicas que allí se realizan, las cuales le han dado un importante valor estético y paisajístico, con el

propósito de asegurar la continuidad de las prácticas tradicionales de utilización de tierras, métodos de producción y las manifestaciones sociales y culturales que representan valores genuinos del espacio [10].

En función a las directrices, la administración y el manejo del Área de Especial Interés y Protección Ambiental del Paisaje del Humedal de Urama, tendrá como propósito general el aprovechamiento racional de los recursos naturales, bajo el principio del desarrollo sustentable, armonizando el desarrollo del uso agropecuario en general, a la conservación de los ecosistemas, especies, genes y hacia el resguardo de los valores culturales de las comunidades asentadas en dicho espacio geográfico [10].

Dentro de las reglamentaciones establecidas mediante los Decretos N° 2322 y N° 2323, respectivamente, para contribuir al objetivo de la conservación integral y el aprovechamiento racional de los recursos naturales del Área de Especial Interés y Protección Ambiental del Paisaje del Humedal de Urama, se define realizar la valoración ambiental a partir de la evaluación del impacto generado por la intervención del proyecto de vialidad Desvío de la Troncal 3, Complejo Petroquímico Hugo Chávez, Morón, Estado Carabobo, el cual se proyecta en parte de la zona del humedal en el tramo de enlace con la autopista Centro-occidental existente ubicada en el sector Alpargatón [8].

Durante la etapa del proceso de valoración también se determina cómo se pueden generar valores que sean pertinentes para la adopción de decisiones de política y de manejo que contribuyan a asegurar la protección ambiental del humedal Urama.

2.2. *Análisis y participación de interesados directos*

De acuerdo con el ámbito geográfico, el área de influencia para la participación de los interesados, se clasifica en la zona inmediata, directa e indirecta del humedal Urama:

a) Inmediata: localizados dentro de la poligonal del proyecto vial;

b) Directa: sectores ubicados en la zona de la poligonal del humedal;

c) Indirecta: el ámbito geográfico de los asentamientos y sectores poblados ubicados en la cuenca del río Urama, Alpargatón y sus afluentes, fuera del entorno de la poligonal del humedal y la influencia de las poblaciones vecinas de los municipios Juan José Mora y Puerto Cabello del estado Carabobo y los estados Yaracuy y Falcón [8].

De acuerdo con el ámbito institucional se identifican a los responsables de la aplicación de los Decretos N° 2322 y 2323, por parte de la Gobernación del Estado Carabobo, (Secretaría de Ambiente y Ordenación del Territorio), la empresa Petroquímica de Venezuela, Pequiven (Complejo Hugo Chávez de Morón), la Alcaldía del Municipio Juan José Mora y el Ministerio del Poder Popular para el Ecosocialismo y Aguas (MINEA) de la Dirección de Carabobo. Para la participación de los interesados se realizaron consultas a las instituciones mediante comunicaciones escritas, consulta a expertos de las instituciones de la Gobernación del Estado Carabobo y MINEA, reunión con el personal del proyecto de la vialidad Desvío de la Troncal 3 por parte de Pequiven, realización de taller participativo y levantamiento de encuestas a las comunidades asentadas en el área del humedal a través de los consejos comunales organizados [8].

2.3. *Análisis de funciones (Inventario de los servicios de los humedales)*

En esta fase, mediante los métodos de inventario basado en el diagnóstico y caracterización, se determinan los diversos componentes físicos y biológicos de los humedales, formados por suelos, agua, especies animales y vegetales. Las interacciones de estos componentes permiten a los humedales realizar determinadas funciones. Las funciones de los ecosistemas se han definido como la capacidad de sus procesos y componentes de proporcionar bienes y servicios que satisfagan necesidades humanas, directa o indirectamente [6].

La Evaluación de Ecosistemas del Milenio, definió los servicios de los ecosistemas como los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas, se definen de manera amplia e incluyen tanto bienes (es decir, recursos) como servicios (es decir, beneficios provenientes de los procesos y usos no materiales de los ecosistemas) [11].

Para el humedal Urama, se han seleccionado los componentes ecológicos, socioculturales y económicos, conforme al resultado del análisis de los especialistas con la participación de los autores, que intervinieron en el estudio de sensibilidad del humedal, según se define como el grado de idoneidad o cabida que presenta el territorio, para una actividad teniendo en cuenta a la vez, la medida en que el medio cubre sus requisitos vocacionales y los efectos de dicha actividad sobre el medio [8]. Se considera la evaluación que una actividad económica puede producir sobre los ecosistemas, evaluando la sensibilidad del área ante el impacto de la actividad, partiendo del estudio de las características intrínsecas del área [12].

Adicionalmente, se considera el resultado y valor económico de las medidas ambientales del estudio de impacto ambiental del proyecto de Desvío de la Troncal 3, según sean los servicios que prestan atendiendo los programas ambientales requeridos para mitigar los efectos.

Para el análisis de funciones, la metodología en general consiste en desarrollar las siguientes fases:

1. Definición de unidades de estudio.
2. Selección de componentes, funciones, servicios e indicadores

2.3.1. Unidades de estudio

De acuerdo con la caracterización ambiental, el equipo de especialistas consideró conveniente tomar como unidad espacial las unidades de paisaje para el análisis de funciones de los componentes ecológicos, socioculturales y económicos, en el área de afectación directa del humedal causado por el proyecto de vialidad. En la Tabla 1 se presenta las unidades de estudio del humedal Urama seleccionadas.

Tabla 1: Unidades de estudio del humedal Urama.

Unidad	Denominación	Ubicación	Superficie (ha)
PDRY	Planicie de Desborde del Río Yaracuy	Margen izquierdo y derecho del río Yaracuy	496
AP	Altiplanicie de Urama	Sector B, entre unidad PDRY y Unidad VDRU	401
VDRU	Valle de Depresión del Río Urama.	En el valle del río Urama, entre la unidad AP y la Unidad PERA.	381
PERA	Planicie de Explayamiento del Río Alpargatón	Planicie del río Alpargatón, entre unidad VDRU y Piedemonte del Sistema de La Costa	637
PDSC	Piedemonte Sistema de la Costa	Sector Alpargatón entre unidad PERA y la Serranía de la Costa.	216
Superficie Total (ha)			2131
Superficie Total (Km ²)			21,31

Fuente: Consultores de Proyectos y Estudios Ambientales LC, C.A. Septiembre, 2.013.

2.3.2. Componentes, funciones, servicios e indicadores

Los componentes y procesos ecológicos de los humedales se traducen en funciones que proporcionan servicios específicos de los ecosistemas. Estos servicios se proceden a cuantificar en las unidades seleccionadas, basadas en los niveles de utilización reales o potenciales. Los componentes ecológicos se clasifican en beneficios obtenidos por servicios de aprovisionamiento, por servicios de regulación y por servicios de apoyo. Para el componente socioeconómico se clasifican beneficios por servicios culturales, recreativos y económicos. La capacidad de los ecosistemas para proporcionar servicios de forma sostenible depende de las características bióticas y abióticas, que deben cuantificarse con indicadores ecológicos, biológicos o socioeconómicos.

En los últimos años, la creciente preocupación social por la relación del ambiente con el desarrollo y el bienestar humano ha supuesto la elaboración de sistemas de evaluación ambiental y la adopción de indicadores ecológicos que caracterizan los componentes del sistema. Los indicadores se organizan dependiendo de los

Tabla 2: Componentes ecológicos del humedal, Urama.

Componente: Ecológico				
Variables	Funciones (procesos)	Servicio	Indicador (Cantidad existente)	Indicador (Cantidad regulada)
Servicios de Aprovisionamiento				
Vegetación /Fauna	Presencia de plantas o animales comestibles (alimento)	Alimento: producción de vegetales, pasto, peces, mamíferos	Existencia totales en Kg.	Productividad neta (Kcal/año)
Vegetación ornamental	Presencia de especies con uso ornamental	Especies ornamentales: plantas	Biomasa total (kg/ha)	Recolección sostenible (Kg/año)
Hidrografía: Uso del Agua superficial y subterránea	Aporte de aguas superficiales para potabilización del agua	Fuentes de agua dulce para abastecimiento a la población	Caudal de la cuenca (m ³ /s), (m ³ /año)	Producción de la planta (m ³ /s), (m ³ /año)
	Agua subterránea	Perforación de pozos profundos	Caudal de producción, N° de pozos, (litros/s)	Caudal de extracción (litros/s), N° de pozos
Servicios de Regulación				
Variables	Funciones (procesos)	Servicio	Indicador (Cantidad existente)	Indicador (Cantidad regulada)
Clima	Influencia del ecosistema en el clima local por medio de la cubierta terrestre y de procesos con mediación biológica	Regulación del clima: mediante estaciones climáticas y monitoreo del aire	Número de estaciones climáticas	N° de monitoreo para aire (CO ₂ y particulado: N° de monitoreo /año)
Hidrografía: Sistema natural del agua	Función de los ecosistemas (especialmente bosques y humedales) para capturar y liberar gradualmente el agua	Regímenes hidrológicos: carga/ infiltración de aguas subterráneas, almacenamiento de agua para agricultura o industria	Capacidad de almacenamiento de agua en la vegetación, suelo, o en la superficie según la cuenca , Q cuenca (m ³ /s)	Cantidad de agua almacenada: Volumen de humedales , (V _{hum} =m ³), Caudal de infiltración (m ³ /s)

Fuente: Modificado de [6].

objetivos conformando un sistema de índices que aporta información para la gestión y la población [13]. Por ejemplo, la capacidad para almacenar agua mediante parámetros hidrológicos, y la capacidad de soportar un gran número de visitantes. Los componentes y servicios del estudio se identifican en la Tabla 2 y Tabla 3, respectivamente.

2.4. Valoración del humedal

Pueden definirse tres tipos principales de valores que juntos determinan el Valor Total (o importancia) de los humedales. Se trata de los siguientes: valores ecológicos, socioculturales y económicos [6]. Cada tipo de valor tiene su propio conjunto de criterios y unidades de valor, que son los que se describen en las Tablas 2 y 3.

La magnitud del valor ecológico se expresa mediante indicadores tales como la diversidad de especies, la rareza, la integridad del ecosistema (salud) y la resiliencia, que se relacionan principalmente con los servicios de apoyo y regulación. [6].

La importancia económica de los servicios de los ecosistemas no sólo se puede medir en unidades monetarias, sino también mediante su contribución al empleo y la productividad, en función del número de personas cuyos empleos están relacionados con el uso o la conservación de los servicios de humedales, o del número de unidades de producción que dependen de estos servicios. Dado que tanto el empleo como la productividad se pueden medir a través del mercado, su relación forma parte del método de valoración monetaria utilizada para el estudio.

En cuanto al valor sociocultural, para muchas personas, los sistemas naturales, incluidos los humedales, son una fuente esencial de bienestar no material por su influencia en la salud física y mental y en los valores históricos, nacionales, éticos, religiosos y espirituales.

Los principales tipos de valores socioculturales que se describen son el valor recreativo, valor paisajístico y valor por educación e investigación [6].

Para el presente estudio, se consideran los

Tabla 3: Componentes ecológicos del humedal, Urama.

Componente: Socio Económico				
Variables	Funciones (procesos)	Servicio	Indicador (Cantidad existente)	Indicador (Cantidad regulada)
Servicios Socio Culturales, Recreativos y Económicos				
Uso y tenencia de la tierra	Usos observados en las unidades espaciales del humedal, comportamiento y dinámica ante la ejecución y funcionamiento del proyecto	Servicios agropecuarias, zonas residenciales y de industrias, áreas a ser afectadas por utilidad pública de proyectos de desarrollo, servicios de infraestructura	Áreas en (ha) de cobertura vegetal, uso pesquero, agrícola y pecuario, uso residencial, industrial, recreativo y de infraestructura de servicios.	% de superficie de los servicios, % área ocupada por proyecto de desarrollo, áreas expropiadas para el proyecto en (ha), (% de expropiación)
Condiciones ocupacionales de la población.	Situación laboral de la población	Expectativas de empleo en las comunidades por la ejecución y funcionamiento del proyecto	Número de población económicamente activa y desocupada	Nº de empleos directos e indirectos generado por el proyecto
Valor recreativo	Rasgos paisajísticos, flora y fauna silvestres que la hacen atractiva para la contemplación o admiración	Recreativos: oportunidades para el turismo y las actividades recreativas	Presencia de elementos silvestres o paisajísticos con valor recreativo declarado	Número máximo sostenible de personas e instalaciones; uso real y propuesto
Valores paisajísticos y estéticos	Calidad estética del paisaje, basada en la diversidad estructural, el "verdor", la tranquilidad	Estéticos: apreciación del paisaje natural (por motivos distintos a las actividades deliberadamente recreativas)	Área con presencia de rasgos paisajísticos con apreciación declarada (ha)	Valor estético expreso: Área observada por paso del proyecto (ha), número de observadores o usuarios de rutas pintorescas, Nº de miradores construidos
Valores de educación e investigación	Rasgos con valor/interés científico o educativo especiales	Educativos: oportunidades para la educación y capacitación formales e informales	Presencia de instituciones, programas, extensiones, con valor e interés científico o educativo especiales	Número de programas, Número de talleres educativos, número de estudios científicos

(*MPPA: Ministerio del Poder Popular para el Ambiente de Venezuela, actual Ministerio del Poder Popular para el Ecosocialismo y Agua (MINEA)

Fuente: modificado de [6]

valores obtenidos por los beneficios proporcionados en el humedal Urama, sobre la base de los servicios de aprovisionamiento de fuentes de agua y alimentos, haciendo uso de valores referenciales en el mercado. Para los servicios de regulación, socioculturales y económicos, se hace uso de los beneficios obtenidos por las medidas ambientales para el proyecto de desarrollo Desvío de la Troncal 3, a precios de mercado para el año 2014 [8].

En la Tabla 4 se presenta la valoración económica del humedal Urama con los valores de importancia según sus componentes ecológicas, socioeconómicas y culturales.

En la Figura 3, se presenta un resumen de los valores obtenidos por Servicios para el paisaje del humedal Urama, sean de Aprovisionamiento, de Regulación, Culturales, Recreativos y Económicos, como consecuencia del proyecto Desvío de la Troncal 3, Morón, Estado Carabobo. sobre la base de precios referenciales del mercado para el

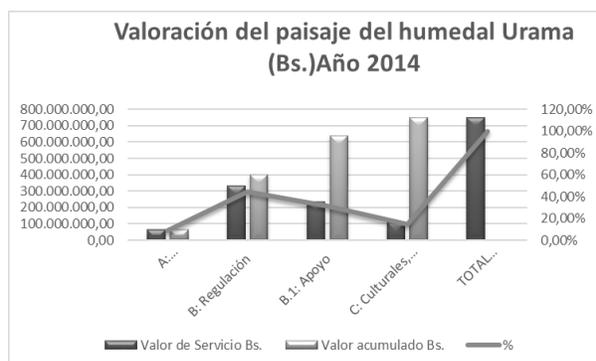
año 2014, donde se observa que los servicios de Regulación y Apoyo se ubican en un rango de Bs. 335.075.066,24 y Bs. 235.926.499,50, respectivamente, para un total de Bs. 638.414.236,26, que representan un 76,34 % del total. El servicio de Cultural, Recreativo y Socioeconómico alcanza Bs. 109.605.258,82 (14,65 %) y el servicio de Aprovisionamiento es de Bs. 67.412.670,53 (9,01 %).

3. Análisis y discusión de resultados

Con base en el resultado obtenido para el área del humedal Urama, aplicando el método de Evaluación de Impacto, el valor total económico es de Bs. 748.019.495, con precios referenciales del mercado del año 2014, donde el servicio de Aprovisionamiento representa un 9,01 %, el servicio de Regulación, incluyendo los servicios por Apoyo es de 76,34 % y el servicio Cultural,

Tabla 4: Valoración Ambiental Total del humedal Urama.

Servicios asociados al humedal en el área del proyecto	Valor de Servicio Bs.	Valor acumulado Bs.	%	% integrado
A: Aprovechamiento	67.412.670,53	67.412.670,53	9,01 %	9,01 %
B: Regulación	335.075.066,24	402.487.736,76	44,79 %	76,34 %
B.1: Apoyo	235.926.499,50	638.414.236,26	31,54 %	
C: Culturales, recreativos y económicos	109.605.258,82	748.019.495,08	14,65 %	14,65 %
TOTAL VALORACIÓN Bs.	748.019.495,08		100,00 %	100,00 %
	21,31	Km ²	2.131,00	ha
Valor unitario precios del mercado 2014	35.101.806,43	Bs/Km ²	202.900,62	\$/Km ²
	351.018,06	Bs/ha	2.029,01	\$/ha



Fuente: Elaboración propia, datos de Estudio de Impacto Ambiental del Desvío de la Troncal 3 [8].

Figura 3: Valoración ambiental del humedal Urama, (Bs.) Año 2014.

Recreativo y Económico alcanza un 14,65 % del total. Este resultado indica que los servicios de mayor valor son los correspondientes al beneficio por Regulación y Apoyo, considerando que esta clasificación incluye los valores por regulación del clima, del agua, aire, vegetación y suelos, es decir de los recursos del ecosistema, donde se incluyen monitoreos para control de la contaminación, obras de desvío para control de cauce, construcción de gaviones, pasos de fauna, aplicación de nutrientes al suelo deforestado, lo que implica el desembolso de inversiones que incrementan los beneficios al área afectada para minimizar los efectos por la ejecución del proyecto Desvío de la Troncal 3 [8]. El resultado de la valoración total de los servicios en el área de 2.131 km² del humedal Urama, indica que el valor unitario es de Bs. 35.101.806,43 por Km², equivalente a 202.900,62 de dólares americanos por Km² o 2.029 dólares americanos de hectárea/año a precios de mercado

para el año 2014.

A escala mundial, utilizando el valor promedio total de aproximadamente 3.300 dólares americanos de ha/año con estudios del año 2000, el valor económico total de 63 millones de hectáreas de humedales de todo el mundo asciende a unos 200.000 millones/año, para este total no se incluyen servicios como los recursos ornamentales y medicinales, los valores históricos y espirituales, el control de sedimentos y varios otros, y por tanto representa una estimación para el estudio realizado [6]. Al comparar con el valor obtenido para el humedal Urama, el valor promedio mundial se mantiene por encima del resultado obtenido, para la valoración realizada se consideran los servicios específicos derivados del aprovisionamiento en el área del proyecto y de los beneficios por las medidas ambientales previstas para la minimización de los efectos, donde los servicios de regulación y apoyo son los que proporcionan el mayor beneficio, con un valor de control de inundaciones igual a 300 dólares americanos por hectárea y de retención del suelo en 326 dólares americanos por hectárea, al comparar con el promedio mundial, el valor para control de inundaciones es de 480 dólares americanos de ha/año y de retención de suelos en 245 dólares americanos de ha/año [6], manteniéndose el valor obtenido dentro del rango.

Aplicando el método de valoración total a precios de mercado, en el humedal marisma costera semitropical ubicado en el Golfo de México, Louisiana, EE.UU, expuesto a ocasionales huracanes que suelen producir importantes daños materiales, la desaparición de humedales costeros reduce la protección brindada, por lo que se analiza

la función de daños versus la producción [1], cuyo valor actual neto de pesca comercial, caza con trampas, recreación y protección contra tormentas; resulta de 2.429 dólares americanos/acre (precios de 1983), equivalente a 6002,18 dólares americanos/ha. Este valor se encuentra igualmente muy por encima del valor obtenido para el humedal Urama, siendo un valor referencial del año 1983, donde la política está enmarcada por el análisis para evitar una destrucción total del humedal, siendo determinante la definición de la política para la decisión de seleccionar el método para la valoración ambiental de un humedal. Para el caso estudio del humedal Urama se analiza bajo la política de área protegida, evaluando el impacto del proyecto en la relación de costos y beneficios que puedan aportar al área del humedal afectada por el proyecto vial.

4. Conclusiones

Una adecuada valoración requiere de una acertada política, como fomentar la importancia de los humedales mediante áreas protegidas, para lo cual se aplica la metodología de valoración por Evaluación de Impactos, identificando las unidades de estudio, los componentes y los servicios del humedal para ser valorados a precios del mercado.

Para el humedal Urama, los servicios de Regulación y Apoyo representan los de mayor valoración alcanzado un 76,34 %, seguido de un 14,65 % de los servicios Culturales, Recreativos y Económicos y un 9,01 % por Aprovisionamiento según precios del mercado, por lo que el beneficio neto generados de la regulación contribuye a la conservación.

El valor unitario del beneficio por hectárea o km^2 , igual a 2.029 dólares americanos de ha/año, se ubica en el rango del promedio mundial, igual a 3.300 dólares americanos de ha/año.

5. Recomendaciones

Se recomienda la aplicación de la metodología de Evaluación de Impactos, que permite cuantificar la relación de beneficios netos proporcionados por los servicios obtenidos de la aplicación de

medidas ambientales que minimizan los efectos generados por las actividades de un determinado proyecto.

Para la aplicación de los métodos de valoración, se recomienda obtener previamente el inventario del humedal, la información de los indicadores ecológicos, socioculturales y económicos, con sus respectivos costos referenciales, fundamentales para la cuantificación de los beneficios, para ser comparados con los valores de referencia mundial.

Para comunicar las funciones de los ecosistemas y los servicios que brindan a las personas, se recomienda para la gestión, integrar los valores de los humedales a través de una comunicación eficaz entre los responsables de la toma de decisiones y la sociedad.

Referencias

- [1] E. B. Barbier, M. C. Acreman y D. Knowler. Valoración económica de los humedales—guía para decisores y planificadores. Reporte técnico, Oficina de la Convención de Ramsar, Gland, Suiza, 1997.
- [2] Secretaría de la Convención de Ramsar. *Designación de sitios Ramsar: Marco estratégico y lineamientos para el desarrollo futuro de la Lista de Humedales de Importancia Internacional. Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales, vol. 17.* Ramsar, Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza), 4^{ta} edición, 2010.
- [3] Rafael Rodríguez Altamiranda. *Conservación de humedales en Venezuela: inventario, diagnóstico ambiental y estrategia.* Unión Mundial Para La Naturaleza Comité Venezolano, Venezuela, 1999.
- [4] Ramsar. Convención de Ramsar sobre los humedales. El cuidado de los humedales una respuesta al cambio climático. Ramsar. Consultado 12 de agosto 2017, <https://goo.gl/7j8obF>.
- [5] Mónica Patricia Valencia Rojas and Apolinar Figueroa Casas. Vulnerabilidad de humedales altoandinos ante procesos de cambio: tendencias del análisis. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 14(26):29–42, 2015.
- [6] R. De Groot, M. Stuij, M. Finlayson y N. Davidson. Valoración de humedales lineamientos para valorar los beneficios derivados de los servicios de los ecosistemas de humedales. Informe técnico de Ramsar número 3, Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland, Suiza, 2007.
- [7] Ramsar. Compilación de los proyectos de resolución presentados a la COP12. In 12^a Reunión de la Conferencia de las Partes en la Convención sobre

los Humedales (Ramsar, Irán, 1971), Punta del Este, Uruguay, 2015. Ramsar, Ramsar.

- [8] Proyectos y Estudios Ambientales LC. C.A. Proyecto desvío de La Troncal 3 con conexión a La Autopista Centro Occidental Complejo Petroquímico Morón, Estado Carabobo. Informe técnico, Proyectos y Estudios Ambientales LC. C.A., Complejo Petroquímico Hugo Chávez, Morón, Estado Carabobo, Venezuela, 2015.
- [9] Gobernación del Estado Carabobo. Declaratoria del área de especial interés y protección ambiental del paisaje del humedal de Urama. *Gaceta Oficial del Estado Carabobo*, Extraordinaria(1651):3–4, Junio 2004.
- [10] Gobernación del Estado Carabobo. Normativa para el manejo y la reglamentación del área de especial interés y protección ambiental del paisaje del humedal de Urama. *Gaceta Oficial del Estado Carabobo*, Extraordinaria(1652):1–14, Junio 2004.
- [11] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: wetlands and water synthesis. Technical report, World Resources Institute, Washington, DC., 2005.
- [12] Temístocles Rojas. Metodología para la evaluación de áreas sensibles en Venezuela. *Revista Geográfica*, (102):29–41, 1985.
- [13] Manuel Ortega, Francisco Martínez y Francisco Padilla. Aspectos metodológicos para evaluar la calidad ambiental de los humedales. In Mariano Paracuellos, editor, *Ecología, manejo y conservación de los humedales*, pages 125–137. Instituto de Estudios Almerienses, España, 2003.

VHDL Model of configurable neural networks applied to decoding in cognitive radio

Cecilia E. Sandoval-Ruiz*

Dirección de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Abstract.-

In the present investigation, the components of the coding stage in digital communication systems and their implementation with neural networks are studied, under the cognitive radio approach. The design method consisted of identifying an alternative configuration of the RNA based on the architectures of the encoders. Next, the modeling of the components was done in VHDL hardware descriptor language, for the types of dynamic linear, multilayer auto-regressive, multilayer parallel networks. Finally, the Reed Solomon decoder (7,3) was trained, applying a multilayer network, which validated the correction of errors, these results can be extrapolated for hybrid encoders. Efficient implementation models were established, considering the parallel processing. The main contribution consisted in the generalized neuro-models in VHDL, for the treatment of the codes, which can be reconfigured in circuit and adjust their parameters in an adaptive way, according to the requirements of the application.

Keywords: reconfigurable neural networks; signal processing; adaptive training; Reed Solomon decoder; neuro-cognitive; VHDL; FPGA.

Modelo en VHDL de redes neuronales configurables aplicadas a decodificación en radio cognitivo

Resumen.-

En la presente investigación se estudian los componentes de la etapa de codificación en sistemas de comunicación digital y su implementación con redes neuronales, bajo el enfoque de radio cognitivo. El método de diseño consistió en identificar una alternativa de configuración de las RNA basada en las arquitecturas de los codificadores. Seguidamente, se realizó el modelado de los componentes en lenguaje descriptor de hardware VHDL, para los tipos de redes lineal dinámica, multicapa auto-regresiva, multicapa paralela. Finalmente, se entrenó el decodificador Reed Solomon (7,3), aplicando una red multicapa, con lo que se validó la corrección de errores, a través de simulación, estos resultados pueden ser extrapolados para codificadores híbridos. Se lograron establecer modelos eficientes de implementación, considerando el procesamiento paralelo. El principal aporte consistió en los neuro-modelos generalizados en VHDL, para el tratamiento de los códigos, que pueden ser reconfigurados en circuito y ajustar sus parámetros de manera adaptativa, de acuerdo a los requerimientos de la aplicación.

Palabras clave: redes neuronales reconfigurables; procesamiento de señales; entrenamiento adaptativo; decodificador Reed Solomon; sistemas neuro-cognitivo; VHDL; FPGA.

Recibido: agosto 2017

Aceptado: noviembre 2017

1. Introducción

Actualmente, se presentan diversos diseños que integran módulos de procesamiento inteligente, aplicados a las etapas de los sistemas de comunicación, considerando la complejidad asociada a estos módulos, se han planteado trabajos que utilizan

* Autor para correspondencia

Correo-e: cecisandova@yahoo.com (Cecilia E. Sandoval-Ruiz)

herramientas alternativas para el procesamiento de los datos recibidos. Uno de los conceptos que están asociados al manejo eficiente de los canales de comunicación corresponde a los sistemas de radio cognitivo, en los que se estudian los algoritmos y herramientas de aprendizaje que pueden realizar la asignación óptima del espectro radio eléctrico, considerando las redes neuronales como una de éstas [1].

De esta manera, los sistemas inteligentes, que abordan la capacidad de adaptación de sus módulos modificando parámetros para el aprovechamiento de las condiciones del entorno, en este caso el canal de comunicación, requieren de una etapa de percepción, análisis, reconocimiento, decisión y procesamiento, todas estas funciones están relacionadas con las redes neuronales, sin embargo, en esta investigación se tratará el procesamiento neuronal de las señales. Entre las investigaciones encontradas, que proponen soluciones a partir del uso de redes neuronales, algoritmos genéticos y aprendizaje profundo [2], se encuentran diseños de diversos módulos de decodificación de canal, tales como el código Viterbi [3], códigos de bloques [4] y Turbo Códigos [5], siendo este método de decodificación una alternativa eficiente, que se puede combinar para el abordaje de códigos híbridos, basados en neuro-decodificadores [6].

En tal sentido, se propone la presente investigación a fin de abordar un método de diseño con redes neuronales en VHDL (*VHSIC – Very High Speed Integrated Circuit – Hardware Description Language*), como alternativa a módulos de comunicación complejos. Este temática resulta inédita con respecto al tratamiento de redes neuronales reconfigurables en hardware, que permita proponer una plataforma de comunicación inteligente. En este trabajo se exploran los conceptos de sistemas inteligentes de comunicación, tratando aspectos tales como esquemas de codificación y modulación reconfigurables, con arquitectura selectiva y adaptativa, a través del proceso de aprendizaje del módulo usando datos de entrenamiento en el encabezado de la información a transmitir, basado en la técnica de codificación con símbolos pilotos para estimar el modelo de referencia PSAC (*Pilot Symbol Assisted Coding*), el cual permite conocer

las características del canal y tomar decisiones [7].

2. Antecedentes

En trabajos previos se han desarrollado modelos neuro-adaptativos en lenguaje descriptor de hardware aplicados a sistemas sostenibles [8], en esta investigación se considera el estudio de los codificadores 2D-RS modelados para tecnología FPGA (*Field Programmable Gate Array*) [9]. Siendo la etapa de decodificación altamente compleja, se ha planteado abordarla con redes neuronales artificiales, bajo el criterio de descripción de hardware en VHDL. En este orden de ideas, se parte por la interpretación del codificador Reed Solomon – RS (7,3) – como modelo de análisis, basando la configuración de la red en la estructura del codificador. En primer lugar, se mantiene su arquitectura LFSR (*Linear Feedback Shift Register*) [10], para una red neuronal multicapa dinámica, donde el módulo de multiplicación por los coeficientes del polinomio generador de código, puede ser tratado como una sub-red neuronal para la operación del multiplicador en campos finitos de Galois $GF(2^m)$ estudiado en [11] y finalmente, reconociendo una estructura circuital fractal [12] en la red neuronal para el codificador RS.

Para el diseño se requiere el estudio de codificadores de bloque como el código Reed Solomon y códigos compuestos de estos [9], el análisis de los criterios aplicados en moduladores configurables [13], como elementos de partida para el desarrollo de los módulos complementarios, desde un entrenamiento supervisado. La investigación parte de la descripción en VHDL de diversos codificadores [9, 14, 15], el estudio de arreglos circuitales basados en sistemas de funciones iteradas para hardware [12], la relación entre los generadores de códigos [10] y la aplicación de conceptos de modelado neuro-adaptativo. En este punto, se han estudiado la arquitectura de las redes neuronales, de acuerdo a las diversas configuraciones y aplicaciones. Partiendo del principio de correspondencia, se ha re-interpretado el modelado de los codificadores para ser configurados a través de una red neuronal.

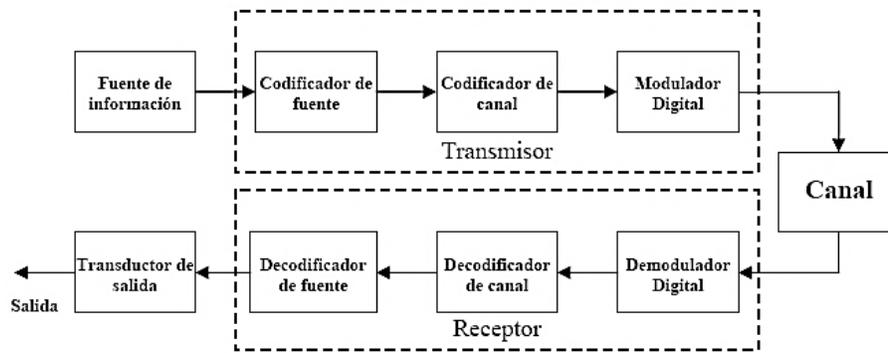


Figura 1: Diagrama de Bloques de un Sistema de Comunicación Digital.

3. Fundamento del procesamiento de señales con redes neuronales para radio cognitivo

En [1] indica que, de acuerdo con la Administración Nacional de la Información y las Comunicaciones (NTIA), de Estados Unidos, la *Radio Cognitiva*, es un sistema que detecta su entorno electromagnético de operación y puede ajustar de forma dinámica y autónoma sus parámetros de operación de radio para modificar la operación del sistema, maximizar el rendimiento, reducir la interferencia y facilitar la interoperabilidad. En estos sistemas se puede aplicar el aprendizaje supervisado de las redes neuronales para la definición de sus funciones, éste se usa cuando en el entrenamiento se conoce los datos de salida del sistema.

El estudio parte desde los componentes de un sistema de comunicación digital (Figura 1), en trabajos previos [16] se plantea la configuración de estos módulos, con la tecnología FPGA para su configuración, a través de lenguaje descriptor de hardware VHDL, destacando el nivel de complejidad propio de la etapa del receptor, por lo que en esta investigación se plantea una alternativa aplicando redes neuronales.

Entre los módulos de los sistemas de comunicaciones se han considerado el codificador de fuente, con código de longitud ajustable [14], esto representa para la red neuronal una estructura reconfigurable, con un número de neuronas de salida variable de acuerdo a la palabra de código, y en el caso del decodificador, las neuronas de la capa de entrada puedan interpretar el dato recibido.

Seguido de un módulo de codificación de canal, en esta etapa, se puede presentar la concatenación entre códigos, como una técnica muy práctica para obtener un código de longitud suficientemente alta y una capacidad correctora extremadamente elevada, eso se logra utilizando múltiples niveles de codificación. Para el procesamiento de los datos se puede seleccionar la configuración generalmente sobre dos niveles, porque con este tipo de concatenación se logran buenos resultados, en esta oportunidad se han considerado los códigos Reed Solomon & Viterbi. En tal sentido, se analiza la configuración de los códigos de bloque considerando la importancia de los códigos Reed Solomon y sus componentes, así como la concatenación de estos códigos en modelos más complejos, como los códigos 2D-RS [9] y con mayores requerimientos en la etapa de decodificación.

En el caso del modulador se ha tomado el concepto de modulación digital en VHDL para radio cognitivo [13], donde a partir de las condiciones del canal se realiza un análisis de datos y se selecciona el esquema de modulación óptimo, en esta etapa una red neuronal puede realizar el tratamiento de la señal con dos posibles modos de implementación: (1) demodulador reconfigurable compuesto por un conjunto de redes pre-entrenadas ASK, $\pi/4$ PSK, FSK, OFDM, etc. y una etapa de reconocimiento, la cual pueda conmutar entre los esquemas de modulación de acuerdo a la señal recibida, (2) demodulador adaptativo, en el que se selecciona una red dinámica recurrente adaptativa, ajustando los parámetros de la red a

las características de la señal recibida, estos son re-entrenados en circuito a partir de símbolos conocidos, en un encabezado de trama para entrenamiento con el uso del principio PSAC.

4. Metodología

El método de diseño consistió en identificar estructuras de similitud entre la arquitectura de estos y las topologías de redes neuronales [17], se seleccionaron dos tipos de códigos por su amplia utilización e importancia, estableciendo la relación con los modelos neuronales con: (a) el procesamiento secuencial del código convolucional (secuencial), (b) el procesamiento paralelo de los códigos de bloques Reed Solomon, que se puede adaptar a las características de la red neuronal a aplicar. Seguidamente, se realizó la descripción de comportamiento en VHDL de los tipos de redes estudiadas para la implementación, analizando el algoritmo de entrenamiento para VHDL. De esta manera, se entrenó el decodificador Reed Solomon (7,3), aplicando una red multicapa MPL, para validar la corrección de errores, a través de simulación.

Codificador-decodificador convolucional con RNA

Se analizan los códigos convolucionales [18] , definidos por una palabra $C(x)$, la cual se genera a través de la suma módulo 2 de los bits, de los últimos K mensajes, teniendo en su arquitectura líneas de retardos – TDL (*Time Delays Line*), que almacenan los k bits de cada mensaje. El código recibe el nombre de convolucional porque en el caso de $k=1$, la palabra de código se puede expresar de la forma dada por: $C(x) = G(x) * D(x)$, siendo $D(x)$ el mensaje o datos a codificar y $G(x)$ la función de transferencia asociado al código, es decir la secuencia de generación del código, donde se aplica la suma de convolución discreta entre $G(x)$ y $D(x)$. Estos pueden ser configurados con una red neuronal por presentar una arquitectura similar a las redes lineal dinámica, con una sola neurona, que incluye una línea de retardo TDL para el manejo de los bits a codificar. En el caso del decodificador Viterbi, se establece la secuencia de estados de acuerdo a las entradas, analizando la

relación de correcciones en función de los datos recibidos $R(t)$ y los datos retrasados $R(t-1)$, a partir del diagrama de estados de la Figura 2.

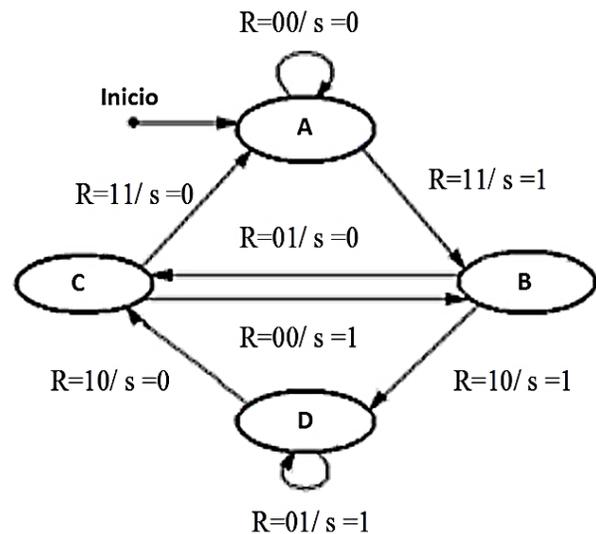


Figura 2: Diagrama de estados del decodificador Viterbi.

Para entrenar la red para el decodificador Viterbi, se deben establecer las entradas y estados presentes, la salida (Target) y estados futuros. Si el código presenta errores, la red puede solucionarlos conociendo las entradas futuras, en ese caso $R1(k)$ y $R0(k)$ serán las entradas próximas, en tanto que $R1(k-1)$ y $R0(k-1)$ las entradas actuales recibidas, es decir que la secuencia de entrada y secuencia de estados manejará con $k-1$ estados presentes y k estados futuros. *Start* permite definir el estado inicial de ABCD, que corresponde a los valores que se inicializan en los TDL, en este caso $A_i = 1000$. La ecuación (1), define la relación para la red diseñada para el decodificador.

$$s(k) = R1(k)w10 + R0(k)w00 + R1(k-1)w11 + R0(k-1)w01 + A(k-1)wA1 + B(k-1)wB1 + C(k-1)wC1 + D(k-1)wD1 + b \quad (1)$$

Donde $R1$ y $R0$, corresponden a las entradas de la red, datos recibidos, en la muestra actual k , en tanto que A, B, C, D son los estados realimentados, la matriz w , corresponde a los pesos sinápticos de la red y b , la polarización de la red. El análisis de esta secuencia permite establecer la data

de entrenamiento para el decodificador Viterbi (Tabla 1).

Tabla 1: Datos de entrenamiento del decodificador Viterbi.

R1'	R0'	R1	R0	A	B	C	D	A	B	C	D'	S
x	x	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
x	x	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1
x	x	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0
x	x	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1
x	x	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
x	x	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
x	x	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1
x	x	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1
1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1
0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1
1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1
0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0
1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1
1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1

Éste puede ser tratado como una máquina de estado con realimentación de los estados de salida, definiendo una arquitectura de red neuronal recurrente, como se muestra en la Figura 3.

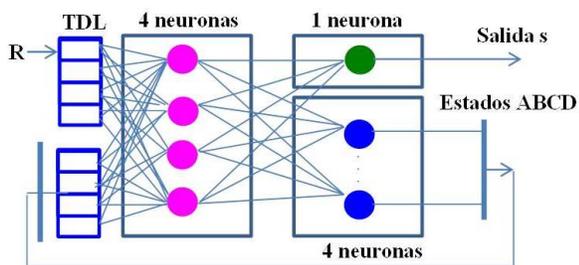


Figura 3: Modelo Neuronal del decodificador Viterbi.

Codificador-Decodificador Reed Solomon con RNA

Veamos el modelo del codificador Reed Solomon como una red dinámica de $n-k$ capas (Figura 4), cada una de estas capas presentan un procesamiento asociado al multiplicador en

campos finitos (particular), y un sumador módulo-2, con *delay* de las entradas y unos pesos sinápticos dados por uno para la entrada de la capa anterior (al sumador) y el coeficiente correspondiente de la capa a procesar, que se opera con la entrada común de la red neuronal.

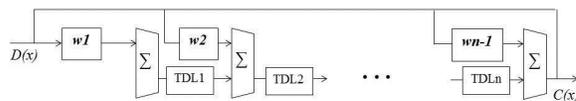


Figura 4: Modelo neuronal del codificador Reed Solomon.

En el diseño del multiplicador en campos finitos de Galois $GF(2^m)$, se consideró la multiplicación para los primeros 16 elementos, partiendo de un conjunto de coeficientes pre-definidos, esto por su utilidad para la codificación Reed Solomon, siendo la Tabla 2 la representación de los productos a entrenar en la red neuronal.

Esto se puede interpretar como una red anidada, es decir que el bloque definido como la matriz de pesos sinápticos, no corresponde a un producto convencional sino a una sub-red neuronal, encargada del procesamiento de los datos de entrada con los coeficientes del polinomio generador $G(x)$, dando como resultado una red fractal [12], con lo que se presenta un enfoque teórico versátil para diversas aplicaciones como los códigos Reed Solomon. De esta manera se pueden definir dos propuestas de configuración del codificador, a través de una Red Dinámica con TDL y multiplicador neuronal para implementación fractal, asociado al modelo del codificador, que permite simplificar el proceso de diseño y entrenamiento de la red, o bien, una red multicapa MPL para implementación paralela, donde la respuesta está directamente asociada al entrenamiento de la red, contrastando la eficiencia hardware y la velocidad de procesamiento de los datos. Estos modelos son importantes para el análisis de la etapa de decodificación. Es así como el modelo neuronal se perfila como una alternativa apropiada, partiendo de la tabla de entrenamiento del decodificador (Tabla 3), para la generalización y corrección de errores por parte de la red diseñada.

Tabla 2: Data de entrenamiento del multiplicador en campos finitos GF.

#	Data															
1	59	13	104	189	68	209	30	8	163	65	41	229	98	50	36	59
2	118	26	208	103	136	191	60	16	91	130	82	215	196	100	72	118
3	77	23	184	218	204	110	34	24	248	195	123	50	166	86	108	77
4	236	52	189	206	13	99	120	32	182	25	164	179	149	200	144	236
5	215	57	213	115	73	178	102	40	21	88	141	86	247	250	180	215
6	154	46	109	169	133	220	68	48	237	155	246	100	81	172	216	154
7	161	35	5	20	193	13	90	56	78	218	223	129	51	158	252	161
8	197	104	103	129	26	198	240	64	113	50	85	123	55	141	61	197
9	254	101	15	60	94	23	238	72	210	115	124	158	85	191	25	254
10	179	114	183	230	146	121	204	80	42	176	7	172	243	233	117	179
11	136	127	223	91	214	168	210	88	137	241	46	73	145	219	81	136
12	41	92	218	79	23	165	136	96	199	43	241	200	162	69	173	41
13	18	81	178	242	83	116	150	104	100	106	216	45	192	119	137	18
14	95	70	10	40	159	26	180	112	156	169	163	31	102	33	229	95
15	100	75	98	149	219	203	170	120	63	232	138	250	4	19	193	100
16	151	208	206	31	52	145	253	128	226	100	170	246	110	7	122	151

Tabla 3: Salida del Decodificador RS.

Palabra Recibida	Palabra Decodificada
1 3 7 0 1 1 5	1 3 7
1 2 3 7 6 4 5	1 2 3
2 3 4 1 6 7 5	2 3 4
5 6 7 6 5 1 6	5 6 7
1 1 1 7 2 6 2	1 1 1
2 4 6 5 7 3 1	2 4 6
2 1 3 2 2 7 7	2 1 3
2 4 1 4 4 0 7	2 4 1
2 5 2 2 0 6 1	2 5 2
2 6 3 5 6 6 2	2 6 3
2 7 4 5 3 1 6	2 7 4
3 1 2 4 6 5 7	3 1 2
3 2 3 3 0 5 4	3 2 3
3 3 4 3 5 2 0	3 3 4
3 4 5 0 6 4 0	3 4 5
3 5 6 6 2 2 6	3 5 6
3 6 7 1 4 2 5	3 6 7
4 1 2 1 4 3 1	4 1 2
4 2 3 6 2 3 2	4 2 3
4 3 4 6 7 4 6	4 3 4

Descripción de las Redes Neuronales en VHDL

El método empleado para el diseño de los módulos en VHDL, correspondientes a los componentes de las redes neuronales, consistió en la descripción generalizada de los tipos de redes, considerando su arquitectura, características de las capas, función de salida de las neuronas en cada capa y modo de entrenamiento. En el caso de describir las redes en hardware, la clasificación por tipo de función, pasa a ser una tabla de búsqueda y las capas reutilizan componentes definidos. Es así como se realizó una configuración generalizada, en la que se pueden definir el número de neuronas por capas, retardos, interacción entre capas, tipo de función

de salida de las neuronas, entre otras. De acuerdo con esto, se describió una red neuronal de tres capas, usando la plataforma de desarrollo ISE 11 de Xilinx (Figura 5).

Las operaciones se definen en la descripción del neuro-decodificador, éste sería el archivo principal que establece la correspondencia entre los puertos de la red, asignando las señales a los puertos de cada componente, allí se realizan las operaciones y devuelve la salida de cada neurona, para el procesamiento de esas señales en los componentes de la siguiente capa. Por otra parte, la expresión *port map*, se encarga de hacer la asignación de cada señal externa del módulo principal (en este caso la red neuronal) a los puertos definidos en el componente, siendo las salidas de estos, definidas como entradas-salida para ser reasignadas en el módulo principal.

Lo que se trata de destacar es la posibilidad de manejo de las diversas redes en hardware:

1. En la multicapa tenemos una red definida de modo paralelo, las señales de entrada serán procesadas de forma concurrente en los componentes.
2. Las redes dinámicas, tendrán asociadas componentes secuenciales (registros), que son manejados por la señal de reloj *clk*, para sincronización del sistema.
3. En el caso de las redes adaptativas, el cálculo de los pesos se realizará sobre el hardware, siendo un entrenamiento secuencial, dentro de una red que puede ser paralela en su arquitectura.

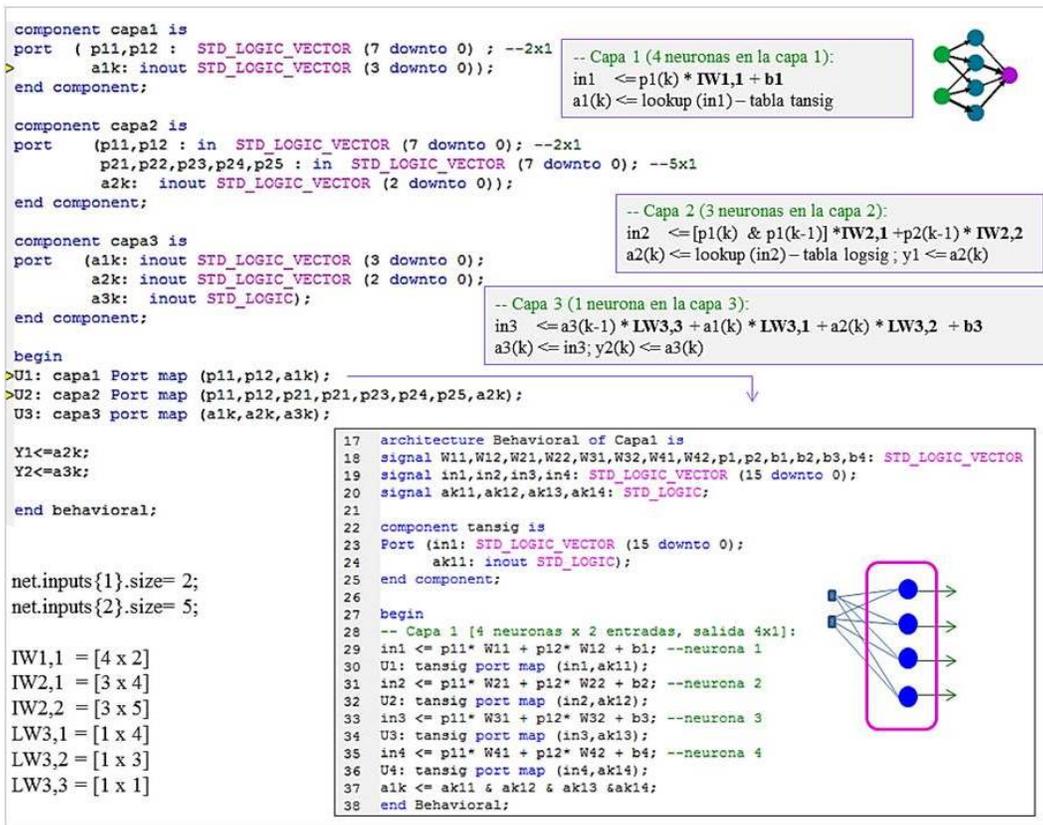


Figura 5: Descripción VHDL de la red neuronal multicapa.

4. En el caso de las redes híbridas se tendría que definir una función particular para la capa no supervisada. Todas estas configuraciones pueden ser definidas para las aplicaciones acá estudiadas.

Finalmente, la red adaptativa, que ajusta los parámetros en el circuito (en línea como se menciona para el caso de redes implementadas en hardware), se debe crear el código para el entrenamiento, y para cada patrón de entrada ajustar los pesos en ese módulo, estos nuevos pesos calculados se le reasignan al componente (las neuronas modificadas). En ese caso, el código en VHDL para definir el algoritmo de ajuste de pesos por corrección de error (en redes supervisadas), estaría ejecutándose para cada nuevo patrón de entrada a la red. Los parámetros de pesos y *bias* pueden modificarse como señales en el componente. Ahora, si se requiere una reconfiguración de la arquitectura se puede modificar de forma dinámica el mapa de bits que define el circuito (programado) de la FPGA.

Dando como resultado el diagrama esquemático de la red, presentado en la Figura 6.

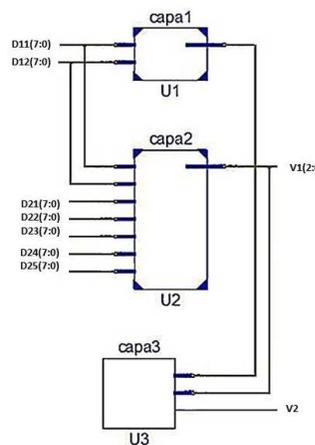


Figura 6: Esquema de configuración de una red neuronal multicapa.

Algoritmos de Entrenamiento de la Red Neuronal en VHDL

En el entrenamiento supervisado (con *targets* conocidos), para el caso de redes lineales de una

sola capa, se aplica la regla de actualización del algoritmo LMS (Least Mean Square), basado en el método de descenso de gradiente SGD (*Stochastic Gradient Descent*), lo que permite calcular los parámetros de la red neuronal (*pesos y bias*), al momento de entrenar la red, con el objetivo de minimizar el error de la salida con respecto al *target*. Este proceso puede tratarse como un entrenamiento por lotes (para la data de entrenamiento, en tiempo de configuración) o un entrenamiento incremental (presentando cada patrón, en tiempo de operación de la red). Este algoritmo permite la configuración de los parámetros de la red en hardware, ya que pueden ser descritos como una rutina de operaciones en VHDL, a partir de su diagrama de flujo (ver Figura 7).

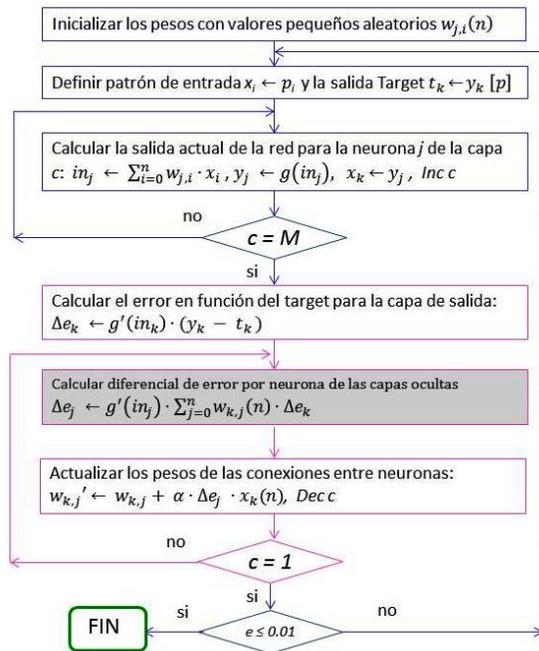


Figura 7: Algoritmo de Entrenamiento para redes multicapa.

Este algoritmo de entrenamiento puede ser configurado en VHDL para la ejecución secuencial del cálculo de los parámetros de la red multicapa, con retro-propagación del error, donde la actualización de los pesos sinápticos y polarización de la capa de salida es calculada directamente del error de la red, en tanto que para las neuronas de la capa oculta se calcula un error diferencial en función de la derivada de la función de salida de la neurona, con el cual se ajustan los pesos de estas neuronas

ocultas, como se presenta en la Figura 8.

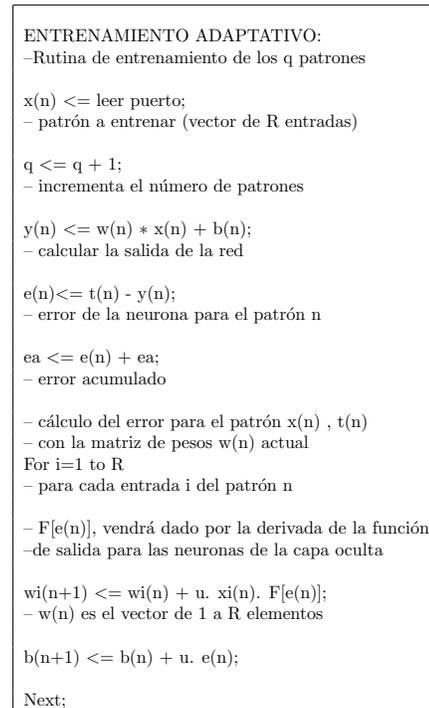


Figura 8: Algoritmo de Entrenamiento de la Red Neuronal.

5. Resultados del Decodificador Reed Solomon (7,3)

Al momento de describir la arquitectura de la red neuronal para hardware, podemos establecer este tipo de clasificaciones de acuerdo a las características y comportamiento. A la vez que se está independizando el manejo de las redes de una herramienta específica, en el caso de estos modelos circuitales, como se muestra en la Tabla 4.

Luego del diseño, se realizó la configuración de la red, en la que se definieron las siete entradas compuestas por tres símbolos de datos y cuatro símbolos de redundancia, y tres neuronas de salida correspondiente a los datos decodificados, teniendo así tres neuronas en la capa de salida (función *lineal*) y se seleccionó cuatro neuronas para la capa oculta (función *sigmoide*), obteniendo como resultados del entrenamiento los parámetros de la red neuronal (Tabla 5).

Con esta red se logra la decodificación y una buena generalización, es decir que decodifica

Tabla 4: Esquemas de Configuración de las RNA en VHDL.

Aplicación	Tipo de Red	Código VHDL
Modelado Dinámico del Código	Multicapa Dinámica	yp: in std_logic_vector (7 downto 0); ... -- d1: TDL port map (in,out); c1: capa_sigma port map (yp,u,aI); n1: neurona port map (pi,wi,bi,y1); ... nS: neurona port map (pi,wi,bi,yS); c2: capa_lineal port map (aI, ym);
Codificación Convolutiva	Lineal Dinámica adaptativa	yp: in std_logic_vector (7 downto 0); ... d1: TDL port map (in,out); -- wij: alg port map (wd,xi,yi); -- wn+1 <= wn+coef*xi*en ... nS: neurona port map (pi,wi,bi,yS); c2: capa_lineal port map (aI, ym);
Modelado Paralelo del Código	Multicapa MPL	yp: in std_logic_vector (7 downto 0); ... c1: capa_sigma port map (yp,u,aI); n1: neurona port map (pi,wi,bi,y1); ... nS: neurona port map (pi,wi,bi,yS); c2: capa_lineal port map (aI, ym);

Tabla 5: Parámetros de la RNA(4,3) del Decodificador RS(7,3).

Pesos de la Capa Oculta (7 Entradas / 4 Neuronas)						
0.28	-0.63	1.00	-0.78	0.25	-0.58	0.79
0.35	-0.38	-0.51	0.79	0.48	0.73	-0.45
-0.33	0.89	0.90	-0.59	-0.16	-0.28	1.09
-0.46	-0.04	1.32	-0.40	0.30	-0.36	-0.10
Pesos de la Capa de Salida (4,3)						
0.51	3.47	0.20	0.23			
0.25	0.04	0.98	0.24			
2.44	0.11	1.84	1.82			
Polarización de la Capa Oculta (4 Neuronas)						
-0.62	0.08	-0.17	0.34			
Polarización de la Capa de Salida (3 Neuronas)						
1.08	1.05	0.87				

palabras de código que no han sido entrenadas, sin embargo su respuesta cuando se simula el ruido en el canal, sobre algún símbolo, solo da la respuesta correcta si éste se presenta en la trama de redundancia. Por lo que se requirió re-diseñar la red para lograr la corrección de datos, agregando neuronas en la capa oculta, obteniendo la salida corregida, con veinte neuronas, como se observa en la Figura 9.

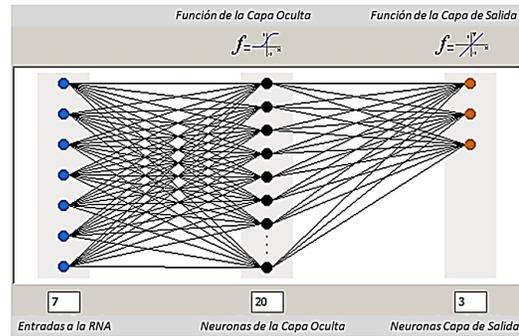


Figura 9: Configuración de la red neuronal MPL.

La Tabla 6 presenta los parámetros de la red neuronal entrenada como decodificador RS(7,3).

Tabla 6: Parámetros de la RNA(20,3) del Decodificador RS(7,3).

Pesos de la Capa Oculta (7 Entradas / 20 Neuronas)						
0.31	-0.65	-1.45	-0.73	1.06	-0.09	-0.36
-0.80	-0.33	-0.50	0.47	-0.75	-0.31	-0.64
1.12	0.15	-0.22	0.98	-0.75	-0.20	0.67
-0.17	-0.64	-0.01	-0.54	1.13	-0.77	2.40
-0.93	0.67	-0.40	0.52	0.66	-1.55	0.35
0.05	0.29	-0.27	1.83	-0.62	-1.15	-1.15
2.11	-0.42	0.55	-0.86	-0.28	2.23	-0.72
-0.61	-0.33	0.25	0.71	2.06	0.64	-0.91
0.05	0.21	0.15	-0.84	-0.98	0.08	1.60
1.04	0.31	0.26	0.14	1.20	-0.50	-1.80
2.11	-0.35	-0.31	0.44	-0.51	-1.44	1.49
1.49	-0.30	0.02	-0.44	-0.74	-1.03	-1.44
0.38	1.79	-0.96	0.86	-1.21	0.31	-0.63
0.95	-0.72	-1.20	-0.03	0.99	-0.23	0.74
-0.27	-0.48	0.51	-1.15	-0.47	-0.79	0.65
-0.20	0.08	2.65	-0.95	-1.13	-0.31	1.28
0.68	-0.35	1.48	0.03	-1.66	-1.66	0.76
-1.17	2.11	1.94	0.12	-0.72	-0.58	-1.72
1.35	0.63	-2.16	-0.74	-0.74	0.70	0.45
-0.10	-0.13	0.03	2.00	0.37	-0.76	-0.70
Pesos de la Capa de Salida (20,3)						
1.82	-0.12	-1.90	-1.13	0.20	-0.41	1.94
-0.25	1.14	1.45	1.28	-0.98	0.44	0.69
-1.09	1.07	0.95	-0.28	0.34	1.34	
-0.76	0.27	1.69	0.66	0.01	-2.11	-1.75
1.04	0.58	1.52	2.00	0.89	1.46	1.08
-1.16	0.61	2.04	1.93	-1.07	-0.11	
-0.74	0.54	0.08	2.13	1.34	0.67	2.68
-1.53	1.46	0.45	-0.24	0.85	0.28	0.80
0.22	1.47	1.47	1.30	-0.96	-1.65	
Polarización de la Capa Oculta (20 Neuronas)						
0.99	-0.21	-0.40	-1.16	0.31		
0.38	-0.04	0.91	0.65	-0.21		
0.38	0.45	0.05	0.28	-0.16		
-0.76	-0.77	-0.86	0.31	-0.12		
Polarización de la Capa de Salida (3 Neuronas)						
-1.15	0.08	0.01				

Los parámetros se encuentran representados por las matrices de pesos sinápticos y polarizaciones de las neuronas, en cada capa. Para esta configuración de la MPL con 20 neuronas en la capa oculta y 3 neuronas en la capa de salida, definida como una RNA (20,3).

Se realizó un conjunto de pruebas, introduciendo

do símbolos con ruido en alguna de las posiciones de la palabra de código (una entrada con uno de los símbolos de datos errado), en todos los casos se obtuvo la salida correcta, de acuerdo al target. Es decir, se realiza la corrección de los errores, por parte de la red neuronal MPL diseñada como decodificador Reed Solomon (7,3).

Una de las pruebas consistió en introducir un error en el tercer símbolo de datos, para la trama de datos [3.0 2.0 3.0], se colocó como entrada de la red neuronal la trama de datos [3.0 2.0 1.0], con los símbolos de redundancia correspondientes en los patrones de entrada, como se presenta en la Figura 10.

Patrones de Entrada			
1	2	3	4
3.0	2.0	1.0	3.0
3.0	1.0	2.0	4.0
4.0	2.0	3.0	6.0
4.0	1.0	2.0	1.0
3.0	5.0	4.0	6.0

Salidas Correctas		
1	2	3
3.0	2.0	3.0
3.0	1.0	2.0
4.0	2.0	3.0
4.0	1.0	2.0
3.0	5.0	6.0
3.0	6.0	7.0

Salidas de la Red		
1	2	3
2.97287126...	1.61557760...	2.82625059...
3.00455139...	1.04922797...	1.85641486...
3.98000717...	1.88396862...	3.00487004...
3.96256440...	0.98521806...	2.16989648...
3.18528954...	5.29228744...	5.82362017...
2.99013565...	5.93008890...	6.99874396...

Figura 10: Resultados de la RNA (20,3) del Decodificador Reed Solomon.

Se puede observar en la Figura 10 la corrección de los datos, obteniendo en las salidas de la red la trama de datos [2.97287126 1.61557760 2.82625059], donde se corrige el tercer símbolo que corresponde con la salida correcta de la trama [3.0 2.0 3.0].

6. Conclusiones

En esta investigación se consideró el diseño de las etapas de procesamiento de códigos de canal,

se partió del diseño de los codificadores en base a modelos circuitales, usando redes neuronales dinámicas recurrentes multicapa, obteniendo resultados válidos a partir de nueve neuronas en la capa oculta, destacando que el algoritmo de entrenamiento aumenta su complejidad para la implementación en hardware. En el caso del código convolucional, se realizó el análisis del diagrama de estados para definir la tabla de entrenamiento, de la máquina secuencial. Este modelado en VHDL de las etapas del sistema de comunicación, permitió establecer una correspondencia entre la topología de las redes neuronales con la aplicación a implementar.

En el caso del codificador Reed Solomon aplicando multiplicadores en campos finitos [11], modelados a través de una red neuronal interna para el procesamiento de la señal de entrada a la red neuronal codificadora, se evidencia un modelo fractal [12], con una red neuronal compuesta, que permite una fácil descripción y modelado, disminuyendo las exigencias del entrenamiento. En segundo lugar se realizó el diseño y entrenamiento de una red multicapa sin retardos ni realimentación, para establecer el modelo paralelo del circuito decodificador Reed Solomon, lo que permitió un avance en la eficiencia lograda y una valiosa mejora en los tiempos de respuesta, con relación al procesamiento secuencial.

El diseño de estos decodificadores permitió observar las ventajas de su implementación a través de redes neuronales en hardware, siendo ésta una solución innovadora, eficiente y en hardware libre. La descripción generalizada de los modelos en VHDL que se han desarrollado, permite el diseño de redes neuronales reconfigurables, que pueden modificar su estructura a partir de las condiciones detectadas en el entorno de operación. Siendo éste el objetivo de los sistemas de radio cognitivo, donde se busca la percepción de las características del canal de comunicación y la adaptación inteligente de los módulos de procesamiento de datos para el tratamiento de las señales, ajustando su esquema de codificación/modulación y parámetros asociados, como se logra definir en la descripción VHDL de las redes neuronales.

El aporte principal del trabajo viene dado por

la configuración de estos componentes, a través de redes neuronales, por ser éstas estructuras flexibles con parámetros adaptativos como son los pesos sinápticos y *bias*. En tanto, que la descripción de los algoritmos de entrenamiento en hardware, permite el soporte de redes adaptativas, cuyos parámetros pueden ser calculados en el circuito, a partir de un entrenamiento en tiempo real, para lo que se propone tramas de encabezados conocidos, a fin de ajustar los parámetros de la red.

Los modelos neuronales descritos pueden ser utilizados para decodificación/demodulación adaptativa, basada en las diversas redes neuronales para reconocimiento de señal, ajustando la configuración de la red con los datos establecidos como señal piloto, es decir que se pueden realizar entrenamientos dinámicos, en los circuitos desarrollados para la tecnología de arreglos de compuerta programable – FPGA. De esta manera, se puede definir un nuevo concepto de sistemas de comunicaciones digitales neuro-cognitivos, los cuales puedan aprender y optimizar su desempeño a partir de las condiciones detectadas. Lo que crea un área de investigación para la producción de conocimiento y desarrollo de tecnología, que optimiza la eficiencia de los diseños, con una disminución del consumo de energía, basados en modelos neuronales reconfigurables.

Referencias

- [1] Cesar Hernández, Luis Fernando Pedraza Martínez y Fredy Hernán Martínez Sarmiento. Algoritmos para asignación de espectro en redes de radio cognitiva. *Tecnura*, 20(48):69–88, 2016.
- [2] Tobias Gruber, Sebastian Cammerer, Jakob Hoydis, and Stephan ten Brink. On deep learning-based channel decoding. In *Information Sciences and Systems (CISS), 2017 51st Annual Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2017.
- [3] X-A Wang and S. B. Wicker. An artificial neural net Viterbi decoder. *IEEE Transactions on Communication*, 44(2):165–171, 1996.
- [4] Ja-Ling Wu, Yuen-Hsien Tseng, and Yuh-Ming Huang. Neural network decoders for linear block codes. *International Journal of Computational Engineering Science*, 3(03):235–255, 2002.
- [5] Michael Eoin Buckley and Stephen B. Wicker. The design and performance of a neural network for predicting turbo decoding error with application to hybrid arq protocols. *IEEE Transactions on Communications*, 48(4):566–576, 2000.
- [6] Cecilia Sandoval Ruiz. FPGA prototyping of neuro-adaptive decoder. In *Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on Computational Intelligence, Man-machine Systems and Cybernetics, CIMMACS '10*, pages 99–104, Stevens Point, Wisconsin, USA, 2010. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS).
- [7] Nicholas Bonello, Sheng Chen, and Lajos Hanzo. On the design of pilot symbol assisted codes. In *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2009-Fall), 2009 IEEE 70th*, pages 1–5. IEEE, 2009.
- [8] Cecilia Sandoval. Modelo neuro-adaptativo en VHDL, basado en circuitos NLFSR, para control de un sistema inteligente de tecnología sostenible. *Universidad Ciencia y Tecnología*, 21(85):140–149, 2017.
- [9] Cecilia E. Sandoval-Ruiz. Logical-mathematical model of encoder 2D-RS for hardware description in VHDL. *Revista Ingeniería UC*, 24(1):28–39, 2017.
- [10] C. Sandoval-Ruiz. Modelo de estructuras reconfigurables con registro desplazamiento, para lenguaje descriptor de hardware VHDL. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 31(3):63–72, 2016.
- [11] Cecilia Esperanza Sandoval-Ruiz. VHDL optimized model of a multiplier in finite fields. *Ingeniería y Universidad*, 21(2):195–211, 2017.
- [12] Cecilia Sandoval-Ruiz. Análisis de circuitos fractales y modelado a través de sistema de funciones iteradas para VHDL caso de estudio: codificador Reed Solomon. *Ciencia e Ingeniería*, 38(1):3–16, 2017.
- [13] V. Fernandes, M. Díaz y C. Sandoval-Ruiz. Sistema eficiente de modulación digital basado en radio cognitivo. In *1^{er} Congreso Venezolano de Ciencia, Tecnología e Innovación*, volume 1, page 285, Venezuela, 2012. Ministerio del Poder Popular de Ciencia, Tecnología e Innovación.
- [14] Cecilia Sandoval and Antonio Fedón. Codificador de fuente programado en VHDL para dispositivos de hardware reconfigurable. *Ciencia e Ingeniería*, 28(1):37–40, 2007.
- [15] Cecilia Esperanza Sandoval-Ruiz and Antonio Fedón-Rovira. Codificador RS (255, k) en hardware reconfigurable orientado a radio cognitivo. *Ingeniería y Universidad*, 17(1):77–91, 2013.
- [16] C. Sandoval Ruiz. Diseño modular de un sistema para procesamiento y comunicación digital en banda base usando programación en VHDL. Tesis de Maestría, Dirección de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2012.
- [17] Howard B. Demuth, Mark H. Beale, Orlando De Jess, and Martin T. Hagan. *Neural Network Design*. Martin Hagan, USA, 2nd edition, 2014.
- [18] Ken Alberto Harima Sakaguchi. Decodificación de salida suave para códigos Reed-Solomon y su aplicación a códigos concatenados. Tesis de Maestría,

Decanato de Estudios de Postgrado, Universidad
Simón Bolívar, Caracas, Venezuela, 2006.

Susceptibility to the intergranular attack of duplex stainless steel exposed to nitric acid with 65 % concentration in boiling

Laura Sáenz Palencia^{*a}, Felipa Pevalonic^b, Oskar García^b

^a*Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica Automotriz, Universidad de las Fuerzas Armadas, Latacunga, Ecuador.*

^b*Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.*

Abstract.-

The purpose of the present study was to evaluate the susceptibility to intergranular attack of stainless steel Duplex SAF 2507 exposed to nitric acid (HNO₃) with 65 % concentration. SAF 2507 steel coupons were used for this study, which were subjected to five times of exposure to the medium corrosive: 48 h, 96 h, 144 h, 192 h, and 240 h. Subsequently, weight loss analysis, optical microscopy, scanning electron microscopy and X-ray energy dispersive spectroscopy EDS were performed. The evaluation showed a progressive behavior of weight loss according to the exposure periods determined of 24.33 %, the deterioration of the microstructure showed the presence of cracks in the interfaces, α/γ intergranular corrosion and loss of homogeneity of the microstructure, determined a further deterioration for SAF 2507 duplex steel. X-ray scattered energy spectroscopy analysis showed the migration of chromium and nickel elements in both cases.

Keywords: duplex stainless steel; intergranular corrosion; nitric acid.

Susceptibilidad al ataque intergranular del acero inoxidable dúplex expuesto al ácido nítrico con 65 % de concentración en ebullición

Resumen.-

El propósito del presente estudio es evaluar la susceptibilidad al ataque intergranular del acero inoxidable dúplex SAF 2507 expuesto al ácido nítrico (HNO₃) con 65 % de concentración en ebullición. Para la realización de este estudio se emplearon cupones de acero dúplex SAF 2507, los cuales fueron sometidos a cinco tiempos de exposición al medio corrosivo: 48 h, 96 h, 144 h, 192 h, y 240 horas. Posteriormente se realizaron análisis por pérdida de peso, microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido y, espectroscopia de energía dispersiva de rayos X EDS. En la evaluación se observó un comportamiento progresivo de la pérdida de peso en función de los periodos de exposición de 24.33 %, el deterioro de la microestructura mostro la presencia de grietas en las intercaras, α/γ corrosión intergranular y perdida de la homogeneidad de la microestructura, determinándose un evidente deterioro del acero inoxidable dúplex SAF 2507, mediante el análisis de espectroscopia de energía dispersa de rayos X se detectó la migración de los elementos cromo y níquel.

Palabras clave: acero inoxidable dúplex; corrosión intergranular; ácido nítrico.

Recibido: julio 2017

Aceptado: noviembre 2017

1. Introducción

Los aceros inoxidables dúplex pueden definirse como una familia de aceros que tienen una microestructura de dos fases, ferrita (α) austenita (γ), distribuidas en fracciones volumétricas aproximadamente iguales, es decir; próximos al

*Autor para correspondencia

Correo-e: lasaenz@espe.edu.ec (Laura Sáenz Palencia)

50 y 50% [1]. El inicio de la fabricación de aceros dúplex fue en 1930, cuando en Suecia se les dio un amplio uso para la industria de papel vegetal [1]. Diez años más tarde surgen numerosos programas de investigación y con ello comienza la producción industrial de aceros dúplex por la actualmente reconocida empresa sueca Sandvik. Sin embargo esta primera generación de aceros dúplex presentaba problemas al ser soldado, debido a que en las zonas afectadas por el calor, la soldadura cambia de microestructura y la cantidad de ferrita aumentaba, por ende disminuía la tenacidad y resistencia a la corrosión [1]. En el año 1970, con el incremento de la necesidad de tener aceros inoxidable con gran resistencia al ataque de cloruros y altas tensiones de fluencia, surge la segunda generación de aceros dúplex, definidos según su contenido en nitrógeno. Fueron los aceros inoxidable dúplex 22Cr los que comenzaron a sustituir a los austeníticos clásicos, la producción de estos aceros estuvo destinada principalmente a la fabricación de tuberías de gas y a aplicaciones en plataformas marinas [2].

A partir del año 1980, surge la última generación de aceros inoxidable conocida como los súper-dúplex, diseñados especialmente para aplicaciones petrolíferas. En la actualidad el empleo de los súper-dúplex junto a los dúplex 22Cr y 23Cr, está siendo cada vez más extendido, dadas sus excepcionales propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión, además de una aceptable soldabilidad [1]. Los aceros inoxidable dúplex son susceptibles a la sensibilización debido a la precipitación de fases adicionales cuando se calientan en un rango de temperatura de 600-950 °C. Estas fases tienen un efecto inverso sobre la corrosión y las propiedades mecánicas [3, 4]. Un agotamiento sustancial de Cr y Mo debido a una copiosa precipitación de fases que da lugar a una disminución de las propiedades de corrosión [4, 5].

En términos de sus aplicaciones industriales, los aceros dúplex ofrecen una atractiva combinación de propiedades, que influyen alta resistencia mecánica y excelente resistencia al agrietamiento por corrosión bajo tensiones, en atmósferas cloruradas. Sin embargo, el alto contenido de aleantes y existencia de una matriz ferrítica aumentan

su susceptibilidad a la fragilización cuando se someten a altas temperaturas de servicio durante prolongados periodos de tiempo. [6, 7] provocando formación de fase sigma σ , o en su defecto, a enfriamientos lentos [8, 9, 4, 10]. El lugar que ocupan los aceros inoxidable en las aplicaciones industriales es cada día mayor, de allí la necesidad de ampliar su investigación y desarrollo para cubrir los requerimientos en las nuevas aplicaciones.

Desde el punto de vista de la Ingeniería es indispensable conocer el comportamiento al desgaste o pérdida de material y dureza de estos aceros sometidos al efecto de un medio corrosivo. La corrosión está ligada en la industria a problemas tanto de seguridad como económicos. Es una de las principales causas que afectan negativamente el rendimiento de los elementos de máquinas, incidiendo directamente en la disminución de las propiedades mecánicas y acortando la vida útil del material ya que tiene la tendencia a convertirlos en óxidos, carbonatos, sulfatos etc. El estudio de la susceptibilidad al ataque intergranular de los aceros inoxidable sometido a un medio corrosivo, representa un tema de estudio de importancia, por lo que la presente investigación se traza como objetivo determinar la susceptibilidad al ataque intergranular del acero inoxidable dúplex SAF 2507 expuesto al ácido nítrico con 65% de concentración en ebullición.

2. Materiales y métodos

Se utilizó un acero inoxidable dúplex SAF 2507 SANDVIK en barras de 3 metros de longitud y de 1/2 pulgada de diámetro. La composición química del acero se muestra en la tabla 1.

Tabla 1: Composición Química del acero inoxidable SAF 2507 [11].

Composición Química (% en peso)								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
0,014	0,33	0,77	0,017	0,0006	25,15	6,96	3,91	0,282

Se utilizaron 30 cupones rectangulares de acero inoxidable dúplex SAF 2507, Los cupones utilizados fueron de forma rectangular con dimensiones

de 50,8 mm (2 in) de largo por 12,7 mm (0,5 in) de ancho y 3 mm (0.118 in) de espesor (ver Figura 1). El medio corrosivo utilizado fue ácido nítrico (HNO_3) al 65 % de concentración y en ebullición, basado en la norma ASTM A 262-02 práctica C [12]. Se utilizaron seis cupones por tipo de acero, en cada periodo de ensayo, de acuerdo a lo indicado en la norma ASTM G4-01 [13].



Figura 1: Dimensiones en mm del cupón rectangular (norma ASTM G4-01) [11].

El ensayo de corrosión se realizó en para tiempos de 48 h, 96 h, 144 h, 192 h, y 240 horas, de acuerdo a las especificaciones de la norma ASTM A 262-02 [12]. Cada uno de los cupones fue sometido a un tratamiento de sensibilización a 675 °C por una hora. Se realizó la limpieza de las muestras de acuerdo a la norma ASTM G1-03 [14], que consistió en sumergir las muestras en acetona (CH_3COCH_3) para desengrasar. Transcurrido un tiempo corto se enjuagan con abundante agua destilada, de ser necesario se limpia con un cepillo de cerdas suaves no metálicas para eliminar cualquier película de óxido remanente y se enjuaga nuevamente y, finalmente se secan en una estufa hasta eliminar toda la humedad presente. Luego los cupones se colocaron en un desecador en el que permanecen hasta el momento del montaje del ensayo.

Se determinó la velocidad de corrosión, de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM A262 – Práctica C [12], haciendo uso de la ecuación (1), ASTM G-31 [15].

$$V_c = \frac{7290W}{A d t} \quad (1)$$

Donde:

W: Pérdida de peso promedio por cada condición de ensayo, (g).

A: Área promedio inicial que será expuesta al medio corrosivo por cada condición de ensayo, (cm^2).

D: Densidad del material, (g/cm^3) [dúplex 2507 = $7,75 \text{ g}/\text{cm}^3$]

t: Tiempo de exposición en horas, (h).

V_c : Velocidad de corrosión calculada en base a la ecuación establecida en la norma ASTM A262 –Práctica C, (mm/mes).

Los cupones se prepararon por las técnicas convencionales de desbaste y pulido. Para la observación de la microestructura se utilizó un microscopio marca Versmet-2 Unión 7761 y un Detector de EDS marca JEON modelo JSM-6390. Se utilizó como reactivo de ataque: 1g de Bisulfito de Sodio (NaHSO_3) disuelto en 50 mL de agua (H_2O) destilada y 15mL de ácido clorhídrico (HCl) durante un tiempo de 50s aproximadamente.

3. Resultados y discusión

3.1. Pérdida de peso y velocidad de corrosión

Las Figuras 2 y 3 muestran el comportamiento de la pérdida de peso y la velocidad de corrosión en función del periodo de exposición en ácido nítrico. En la Figura 2 el acero dúplex SAF 2507 se aprecia pérdida de material 24,33 % de pérdida de material promedio, se observa 48 h de exposición este tiene una pérdida de material promedio de 0,157 g hasta 3,665 g para 240 h de exposición, incrementándose el valor de la pérdida inicial para el último periodo de exposición en 23 veces su valor. La pérdida de peso promedio determinada en el acero dúplex SAF 2507 evidencia la susceptibilidad al ácido nítrico al 65 % de concentración en ebullición.

En la Figura 3 se relaciona la velocidad de corrosión en función del tiempo de exposición al ácido nítrico al 65 % en ebullición, el acero dúplex SAF 2507 los valores van desde una pérdida de material promedio de 0,157 g a una velocidad de 0,1870 mm/mes para al primer periodo hasta llegar al periodo de 144 horas con una pérdida de material promedio de 0,704 g a una velocidad de 0,2844 mm/mes, mostrando un aumentando su velocidad solo 1,5 veces su valor inicial y su pérdida de material promedio en 4,5 veces su valor inicial. Los valores que alcanzan en el periodo final de exposición de 240 h para pérdida de material promedio de 3,665 g a una velocidad de 0,8735 mm/mes (10,482 mm/año y finalmente llegar a un incremento de 23 veces la pérdida de material

inicial con un aumento de 4,5 veces la velocidad promedio de corrosión.

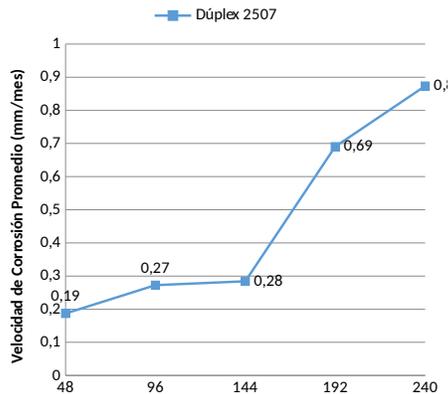


Figura 2: Pérdida de masa promedio entre los aceros dúplex 2507 después de su exposición en ácido nítrico al 65 % en ebullición [11].

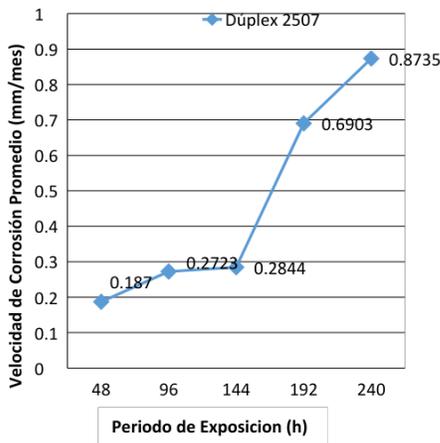


Figura 3: Velocidad de corrosión promedio del acero dúplex 2507 después de su exposición en ácido nítrico al 65 % en ebullición [11].

En función al mayor incremento que sufre el acero inoxidable dúplex SAF 2507 en cuanto a pérdida de material promedio y velocidad de corrosión promedio, se puede apreciar que a partir del periodo de 144 horas de exposición, comienza una disminución en la capa pasivadora del acero inoxidable lo que los hace más susceptibles al medio corrosivo. En líneas generales para el aceros inoxidable se observa que las curvas de velocidad de corrosión y pérdida de material tienen un comportamiento creciente lo que significa que a medida que transcurre el tiempo, el deterioro del

acero se acelera, reflejando alta susceptibilidad del acero inoxidable al incremento en el tiempo de exposición en ácido nítrico al 65 % en ebullición, coincide comportamiento presentado por Sáenz et al [10].

3.2. Microscopía óptica

En la Figura 4a) y 4b) se observa la microestructura del acero dúplex a 200x y 400x identificándose claramente las fases ferrita (fase oscura) y austenita (fase clara).

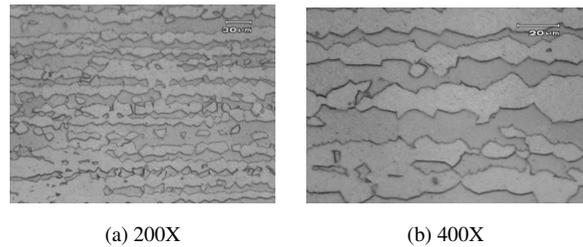


Figura 4: Microscopía óptica de luz del acero dúplex SAF 2507 en condición original [11].

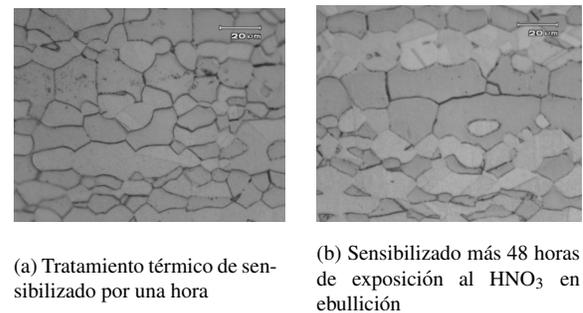
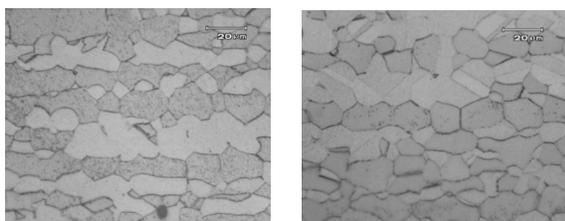


Figura 5: Microscopía óptica de luz para el acero dúplex 2507 sensibilizado a 675 °C [11].

En la Figura 5a) se observan las muestras luego de realizado el tratamiento térmico de sensibilizado a 675°C por una hora de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM A262-02, para el acero inoxidable dúplex y, se observa en los límites de grano la precipitación abundante de carburos, presumiblemente de cromo. Se hace visible que el tratamiento de sensibilización, aumento la susceptibilidad entre las fases, bordes de grano y en los puntos triples, provocados por la disminución del contenido de cromo en las regiones vecinas a los bordes, que generan la susceptibilidad a la corrosión intergranular. En la

Figura 5b) acero inoxidable dúplex con exposición de 48 horas en HNO₃ al 65 % de concentración en ebullición, que es evidente la fractura intergranular en ambos aceros en los puntos triples y en las intercaras, en el acero dúplex la fase oscura es la más afectada (fase ferrita, α) que la fase austenítica debido a la ausencia del cromo, mientras que en la fase austenítica no se observan cambios significativos.

En la Figura 6a) se muestran la microestructura del acero expuestos a 96 horas de exposición al HNO₃ al 65 % de concentración en ebullición, se observa que la fase ferrítica está más afectada, En la Figura 6b) se muestran las microestructuras de acero inoxidable sometido a 144 horas de exposición al HNO₃ al 65 % de concentración en ebullición, se observan la corrosión intergranular.



(a) Sensibilizado con 96 horas de exposición al HNO₃

(b) Sensibilizado con 144 horas de exposición al HNO₃

Figura 6: Microscopía óptica de luz del acero dúplex SAF 2507 con sensibilizado con 96h y 144h de exposición al HNO₃ [11].

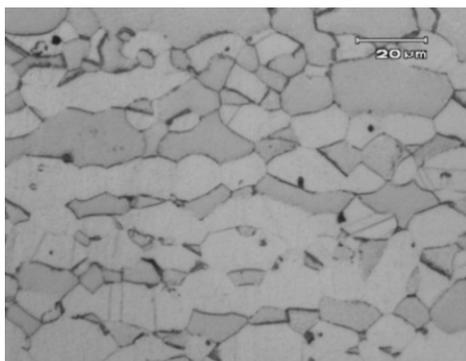


Figura 7: Microscopía óptica de luz de la muestra en condición sensibilizado más 192 horas de exposición al HNO₃ al 65 % de concentración en ebullición del acero dúplex 2507 fase oscura α y fase clara γ [11].

Para las 192 horas de exposición al HNO₃ al 65 % de concentración en ebullición (Figura 7), se

observa la formación de carburos de cromo en la fase ferrítica y en las intercaras α/γ de las muestras de acero dúplex SAF 2507.

3.3. Microscopia Electrónica de Barrido

En la muestra del acero dúplex SAF 2507 en su condición original (Figura 8), se ven claramente definidas las dos fases austenita y ferrita, las islas de austenita sobre una matriz de ferrita, el EDS del grano ferrítico presenta 26,22 %Cr y 10,46 %Ni, mientras que en la Figura 9 se observa el detalle de la composición química de la intercara notándose la presencia de Molibdeno. También se puede observar el agrietamiento intergranular bien demarcado en las intercaras de grano ferrítico/austenítico. En la Figura 10 se muestra la condición más crítica de 240 h de exposición el agrietamiento intergranular bien demarcado, luego al realizar el análisis por EDS en las intercaras (Figura 11) se encontró la presencia de azufre y la disminución del cromo y molibdeno, por lo que se puede presumir la presencia de fase sigma. El deterioro del material es evidente la susceptibilidad del acero duplex SAF 2507 a corrosión intergranular al ser sometido a tratamiento de sensibilización y expuesto al HNO₃ al 65 % de concentración en ebullición durante 240 horas. Este comportamiento es similar al encontrado por Saenz et al. [10].

Elemento	% peso	% atómico
CrK	26,22	27,76
FeK	63,32	62,43
NiK	10,46	9,81

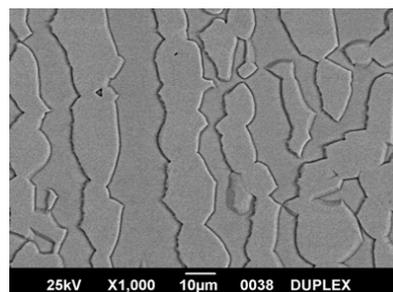


Figura 8: EDS para la muestra original de acero dúplex SAF 2507 (composición fase ferrita bajo relieve) [11].

Elemento	% peso	% atómico
CrK	24,19	25.99
FeK	62,46	62.49
NiK	10,11	9.62
MoL	3,25	1.89

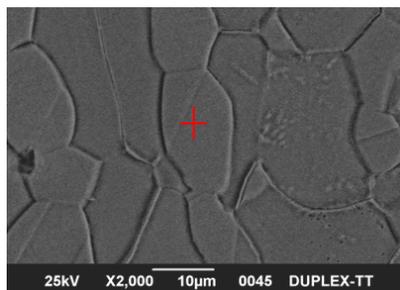


Figura 9: EDS para la muestra original de acero dúplex SAF 2507 (composición intercara) [11].

Elemento	% peso	% atómico
CrK	22,31	24.10
FeK	65,37	65.74
NiK	7,97	7.62
MoL	4,34	2.54

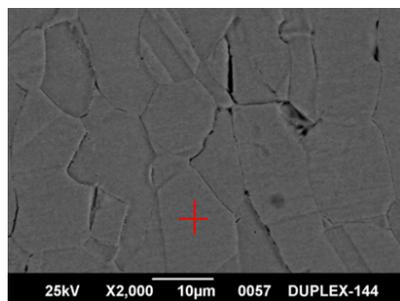


Figura 10: EDS para el acero dúplex SAF 2507 con sensibilización más 240 horas de exposición (centro de grano) al HNO₃ al 65 % de concentración en ebullición [11].

4. Conclusiones

Se determinó para el acero dúplex SAF 2507 con exposición al HNO₃ al 65 % de concentración en ebullición un porcentaje mayor de pérdida de material 24,33 %, partiendo de 48 h de exposición con 0,157 g hasta 3,665 g para 240 h de exposición, por otra parte se determinó que la velocidad de corrosión oscila de 0,187 mm/mes (1,8477mm/año) para 48 h de exposición hasta 0,8735mm/mes para 240 h de exposición, manifestando este acero un alto grado de sensitización por la pérdida de peso encontrada debido posiblemente a la disolución de Cr. En función al mayor incremento que sufre el acero en cuanto a pérdida de material promedio

Elemento	% peso	% atómico
SK	1,56	2,65
CrK	24,43	25,68
FeK	63,58	62,24
NiK	9,63	8,97
MoL	0,80	0,46

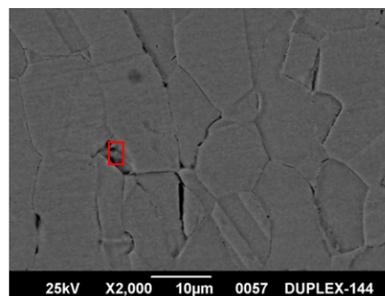


Figura 11: EDS para el acero dúplex SAF 2507 con 240 horas de exposición (borde de grano) al HNO₃ al 65 % de concentración en ebullición [11].

y velocidad de corrosión promedio, se puede apreciar que a partir del periodo de 144 horas de exposición, comienza una disminución en la capa pasivadora del acero inoxidable lo que los hace más susceptible a la exposición del ácido nítrico al 65 % de concentración en ebullición.

La microestructura del acero dúplex SAF 2507 observada tanto por microscopía óptica de luz como de microscopía electrónica de barrido MEB, evidenció la formación de precipitados de carburos de cromo visibles en todos los periodos de exposición a consecuencia del tratamiento de sensibilización. Se puede observar en valores porcentuales la presencia del molibdeno en las Figuras 9, 10 y 11 para el acero dúplex SAF 2507. A medida que incrementa el tiempo de exposición en el ácido los contenidos porcentuales de cromo y níquel disminuyen, también se observó que el Cr migra hacia el centro del grano, mientras que él Ni migra hacia el límite de grano. Hay un agotamiento sustancial de Cr y Mo debido a una copiosa precipitación carburos y fases que dan lugar a una disminución de las propiedades de corrosión [3, 4, 16].

A 240 horas de exposición al HNO₃ al 65 % de concentración en ebullición se observa en la presencia de grietas y el mecanismo de corrosión intergranular, además por EDS se cuantifico contenidos de azufre en la fase ferrítica (Figura 11)

que contribuyeron a la fragilización del acero dúplex SAF 2507 expuesto al HNO₃ al 65 % de concentración en ebullición.

Referencias

- [1] J. O. Nilsson. The physical metallurgy of duplex stainless steel. In *5th World Conference on Duplex Stainless*, pages 73–82. KCI Publishing, 1997.
- [2] S. K. Ghosh and S. Mondal. High temperature ageing behaviour of a duplex stainless steel. *Materials Characterization*, 59(12):1776–1783, 2008.
- [3] M. E. Wilms, V. J. Gadgil, J. M. Krougman, and B. H. Kolster. The effect of σ -phase precipitation at 800° c on the mechanical properties of a high alloyed duplex stainless steel. *Materials at high temperatures*, 9(3):160–166, 1991.
- [4] N. López, M. Cid, and M. Puiggali. Influence of σ -phase on mechanical properties and corrosion resistance of duplex stainless steels. *Corrosion Science*, 41(8):1615–1631, 1999.
- [5] T. H. Chen and J. R. Yang. Effects of solution treatment and continuous cooling on σ -phase precipitation in a 2205 duplex stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 311(1):28 – 41, 2001.
- [6] Michael Pohl, Oliver Storz, and Thomas Glogowski. Effect of intermetallic precipitations on the properties of duplex stainless steel. *Materials Characterization*, 58(1):65–71, 2007.
- [7] I. Calliari, M. Zanesco, and E. Ramous. Influence of isothermal aging on secondary phases precipitation and toughness of a duplex stainless steel SAF 2205. *Journal of Materials Science*, 41(22):7643–7649, 2006.
- [8] Henrik Sieurin and Rolf Sandström. Sigma phase precipitation in duplex stainless steel 2205. *Materials Science & Engineering: A*, 444(1-2):271–276, 2007.
- [9] A Gregori and J. O. Nilsson. Decomposition of ferrite in commercial superduplex stainless steel weld metals; microstructural transformations above 700° C. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33(4):1009–1018, 2002.
- [10] Laura Sáenz P., Jean Martin D. y Juan A. Medina M. Evaluación de la tenacidad de impacto del acero inoxidable dúplex SAF 2507 expuesto al ácido nítrico. *Revista Ingeniería y Sociedad*, 8(2):102–116, 2013.
- [11] Felipa Pevalonic y Oskar García. Evaluación de la susceptibilidad al ataque intergranular de los aceros inoxidables aisi 316 y saf 2507 (dúplex) en ácido nítrico (HNO₃) al 65 % de concentración en ebullición según la norma ASTM A262-02 (Práctica C). Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2009.
- [12] ASTM A262-02a(2008), Standard practices for detecting susceptibility to intergranular attack in austenitic stainless steels, 2008.
- [13] ASTM G4-01(2008), Standard guide for conducting corrosion tests in field applications, 2008.
- [14] ASTM G1 - 03(2003), Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens, 2003.
- [15] ASTM G31-72(2004), Standard practice for laboratory immersion corrosion testing of metals, 2004.
- [16] M. E. Arikan and Mustafa Doruk. Determination of susceptibility to intergranular corrosion of UNS 31803 type duplex stainless steel by electrochemical reactivation method. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 32(6):323–335, 2009.

Study of the mathematical equation of the heart rate on the base of the viscous damped oscillator

Aleida Cantor Rudas*

Departamento de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

Abstract.-

To establish the mathematical relationship of the heart rate and a viscous dampened oscillator, we proceeded to compare a cardiac cycle represented by a succession of waves in the ECG record of 30 people before and after the exposure to the radiation of colored light bulbs and the solution of the differential equation of second order and grade one of a spring mass system with viscous damping linked to a resistive force provide at its speed. In a non-probabilistic sample, three records or typical cases of the population were selected at random to identify the P wave, the QRS wave or complex, the T wave and U with the graph of the solution of a viscous damped oscillator, through the enunciation of Newton's law. Consequently, the analysis of this oscillator provides information regarding similar phenomena, such as the heart rate. In conclusion, a mechanical system and a biological system present analogies in their behavior, which is described through a mathematical equation that allows to relate the variables that intervene in the phenomenon under study.

Keywords: cardiac cycle; heart rate; oscillator; cushioned; viscous.

Estudio de la ecuación matemática de la frecuencia cardiaca en base del oscilador amortiguado viscoso

Resumen.-

Para establecer la relación matemática de la frecuencia cardiaca y un oscilador amortiguado viscoso se procedió a comparar un ciclo cardiaco representado por una sucesión de ondas en el registro del ECG de 30 personas antes y después de la exposición a la radiación de bombillos de colores y la solución de la ecuación diferencial de segundo orden y grado uno de un sistema masa muelle con amortiguamiento viscoso vinculado a una fuerza resistente proporcional a su velocidad. En una muestra no probabilística, se seleccionaron al azar tres registros o casos típicos de la población para identificar la onda P, la onda o complejo QRS, la onda T y U con la gráfica de la solución de un oscilador amortiguado viscoso, a través del enunciado de la ley de Newton. En consecuencia, el análisis de este oscilador proporciona información respecto a los fenómenos semejantes, como es el caso de la frecuencia cardiaca. En conclusión, un sistema mecánico y un sistema biológico presentan analogías en su comportamiento, el cual es descrito a través de una ecuación matemática que permite relacionar las variables que intervienen en el fenómeno en estudio.

Palabras clave: ciclo cardiaco; frecuencia cardiaca; oscilador; amortiguado; viscoso.

Recibido: octubre 2017

Aceptado: diciembre 2017

1. Introducción

La capacidad de oscilación de los sistemas físicos puede ser de diferentes maneras y la característica común de estos fenómenos es su periodicidad. Existe un esquema de movimiento o desplazamiento que se repite y que permite

*Autor para correspondencia

Correo-e: aleidacant@hotmail.com (Aleida Cantor Rudas)

analizar el comportamiento de las oscilaciones de estos sistemas, desde una perspectiva dinámica que considera el movimiento vibratorio como un problema físico en base a cálculos matemáticos.

1.1. Oscilaciones del ritmo cardiaco

Actualmente se habla de la inteligencia del corazón, cuando en una época prevaleció el concepto de la inteligencia asociada al cerebro. Mediante investigaciones realizadas en el Instituto HeartMath (Matemáticas del corazón), muestran que la información perteneciente al estado emocional de una persona, también es comunicada vía campo electromagnético del corazón. Los patrones rítmicos de los latidos del corazón cambian significativamente mientras experimenta diferentes emociones. A su vez, estos cambios en el patrón del ritmo cardiaco crean los cambios correspondientes en la estructura del campo electromagnético irradiado por el corazón, que puede ser medido mediante una técnica llamada análisis espectral. El siempre presente campo rítmico del corazón tiene una influencia poderosa en los procesos del cuerpo por lo que el ritmo cardiaco exhibe una ola con patrones de forma sinusoidal como la figura 1:

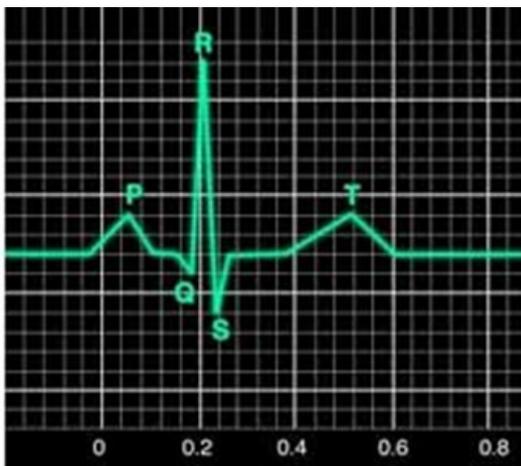


Figura 1: Ritmo Cardiaco.

El corazón contiene miocitos especializados que forman el sistema de conducción eléctrica. Los impulsos generados producen la contracción del miocardio y son los que se registran en los monitores cardíacos y el electrocardiograma.

El primer paso para la interpretación de este importante estudio es conocer la información que nos da el complejo PQRST:

- La onda P representa la propagación del impulso desde el nodo sinoauricular (SA) y a través de las aurículas.
- El intervalo PR representa el tiempo necesario para que el impulso se propague sobre la aurícula y a través del nodo auriculoventricular (AV), donde el impulso se detiene por un periodo corto de tiempo.
- El complejo QRS representa la propagación del impulso a través de los ventrículos estimulado eléctricamente (despolarización ventricular).
- La onda T indica repolarización ventricular, la cantidad de tiempo que transcurre desde el final de una contracción de los ventrículos hasta el comienzo del período de reposo.

Si un impulso viaja a través del sistema de conducción, y es iniciado desde el nodo SA, en la forma descrita anteriormente, el ritmo se describe como un ritmo sinusoidal [1, 2, 3].

1.2. Oscilaciones amortiguadas viscosas

Las oscilaciones de un sistema real desaparecen con el tiempo, debido a sus características disipativas mediante las cuales se pierde energía mecánica de vibración. Describir matemáticamente estas vibraciones mediante una señal sinusoidal de amplitud constante, donde la ecuación de las vibraciones debe incluir estas fuerzas disipativas. El estudio se enfoca en el sistema masa – muelle, donde el amortiguamiento se simuló introduciendo un indicador a la masa móvil en un cilindro lleno de líquido. El enunciado de la ley de Newton para la masa móvil, incluyendo la fuerza resistente que ejerce el fluido [4]:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx - bv \quad (1)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{b}{m} \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m} x = 0$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0$$

$$x = Ae^{-\gamma t/2} \cos(\omega t + \alpha) \quad (2)$$

La ecuación (2), su gráfica se muestra en la Figura 2.

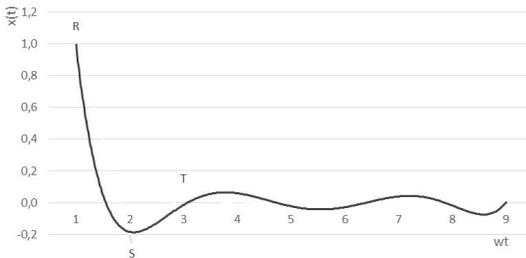


Figura 2: Oscilador Amortiguado Viscoso.

2. Analogía de una oscilación amortiguada viscosa y el ritmo cardiaco

Un ciclo cardiaco es representado por una sucesión de ondas en el trazado del ECG: la onda P, la onda o complejo QRS y la onda T.

La parte del trazado que es una sección corta descendente conectada con una sección alta ascendente. La misma se denomina onda o complejo QRS. Esta parte indica que los ventrículos (las dos cavidades inferiores del corazón) se están estimulando eléctricamente (despolarizando) para bombear la sangre hacia fuera. En la Figura 3, se visualiza la sección descendente RS y la onda T del ritmo cardiaco, que coincide con la trayectoria del oscilador amortiguado viscoso.

Por analogía se puede decir que, matemáticamente, el ciclo cardiaco o ritmo cardiaco, se representa con la ecuación (1) y la solución de esta por la ecuación (2).

2.1. Metodología

Para validar la suposición del comportamiento de las gráficas, se utilizó el electrocardiograma (ECG o EKG) que midió la actividad eléctrica del corazón, se utilizaron estos datos experimentales. El ECG, genera una señal eléctrica (Fig1), se transmite a través del sistema de conducción cardiaco,

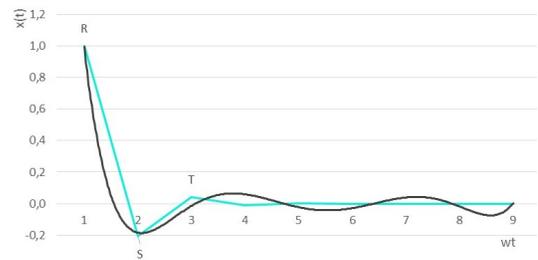


Figura 3: Superposición de Oscilaciones.

como primer componente es el nodo sinusal, cuya característica principal es el automatismo de sus células, que generan una estimulación eléctrica a una frecuencia de 60 a 70 impulsos por minuto, iniciando el estímulo eléctrico y controlando el ritmo cardiaco. El procedimiento consistió en interpretar las señales cardiacas registradas en el electrocardiograma antes y después de la exposición a la radiación con bombillos de colores en zonas del cuerpo humano para cada color. La radiación de colores se aplicó a 30 personas o sujetos de estudio en condiciones normales de salud, como criterio de inclusión, con edades comprendidas entre 18 y 46 años, de ambos sexos [5].

3. Discusión de resultados

La investigación, cumplió con las disposiciones del Código de Ética para la Vida [6] en cuanto al consentimiento informado de la radiación. Se seleccionaron al azar tres personas de los 30 que se tomó como una muestra no probabilística de tipo accidental, porque el tamaño de la población es indefinido y estos estudios no probabilísticos permiten un mayor control de las variables, originando una característica de la población y no del tamaño de la muestra como significativo por lo que se seleccionó unidades muestrales típicas de la población [7] para el registro de las señales del electrocardiograma, y corroborar la hipótesis de la analogía de la ecuación matemática entre el ritmo cardiaco y el oscilador amortiguado viscoso son solo válidas para la muestra del estudio. En la Tabla 1 se muestran los resultados.

Se graficó los datos de la personas seleccionadas sin radiación, obteniéndose las Figuras 4, 5 y 6.

Tabla 1: Registros del electrocardiograma antes y despues de la radiación.

color	Edad 18 años		Edad 23 años		Edad 46 años	
	P (pulso/min)	P _r (pulso/min)	P (pulso/min)	P _r (pulso/min)	P (pulso/min)	P _r (pulso/min)
1-violeta	65	72	64	68	66	68
2-Azul	64	71	66	71	64	71
3-verde	66	73	66	73	65	74
4-amarillo	65	83	64	85	65	85
5-naranja	66	85	65	85	65	84
6-rojo	64	89	66	88	63	86

P: pulso.
P_r: pulso con radiación.

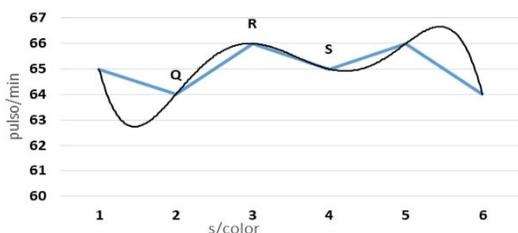


Figura 4: Ritmo cardiaco y oscilador amortiguado viscoso sin radiación edad 18 años.

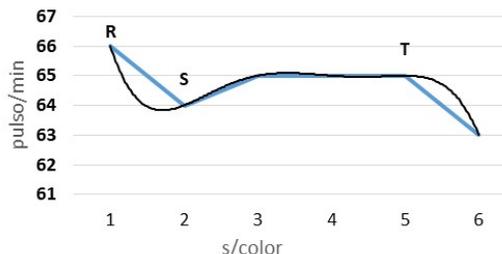


Figura 6: Ritmo cardiaco y oscilador amortiguado viscoso sin radiación edad 46 años.

Se observa que los datos de las gráficas oscilan en el mismo entorno por lo que, son semejantes. En cuanto al complejo QRS que corresponde a la despolarización ventricular (descarga eléctrica) que tiene una duración de menos de 0,12 s y puede presentar diversas morfologías. En este caso se aproxima a la Figura 1 y tiene una tendencia a la Figura 2.

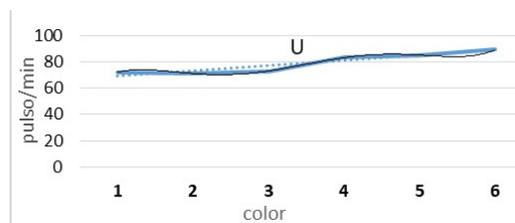


Figura 7: Ritmo cardiaco y oscilador amortiguado viscoso con radiación edad 18 años.

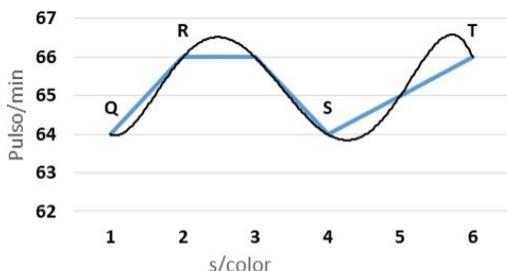


Figura 5: Ritmo cardiaco y oscilador amortiguado viscoso sin radiación edad 23 años.

De igual modo, se graficó los datos de la personas seleccionadas después de la radiación, obteniéndose las Figuras 7, 8 y 9. En la gráfica de la Figura 2 del oscilador amortiguado, se observa que se asemejan en el envejecimiento de

la amplitud de la misma al final de la trayectoria con las trayectorias mostradas en las Figuras 7, 8 y 9, en las cuales la amplitud es más atenuada. Esto se puede observar con más detalle en la Figura 3, al final de su trayectoria para ambos, tanto del amortiguador como del ciclo cardiaco.

Con referencia a lo anterior, se observa que los datos de las gráficas de las Figuras 7, 8 y 9 oscilan en el mismo entorno por lo que, son semejantes a la onda U identificada en la Figura 10. La onda U es de origen incierto, puede indicar la repolarización del tabique interventricular (recarga eléctrica), o una repolarización lenta de los ventrículos en un tiempo de 0,1 a 0,2 s.

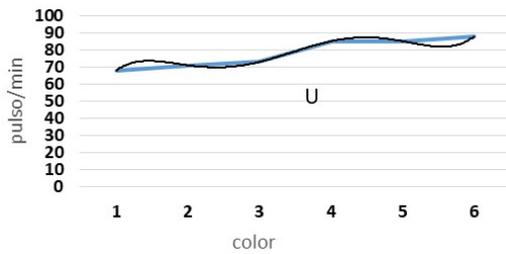


Figura 8: Ritmo cardiaco y Oscilador Amortiguado Viscoso con radiación edad 23 años.

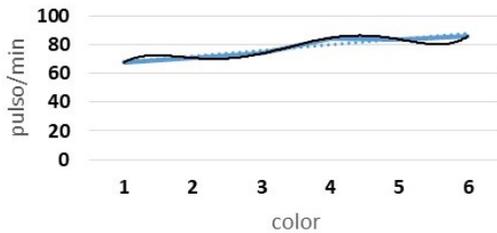


Figura 9: Ritmo cardiaco y oscilador amortiguado viscoso con radiación edad 46 años.

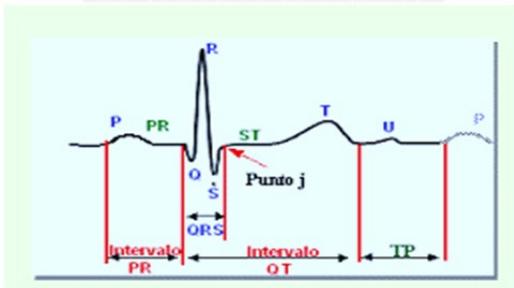


Figura 10: Onda U.

4. Conclusiones

En ingeniería es común el análisis de las oscilaciones en los sistemas físicos reales donde se encuentran presentes fuerzas no conservativas que reducen con el tiempo la amplitud del movimiento definido por una ecuación matemática enfocada en el sistema masa muelle, donde el amortiguamiento se simulo introduciendo un indicador a la masa móvil en un cilindro lleno de líquido fundamentado en el enunciado de la ley de Newton para la masa móvil, que incluye una fuerza resistente que ejerce el fluido en proporcionalidad con su velocidad.

En este estudio se tomó un sistema biológico como es, las oscilaciones del ritmo cardiaco y se comparó con un sistema mecánico amortiguado,

lo que permite modelar estos sistemas a través de la ecuación matemática del oscilador amortiguado. Para los casos seleccionados sin radiación se observó que el ciclo RS y T del ciclo cardiaco en su inicio se ajustan aproximadamente con la solución de la ecuación del oscilador amortiguado, también en su inicio de la trayectoria. En caso contrario, para los mismos casos pero con radiación, se observó aproximadamente, la onda U o etapa final del ciclo cardiaco y la solución de la ecuación del oscilador.

Con la ecuación matemática del oscilador se puede ajustar comportamientos que permitan obtener beneficios a las personas con patologías en el ritmo cardiaco por lo que es necesario profundizar la investigación en estos casos especiales ya que las personas del estudio no presentaban deficiencias cardiacas declaradas. En conclusión, un sistema mecánico y un sistema biológico presentan analogías en su comportamiento, el cual es descrito a través de una ecuación matemática que permite relacionar las variables que intervienen en el fenómeno en estudio.

Referencias

- [1] John R. Hampton. *The ECG made easy*. Churchill Livingstone/Elsevier,, 7th edition, 2008.
- [2] Dale Dubin. *Dubin: Interpretación de ECG. Método Clásico del Dr. Dubin Para Entender los Mensajes Eléctricos del Corazón*. Cover Publishing Company, 2007.
- [3] Guillermo Franco Salazar y Lilliam Rojas Zuaznábar. *Manual de electrocardiografía y electroencefalografía*. Manual Moderno, México, 2007.
- [4] A. P. French. *Vibraciones y ondas*. Reverté, 1980.
- [5] Aleida Cantor Rudas. Nota técnica: Frecuencia cardiaca después de la exposición a longitudes de onda del espectro visible en áreas del cuerpo humano. *Revista Ingeniería UC*, 23(2):216–222, 2016.
- [6] Ministerio del Poder Popular para la Ciencia, Tecnología e Industrias Intermedias. Código de ética para la vida, 2016. Consulta: 25 de marzo 2016 <https://goo.gl/McyAUH>.
- [7] Roberto Hernández Sampieri, María del Pilar Baptista Lucio y Carlos Fernández Collado. *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill, sexta edición, 2006.

Evaluation of oil properties of fruit pulp pijiguao (*Bactris Gasipaes* H.B.K) for use in cosmetics industry

Viky C. Mujica F.^a, María del Carmen Rodríguez de S.^{*,a}, Ixmit Lopez S.^a, Dalys Mendez^b

^aEscuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

^bDirección de Estudios Básicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Abstract.-

The research was based on evaluation pijiguao oil for use in the cosmetics industry. The experiment was conducted to characterize the pulp of the red and yellow variety pijiguao using COVENIN. The oil was extracted by a computer sohxlet $2^3 \times 3^1$ mixed factorial design to determine the best extraction conditions used statistical software STATGRAPHICS PLUS 5.0. In the cultivar with higher yield of extracted oil, was later tested for acute dermal toxicity. The cultivar with higher yield in the oil extraction process is red with a percentage of $(15.640 \pm 0.004) \%$. It was found that the best operating conditions for extraction were: 5 grams of pulp, particle size 0.850 mm and 6 hours of extraction time. This oil had a high saponification value (206 ± 3) mg KOH / g oil. Fatty acids are in greater proportion with 46.2 % oleic and palmitic acids with 33 %. No toxic signs were observed in tests. The physicochemical properties and lipid profile pijiguao oil to make it look like avocado oil, olive oil and cocoa butter.

Keywords: oil; characterization; cosmetic; mining; toxicology.

Evaluación de las propiedades del aceite de la pulpa del fruto de pijiguao (*Bactris Gasipaes* H.B.K) para su aplicación en la industria cosmética

Resumen.-

La investigación se basa en la evaluación del aceite de pijiguao para su aplicación en la industria cosmética. Para ello se realizó la caracterización de la pulpa de la variedad roja y amarilla de pijiguao haciendo uso de las Normas COVENIN. El aceite se extrajo utilizando un equipo sohxlet, según un diseño factorial mixto $2^3 \times 3^1$, y así determinar las mejores condiciones de extracción con el software estadístico STATGRAPHICS PLUS 5.0. A la variedad que presentó mayor rendimiento de aceite extraído, posteriormente se le realizaron pruebas de toxicidad aguda y dérmica. La variedad que presentó mayor rendimiento en el proceso de extracción de aceite es la roja con un porcentaje de $(15,640 \pm 0,004) \%$. Se obtuvo que las mejores condiciones operacionales para la extracción fueron: 5 gramos de pulpa, 0,850 milímetros de granulometría y 6 horas de tiempo de extracción. Este aceite presentó alto índice de saponificación (206 ± 3) mg KOH/g aceite. Los ácidos grasos en mayor proporción son el oleico con 46,2 % y palmítico con 33 %. No se observaron signos tóxicos en las pruebas realizadas. Las propiedades fisicoquímicas y el perfil lipídico del aceite de pijiguao lo asemejan al aceite de aguacate, oliva y manteca de cacao.

Palabras clave: aceite; caracterización; cosmético; extracción; toxicología.

Recibido: julio 2017

Aceptado: diciembre 2017

1. Introducción

El pijiguao (*Bactris gasipaes* HBK), es el fruto de una palmera perteneciente a la familia *Palmae-Arecaceae*, originaria de América Tropical, propia de regiones con alta precipitación y suelos pobres. Es una especie subutilizada y poco conocida,

* Autor para correspondencia

Correo-e: mcrc63@yahoo.com (María del Carmen Rodríguez de S.)

pero de alta capacidad para ser trabajada por la calidad y cantidad de sus productos. El pijiguao cuenta con un gran potencial en la alimentación humana y animal, altos rendimientos por unidad de superficie, buena calidad de los frutos, altos rendimientos del palmito para uso industrial y gran potencial para la producción de aceites y sobre todo adaptabilidad a suelos ácidos e infértiles, [1, 2, 3]. En Venezuela, en el estado Amazonas y suroeste del estado Bolívar, el potencial de esta palmera está siendo únicamente utilizado en la alimentación humana y animal. El aporte científico de la investigación está en la evaluación de las propiedades del aceite de la pulpa del fruto de pijiguao para su aplicación en la industria cosmética, mediante la aplicación de ensayos de toxicidad aguda y dérmica, que arrojaron como resultado la no toxicidad del aceite. Los aceites en el uso cosmético son capaces de penetrar la piel manteniéndola y protegiéndola. El aceite de pijiguao puede ser utilizado en la fabricación de cremas para el cuidado de la piel, jabones, productos para el cuidado del cabello y labiales. No existen antecedentes del uso de este aceite obtenido de la pulpa del pijiguao para la industria cosmetológica.

2. Metodología

2.1. Caracterización de la pulpa del pijiguao

El análisis de la composición nutricional de la pulpa del pijiguao se llevó a cabo en el Laboratorio de Ingeniería de Alimentos de la Escuela de Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo. Esta caracterización se realizó mediante los diferentes métodos de análisis establecidos en la norma venezolana COVENIN. Los análisis realizados fueron: humedad [4], fósforo [5], cenizas [6], grasa libre [7], fibra cruda [8], nitrógeno [9] y Calcio [10].

2.2. Diseño experimental para la extracción de aceite de la pulpa del fruto de pijiguao

Basados en investigaciones previas y en la información bibliográfica acerca de la extracción de aceites vegetales y los factores que afectan el rendimiento de aceite extraído, se realizó el diseño

de la extracción sólido-líquido, utilizando hexano como solvente. Las variables independientes o factores se seleccionaron considerando aquellas que influyen directamente en el proceso de extracción y son sencillas de controlar. Estas fueron: cantidad de materia prima rica en aceite, tamaño de partícula y tiempo de la extracción. Como variable dependiente se seleccionó el porcentaje en masa de aceite extraído. El tipo de diseño experimental seleccionado es factorial mixto. Para el caso del estudio el diseño fue $2^3 \times 3^1$, esto según los factores y niveles establecidos en estudios previos de extracción [11], en total son 24 experimentos, 12 por cada variedad de pijiguao (amarilla y roja). En la Tabla 1 se muestran dichos factores y sus niveles.

Tabla 1: Factores del proceso de extracción con sus respectivos niveles.

Factor	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Variedad	Amarilla	Roja	-
C_{mp} (g)	15	5	-
T_{mp} (mm)	0,850	1,700	-
T_{ex} (h)	4	5	6

C_{mp} : cantidad de materia prima.

T_{mp} : tamaño de materia prima.

T_{ex} : tiempo de extracción.

El proceso de extracción de aceite de la pulpa del pijiguao, se llevó a cabo mediante los siguientes pasos: selección de la fruta, descascarado del fruto, secado, molienda y tamizado. La extracción del aceite se realizó en el equipo de extracción sohxlet del Laboratorio de Ingeniería de Alimentos de la Universidad de Carabobo, utilizando hexano como solvente ya que es ampliamente utilizado para extraer aceite de las plantas, por su alta afinidad molecular con el soluto y bajo punto de ebullición lo que facilita la recuperación del mismo, además de ser económicamente más accesible que otros disolventes. Los resultados obtenidos se analizaron en el software estadístico STATGRAPHICS PLUS 5.0, para conocer las mejores condiciones de extracción a partir de la variedad de pijiguao. Una vez determinadas estas condiciones, se realizó una corrida experimental a fin de validarlas.

2.3. Determinación de las características físico-químicas del aceite crudo extraído

Los ensayos aplicados al aceite crudo extraído se realizaron según las normas COVENIN para grasas y aceites, las pruebas realizadas fueron índices de saponificación [12], yodo [13], acidez [14], peróxido [15], refracción [16], densidad relativa [17] y perfil de ácidos grasos [18]. Todos los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Ingeniería de Alimentos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, a diferencia del perfil lipídico que se realizó en la empresa Cargill de Venezuela. Para llevar a cabo la caracterización del aceite crudo extraído fue necesario retirar las impurezas presentes, para ello el aceite se sometió a un calentamiento en baño María a una temperatura no mayor a 70°C por una hora, para asegurar la remoción total del hexano. Los resultados obtenidos fueron comparados con los de otros autores, con la finalidad de establecer las variaciones entre estos.

2.4. Determinación de la toxicidad aguda y dérmica del aceite crudo

Toxicidad oral aguda. Esta prueba se realizó a través del método de dosis fijas [19], donde se utilizaron 40 ratones provenientes del Bioterio de la Facultad de Ciencias de la Salud de la Universidad de Carabobo. Se emplearon ratones jóvenes: 20 hembras y 20 machos con pesos corporales comprendidos entre 20 y 25 g. Estos animales se separaron en grupos según, el sexo, la dosis y si fueron o no tratados con el aceite de pijiguao. El ensayo tuvo una duración de 14 días, con observaciones a los 30, 60, 120, 240 y 360 minutos, a las 24 horas, 48 horas y luego todos los días hasta completar 14 días. Se emplearon dos niveles de dosis para la sustancia de ensayo, 2000 mg/Kg y 5000 mg/Kg del peso corporal, que se administraron por vía oral a cada ratón con previo ayuno nocturno, a través de una cánula curva metálica. Los animales se sometieron previamente a la adaptación de las condiciones de la sala por un periodo de 5 días antes del comienzo del ensayo, alojándose en jaulas de polipropileno con rejilla, agrupados en número de 5 animales por jaula. Se controló la luz del cuarto;

12 horas de luz y 12 horas oscuridad. Tanto el grupo control como los experimentales recibieron agua acidificada al 1 % con HCl 0,1 N y alimento comercial, ratarina (Protinal). Las observaciones fueron diarias, prestando atención a los cambios en la conducta, así como la posible muerte de los animales. Las mediciones individuales de los pesos de los ratones fueron determinadas el día 1, 7 y 14 de la administración del aceite del pijiguao.

Diseño experimental para la toxicidad aguda

El tipo de diseño experimental seleccionado según los factores y niveles establecidos, fue el diseño factorial puro 2^2 , tal como se muestra en la Tabla 2. Se realizó un análisis de varianza utilizando la herramienta estadística STATGRAPHICS PLUS 5.0. que permitió conocer si existía diferencia significativa entre los pesos de los ratones tratados con los ratones no tratados, según el suministro de la dosis del aceite de pijiguao. Los grupos están conformados por 5 hembras y 5 machos:

- Grupo A (Grupo no tratado): Recibieron dosis de 2000 mg/Kg de peso corporal de aceite de girasol, agua y alimento.
- Grupo B (Grupo tratado): recibieron 2000mg/Kg de peso corporal del aceite del pijiguao.
- Grupo C (Grupo no tratado): recibieron dosis de 5000 mg/Kg de peso corporal de aceite de girasol, agua y alimento.
- Grupo D (Grupo tratado): recibieron 5000mg/Kg de peso corporal del aceite del pijiguao.

Tabla 2: Variables del ensayo de toxicidad aguda con sus respectivos niveles.

Factor	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Días	1	7	14
Sexo	Machos	Hembras	-
Tratados	Sí	No	-

Ensayo de irritabilidad dérmica. Este ensayo se realizó a través de lo estipulado por la Organization for Economic Co-operation and Development [20]. Para el estudio se emplearon tres conejos albinos machos, procedentes del Bioterio de la Facultad de Ciencias de la Salud de la Universidad de Carabobo. Los conejos se mantuvieron en climatización durante siete días con agua y comida, con un ciclo luz/oscuridad 12×12 horas, en jaulas individuales de acero. Los conejos fueron afeitados 24 horas antes del ensayo a ambos lados de la columna vertebral en un área de piel de aproximadamente 10×10 cm². Posteriormente se aplicó 0,5 g del aceite de pijiguao (*Bactris gasipaes HBK*), el cual se mantuvo en la piel cubierto con gasa estéril y fijado con adhesivo durante 4 horas. Luego, se retiraron los parches y el aceite con solución salina fisiológica. Los animales permanecieron en una caja de madera especial (guillotina). Las respuestas de la piel se evaluaron a las 1, 24, 48 y 72 horas después de haber retirado los parches. La irritación dérmica fue registrada de acuerdo con la escala descrita por Drize para la evaluación de lesiones de la piel, tal como se muestra en las Tabla 3 y 4.

Tabla 3: Escala descrita por Drize para la evaluación de Eritemas en la piel.

Eritema y formación de escaras	Ponderación
Si no aparece nada	0
Muy ligero el eritema (poco perceptible)	1
Eritema bien definido	2
Eritema moderado a severo	3
Eritema severo con formación de úlceras y costras	4

Tabla 4: Escala descrita por Drize para la evaluación de edemas en la piel.

Eritema y formación de escaras	Ponderación
Si no hay edemas	0
Edema poco perceptible	1
Edema ligero, bordes o áreas bien definidas por elevación de la piel	2
Edema moderado (área elevada de la piel de aprox. 1 mm)	3
Edema severo (elevación de mas de 1 mm)	4

Las evaluaciones a las distintas horas, fueron sumadas y divididas entre el número de mediciones, se aplicó la escala presentada en la Tabla 5 para determinar el resultado final.

Tabla 5: Escala para la evaluación final del índice de irritabilidad dérmica.

Índice de irritabilidad dérmica	Rango de ponderación
No irritante	0
Levemente irritante	0-2
Moderadamente irritante	2-6
Severamente irritante	6-8

2.5. Determinación de alternativas para el desarrollo de posibles productos cosméticos utilizando el aceite de pijiguao como componente activo

Para esto se realizó una comparación entre los ácidos grasos presentes en el aceite de pijiguao con los ácidos grasos de otros aceites vegetales que tengan aplicación en la industria cosmética, y así identificar similitudes que determinen los posibles productos cosméticos en los que se emplee el aceite de la pulpa del pijiguao.

La comparación se hizo según el método de valoración por puntos. Este método consta de cuatro etapas. La primera es la elección de los factores de evaluación o de aquellos con relevancia: índice de acidez, índice de yodo, índice de peróxido, índice de saponificación, ácidos grasos saturados y ácidos grasos insaturados. La segunda es la ponderación de los factores de evaluación: para ello se realizó una matriz de análisis jerárquico, tal como muestra la Tabla 17 en resultados, y así poder definir la importancia de cada aspecto seleccionado, otorgando una ponderación determinada de acuerdo a su prioridad. La matriz consistió en colocar una puntuación de (1) en el factor de la fila que indica que se supera al de la columna, (0,5) equivale a parámetros de igual importancia y (0) esta referido a que el parámetro de columna supera al de la fila.

El tercer paso fue el montaje de la escala de puntos, los cuales se muestran en la Tabla 6. Por último, el cuarto paso consistió en evaluar

los factores, completando la matriz de valoración por puntos y asignando un número de la escala establecida a cada factor para cada alternativa, finalmente se suman, y se selecciona el aceite vegetal cuya puntuación se asemeja a la del pijiguao. (ver Tabla 20 en discusiones).

Tabla 6: Escala para la evaluación de los factores en la matriz de valoración por puntos.

Porcentaje de similitud %	Puntuación
0-20	1
21-40	2
41-60	3
61-80	4
81-100	5

3. Análisis y discusión de resultados

3.1. Caracterización de la pulpa del pijiguao

Se realizaron los ensayos de humedad, ceniza, fibra cruda, proteína, grasa, calcio y fósforo a la pulpa de la variedad roja y amarilla del pijiguao. Estos resultados, se pueden apreciar en la Tabla 7.

Tabla 7: Composición nutricional de la variedad roja y amarilla de la harina del pijiguao.

Ensayo	Pulpa Amarilla	Pulpa Roja
Humedad (%)	43,300±0,005	49,760±0,005
Ceniza (%)	0,165±0,001	0,164±0,002
Fibra cruda (%)	1,65600±0,00005	1,9776±0,0001
Proteína (%)	4,4±0,4	4,4±0,4
Grasa (%)	14,872±0,004	15,150±0,004
Calcio (%)	0,030±0,005	0,028±0,004
Fósforo (%)	9,9±0,9	9,6±0,8

El porcentaje de humedad obtenido para ambas variedades resultó elevado, lo que indica que a condiciones ambientales el fruto posee un alto contenido de agua. En la Tabla 7 se puede observar que la variedad roja presentó mayor humedad con respecto a la variedad amarilla, y que ambos valores se encuentran próximos a los reportados por los distintos autores en la Tabla 8. El contenido de humedad depende de la ubicación de la planta, puesto que a mayor temperatura en el ambiente, menor será la humedad presente en la fruta según

el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza [21].

Tabla 8: Composición de la harina de pijiguao para diversos autores.

Ensayo	(I)	(II)	(III)	(IV)
Humedad (%)	44,4	50,07	45,23	65,1
Ceniza (%)	0,3	0,8	1,02	2,11
Fibra cruda (%)	7,462	1,300	1,270	1,200
Proteína (%)	5,0	6,3	2,96	5,5
Grasa (%)	13,85	5,80	5,86	10,00
Calcio (%)	0,020	0,014	-	-
Fósforo (%)	7,76	16,00	-	-

(I): Rondón [11] (II): Pasquel [22]
(III): García [23] (IV): Murillo [24]

El calcio y el fósforo son minerales presentes en las frutas. El contenido de calcio encontrado en la variedad amarilla fue de $(0,030\pm 0,005)\%$ y en la variedad roja $(0,028\pm 0,004)\%$, con respecto al fósforo los valores fueron de $(9,9\pm 0,9)\%$ y $(9,6\pm 0,8)\%$ para las variedades amarilla y roja respectivamente. Los resultados obtenidos son similares a los reportados por Rondón [11], ya que la materia en estudio al igual que la de este autor son provenientes de la estación experimental Samán Mocho de la Universidad Central de Venezuela. Como se había mencionado las diferencias con los valores reportados por Pasque y Del Castillo [22], se pueden deber a los tipos de suelos donde se cultivó la planta.

La fibra cruda representa la materia que no puede ser digerida por el organismo. El contenido de fibras en las frutas se encuentra entre 1,4 y 2,4%, [25]. Para el fruto en estudio se tuvo para la variedad amarilla $(1,65600\pm 0,00005)\%$ y para la variedad roja $(1,9776\pm 0,0001)\%$, por ende ambas variedades del pijiguao poseen un alto contenido de fibra cruda, propiedad que lo hace un buen ayudante en el funcionamiento del aparato digestivo. Comparando los resultados obtenidos con los de los diferentes autores señalados en la Tabla 8 no existe diferencia significativa, salvo la reportada por Rondón [11], cuyo valor se encuentra por encima del obtenido experimentalmente para las dos variedades en estudio. Las proteínas son el principal nutriente utilizado en la formación de los tejidos corporales y son

fundamentales para la regulación del metabolismo humano, [26]. Se necesita de 8 a 10 % de proteínas para satisfacer las necesidades proteicas en los adultos, [27]. Experimentalmente se obtuvo para las dos variedades un valor de $(4,4 \pm 0,4) \%$ ya que en general el valor proteico en las frutas es bajo. Dicho valor se encuentra por debajo de lo reportado por Murillo et al. [24], Pasquel y Del Castillo [22], y Rondón [11], pero por encima de lo reportado por Gadet [28]. Estas diferencias tanto en el porcentaje de fibra cruda como en el contenido de proteínas pueden deberse a las condiciones ambientales y tipo de suelo donde se cultive la palma. El porcentaje de grasa en pulpa del pijiguao determinado bajo condiciones de secado (50°C), tamaño de partícula 0,850 mm; 5 gramos de pulpa, y tiempo de extracción de 4 horas, utilizando un equipo sohxlet con hexano como solvente, fue de $(14,872 \pm 0,004)$ y $(15,150 \pm 0,004)$ para las variedades amarilla y roja respectivamente, resultando estos valores por encima de los reportados por los autores descritos en la Tabla 8. Esta discrepancia puede atribuirse al método y condiciones de extracción utilizados por cada uno de ellos, ya que la cantidad de grasa libre puede variar de acuerdo a las condiciones de análisis que se emplee.

3.2. Extracción del aceite de la pulpa del fruto del pijiguao, bajo las condiciones más apropiadas para la variedad que presente mayor rendimiento

Los valores obtenidos en cada una de las extracciones realizadas según el diseño experimental se presentan en la Tabla 9. Estos valores se introdujeron y analizaron en el software estadístico STATGRAPHICS PLUS 5.0, para determinar de esta manera las mejores condiciones de extracción las cuales se encuentran reportadas en la Tabla 10.

En la Tabla 10 se puede observar que la variedad roja presenta mayor porcentaje de grasa con respecto a la variedad amarilla, lo cual coincide con los resultados reflejados por el software estadístico.

Con respecto a la masa, se tiene a menor cantidad utilizada, se alcanza un mayor rendimiento, esto se debe a que el solvente puede realizar un

mejor lavado de la misma y arrastrar el material graso presente.

En cuanto al tamaño de partícula, se tiene que un tamaño de 0,850 mm tiene un área de mayor contacto que un tamaño de 1,700 mm, lo que facilita la extracción del aceite que se encuentra en la estructura del interior de la pulpa por parte del solvente, es por ello que los resultados arrojan que el mejor tamaño de extracción es el menor. A mayor tiempo de extracción, el solvente permanece mayor tiempo en contacto con la harina, aumentando la cantidad de aceite que es transferido al solvente [29], lo cual concuerda con lo obtenido en la Tabla 10, obteniéndose un mayor rendimiento para el mayor tiempo de extracción.

Tabla 9: Rendimiento del proceso de extracción del aceite del pijiguao para las distintas condiciones de operación.

$(T_{mp} \pm 0,001)$ mm	Masa (m $\pm 0,0001$) g		Tiempo (t ± 1) h	$(R \pm 0,004) \%$	
	Roja	Amarilla		Roja	Amarilla
0,850	5,0446	5,0181	4	15,160	14,872
	5,0777	5,0329	5	13,696	13,640
	5,0291	5,0310	6	15,700	14,120
1,700	5,0208	5,0257	4	15,296	12,744
	5,0070	5,0124	5	13,876	12,672
	5,0288	5,0117	6	14,348	13,588
0,850	15,0063	15,0274	4	12,844	12,396
	15,0259	15,0487	5	14,192	13,552
	15,0053	15,0402	6	14,296	12,740
1,700	16,0661	15,0235	4	13,444	12,744
	15,0162	15,0178	5	13,800	12,644
	15,0045	15,0083	6	13,500	11,582

T_{mp} : tamaño
R: rendimiento

Tabla 10: Mejores condiciones de extracción según el software estadístico STATGRAPHICS PLUS 5.0.

Variedad	Masa (m $\pm 0,0001$) g	Tamaño (T $\pm 0,001$) mm	Tiempo (t ± 1) h	Rendimiento (R $\pm 0,004$) %
Roja	5,0000	0,850	6	15,238

Los análisis de varianza para el porcentaje de rendimiento se encuentran en la Tabla 11, donde se puede apreciar que los factores A: Variedad (P-Valor=0), B: Masa (P-Valor=0), C: Tamaño (P-Valor=0,0002) y la interacción AC =

(Variedad)Tamaño (P-Valor=0,0213), tienen significancia sobre el porcentaje de aceite obtenido en el proceso de extracción, esto se debe a que el valor de significancia es menor del 5 % es decir P- Valor<0,05, lo que implica la posibilidad de que los factores son significativos sobre el proceso. La validación de los resultados arrojados por el software estadístico se presentan en la Tabla 12 donde se puede observar que el porcentaje de rendimiento fue de 15,64 %, para la variedad roja, una masa de 5 g, tamaño de partícula 0,850 mm y un tiempo de extracción de 6 h.

Tabla 11: Resultados de los análisis de varianza para el porcentaje de rendimiento arrojados por el software estadístico STATGRAPHICS PLUS 5.0.

Fuente	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
A:Variedad	23,5959	23,5959	49,21	0
B:Masa	13,9436	13,9436	29,08	0
C:Tamaño	7,77165	7,77165	16,21	0,0002
T:Tiempo	0,614586	0,614586	1,28	0,2622
AB	0,259464	0,259464	0,54	0,4649
AC	12,68432	12,68432	5,60	0,0213
AD	0,00284505	0,00284505	0,06	0,8084
BC	1,81928	1,81928	3,79	0,0563
BD	0,00257254	0,00257254	0,01	0,9419
CD	0,34534	0,34534	0,72	0,3996
DD	0,33987	0,33987	0,71	0,4033
Bloques	0,173534	0,086767	0,18	0,8349
Error total	27,8095	0,479474	-	-
Error correg.	79,3881	-	-	-

Tabla 12: Rendimiento del aceite del pijiguao obtenido a las mejores condiciones de extracción.

Variedad	Masa (m±0,0001)g	Tamaño (T±0,01) mm	Tiempo (t ±1)	Rendimiento (% R±0,004)
Roja	5,0308	0,85	6	15,640

3.3. Determinación de las características fisicoquímicas del aceite crudo extraído

Los análisis realizados para la determinación de las propiedades fisicoquímicas del aceite crudo se encuentran en la Tabla 13. El índice de saponificación obtenido fue de (206±3) mg KOH/g aceite. Según [30], el índice de saponificación

de un aceite debe estar entre un rango de 180-210 mg KOH/g aceite, por lo que se puede decir que el valor reportado para el aceite la pulpa del pijiguao se encuentra dentro del rango establecido. El valor del índice de saponificación proporciona información sobre la longitud media de las cadenas de ácidos grasos, ya que su valor es mayor a menor peso molecular de los ácidos grasos, lo que representa que el aceite de pijiguao está constituido por ácidos grasos de pesos moleculares bajos, debido a su alto índice de saponificación. De igual modo, el valor obtenido es indicativo de la alta calidad que presenta el aceite, por tanto se puede utilizar en la industria cosmética y en la fabricación de jabones mediante la hidrólisis alcalina de los ésteres.

El índice de yodo es una medida del grado de insaturación de los ácidos grasos. Para el aceite de pijiguao el valor fue de (92,8±0,8) cg I/g aceite, dicho valor es indicativo del alto contenido de ácidos grasos insaturados presentes en el aceite de la pulpa del pijiguao; además indica que el aceite es sensible a la oxidación. A estos aceites se les da la denominación de no secantes, debido a que los índice de yodo son menores a 100 cg I/g, estos también pueden ser usados en la fabricación de cosméticos, por la facilidad con que son absorbidos por la piel ya que no exceden un índice de yodo de 110 cg I/g [31]. En la norma [30], se establece que este valor debe estar entre 56 y 145 cg I/g, por lo cual el aceite en estudio se encuentra dentro de los límites establecidos.

Tabla 13: Propiedades fisicoquímicas del aceite crudo de la pulpa del fruto del pijiguao (*Bactris gasipaes* HBK).

Características del aceite	C
Índice de saponificación (I _s ± 3) mg KOH/g aceite	206
Índice de yodo (I _y ±0,8) cg I/g aceite	92,8
Índice de acidez: ácido oleico (I _A ± 0,1) mg NaOH/ g aceite	1,7
Índice de peróxidos (I _p ±0,01) meq O ₂ /kg aceite	9,32
Índice de refracción (I _R ±0,001) adim.	1,472
Densidad relativa (ρ _r ±0,004) adim.	0,904

C: Cantidad

El índice de acidez expresado como ácido oleico, para el aceite de pijiguao dio como resultado un valor de (1,7±0,1) mgNaOH/g aceite,

encontrándose dentro de los límites establecidos por las Normas COVENIN [30], la cual propone que los aceites vírgenes deben tener un valor máximo de 2 mg NaOH/ g aceite.

El índice de peróxido obtenido fue de $(9,32 \pm 0,01)$ meq O₂ kg aceite, dicho valor se encuentra por encima de lo establecido por la norma [30]. Esta discrepancia puede ser atribuida al deterioro del aceite por mecanismo de oxidación debido al contacto de la muestra con el oxígeno presente en el ambiente antes de realizar la prueba. Por esta razón se considera al aceite del pijiguo sensible al proceso de oxidación. Esto se puede evitar mediante la adición de antioxidantes químicos.

El índice de refracción aumenta con el grado de insaturación de los ácidos grasos contenidos en la materia grasa. Para el aceite de pijiguo se obtuvo un valor de 1,472 a una temperatura de 25°C dando así como resultado que éste se encuentra dentro de los límites establecidos por la norma [30]. La densidad relativa obtenida experimentalmente fue $(0,904 \pm 0,004)$, valor dentro del rango establecido según la norma [30].

En cuanto al perfil lipídico del aceite, tal como se muestra en la Tabla 14, se puede observar que los ácidos grasos que presenta el aceite crudo de la pulpa de la variedad roja del pijiguo son: el oleico con un 46,2 %, le sigue el palmítico con 33,0 %, el palmitoleico (9,2 %), esteárico (1,3 %), linoleico (8,6 %), linolénico (1,3 %), araquídico (0,2 %) y gadoleico (0,2 %). El ácido oleico es un ácido graso insaturado que comúnmente se utiliza en la fabricación de jabones, cosméticos, en la industria textil, metalúrgica y en la síntesis de esteres que actúan como emulsionantes, gelificantes en los geles de baño y tensioactivos en detergentes; y a su vez el ácido palmítico se utiliza en aceites lubricantes, en materiales impermeables, como secantes de pintura y principalmente en la fabricación del jabón [32].

Entre los beneficios de los ácidos grasos de los aceites en la industria cosmética cabe destacar que los ácidos linoleico y oleico participan activamente en la construcción de las capas superiores de la epidermis e impiden la deshidratación, la pérdida de elasticidad y el ataque de los radicales libres

Tabla 14: Composición lipídica del aceite crudo de la pulpa del pijiguo de la variedad roja.

Ácidos grasos	Porcentaje (%)
Palmítico (C16:0)	33,0
Palmitoleico (C16:1)	9,2
Esteárico (C18:0)	1,3
Oleico (C18:1)	46,2
Linoleico (C18:2)	8,6
Linolénico (C18:3)	1,3
Araquídico (C20:0)	0,2
Gadoleico (C20:1)	0,2
Total saturados	34,5
Total insaturados	65,5

que son la causa principal del envejecimiento de la piel, [33], estos dos ácidos grasos se encuentran presentes en el aceite de almendras dulces junto al ácido palmítico, palmitoleico, esteárico, linolénico, araquídico y godoleico entre otros. El aceite de almendra se utiliza principalmente en cosmética en casos de irritación cutánea y alergias por sus propiedades emolientes, en formulaciones de productos para el cuidado de la piel después de la exposición al sol y como desmaquillante [26]. Como se puede ver en la Tabla 14 el aceite de pijiguo contiene todos los ácidos grasos mencionados anteriormente, características que lo convierten en un recurso potencial en la industria cosmética. El porcentaje de ácidos grasos insaturados (65,5 %) es mayor que el porcentaje de ácidos grasos saturados (34,5 %), razón por la cual el aceite es sensible al mecanismo de oxidación. Esto se corresponde con el alto índice de peróxido que se obtuvo en la caracterización del mismo, razón por la que siempre que vaya a incluirse este aceite en una formulación cosmética, deberá tenerse la precaución de incorporar también un adecuado sistema antioxidante que garantice que el aceite no se oxide y se mantenga en perfecto estado durante toda la vida del producto [34].

3.4. Determinación de la toxicidad aguda y dérmica del aceite crudo

Toxicidad a dosis única

Las variables analizadas fueron la mortalidad de los ratones y el peso de los mismos para conocer su crecimiento durante el periodo de observación de los 14 días, durante este período no se observaron

síntomas y efectos después de la aplicación de las dosis, siendo el comportamiento de los animales normal de acuerdo a su especie. Con el análisis de varianza no se apreciaron diferencias significativas entre los ratones tratados y los ratones control para los días 1 (P-Valor= 0,8784) y para el día 14 (P-Valor= 0,1874), a diferencia del día 7 (P-Valor=0,0264), tal como se muestra en la Tabla 15, sin embargo, para este día de análisis no se encontró el comportamiento esperado ya que se observó disminución en el peso de los ratones. Cabe resaltar que esto se mostró tanto en ratones de los grupos tratados como en el grupo no tratado, no se le atribuye la pérdida del peso al aceite del pijiguao. Por otro lado, se realizó la comparación entre sexos de los animales no encontrándose diferencia significativa para el día 1 (P-Valor=0,3268), día 7 (P-Valor= 0,2571) y finalmente para el día 14 (P-Valor= 0,5068), ver Tabla 15.

Tabla 15: Análisis de varianza para pesos por día de observación de los ratones bajo la dosis de 2000 mg/kg de peso.

D_{ob}	Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	C_F	P_V
1	A:Sexo	0,338	1	0,338	1,02	0,3268
	B:Tratados	0,008	1	0,008	0,02	0,8784
7	A:Sexo	0,8405	1	0,8405	1,37	0,2571
	B:Tratados	3,6125	1	3,6125	5,91	0,0264
14	A:Sexo	0,7605	1	0,7605	0,46	0,5068
	B:Tratados	3,1205	1	3,1205	1,89	0,1874

D_{ob} : días de observación.

C_F : cociente-F.

P_V : P-valor.

Una vez terminado el ensayo de toxicidad para 2000 mg/Kg del animal y no haber encontrado síntomas tóxicos como mortalidad, decaimiento de la conducta, falta de apetito ni bajo consumo de agua se aumentó la dosis a 5000 mg/Kg. Cabe resaltar que para el día 1 existió diferencia significativa (P-Valor = 0) entre el grupo de los ratones tratados respecto a los controles, esto se debe a que el ensayo se inició con variaciones representativas entre los pesos, incluso entre hembras y machos, día 1 (P-Valor = 0,0101). Esta diferencia se mantuvo para los días 7 (P-Valor= 0,0014) y día 14 (P-Valor= 0,0166) ya que

los ratones hembras desde el comienzo fueron más grandes que los ratones machos. El análisis de varianza que se muestra en la Tabla 16, no arrojó diferencia significativa entre los grupos tratados y no tratados, tanto para el día 7 (P-Valor= 0,7912) como para el día 14 (P-Valor= 0,8551).

Tabla 16: Análisis de varianza para pesos por día de observación de los ratones bajo la dosis de 5000 mg/kg de peso.

D_{ob}	Fuente	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	C_F	P_V
1	A:Sexo	0,722	0,722	8,37	0,0101
	B:Tratados	9,8	9,8	113,64	0
7	A:Sexo	22,6845	22,6845	14,59	0,0014
	B:Tratados	0,1125	0,1125	0,07	0,7912
14	A:Sexo	14,792	14,792	7,06	0,0166
	B:Tratados	0,072	0,072	0,03	0,8551

D_{ob} : días de observación.

C_F : cociente-F.

P_V : P-valor.

Durante el ensayo de dosis de 5000 mg/Kg de peso del animal, tampoco se detectaron signos que demostraran la presencia de toxicidad en los animales, considerando la alimentación, consumo de agua, conducta y mortalidad.

Irritabilidad dérmica

Para evaluar si el aceite de pijiguao era irritante se tomó como patrón la apariencia de la piel de los conejos antes de la aplicación del mismo. Cada animal representa dos muestras, es decir cada conejo fue rasurado y tratado en ambos costados para dar un total de seis ensayos.

Al rasurar los conejos 24 horas antes de la aplicación del aceite, se observó la piel de una tonalidad rosada y sin lesiones. Para evitar que los animales tuviesen acceso a los costados y pudiesen lastimarse se le colocaron en la zona gasas sujetas con adhesivo hasta el momento de la aplicación del aceite. Pasada las 24 horas se hicieron nuevas observaciones de los costados verificando que estas permanecían en las mismas condiciones iniciales, las cuales representan el punto de partida para evaluar la piel de los conejos. La aplicación del aceite se realizó en una dosis de 0,5g. En los resultados de las diferentes evaluaciones no se observó ningún tipo de signos de eritema y

edema en cada uno de los parches de los conejos, durante el periodo de observación del ensayo, es decir a la hora 1, 24, 48 y 72. El índice de irritabilidad dérmica del aceite de pijiguao *Bactris gasipaes* HBK de acuerdo con la evaluación de los resultados es de 0. A partir de este resultado se puede clasificar al aceite del pijiguao como no irritante.

3.5. Determinación de alternativas para el desarrollo de posibles productos cosméticos utilizando el aceite de pijiguao como componente activo

Para establecer las alternativas del uso del pijiguao en la industria cosmética se realizó una evaluación comparativa de las propiedades fisicoquímicas y del perfil lipídico de éste con otros aceites utilizados para la fabricación de cosméticos, como: el aceite de aguacate, oliva, durazno, manteca de cacao y coco. Esto se hizo por medio del método de la matriz de ponderación por puntos. Para determinar el peso relativo de las propiedades fisicoquímicas según el grado de importancia se desarrolló la matriz jerárquica, la cual se muestra en la Tabla 17 y en función de los aspectos citados, se estableció el grado de importancia entre los factores seleccionados dando como resultado para los ácidos grasos saturados e insaturados el mayor porcentaje 27,77 %. Para evaluar la similitud del aceite del pijiguao con los aceites ya mencionados se presentan las Tabla 18 y 19.

Tabla 17: Matriz de ponderación de los factores de evaluación.

	I_a	I_p	I_y	I_s	A_{gs}	A_{gi}	Suma	%
I_a	0,5	0,5	1	0	0	0	2	11,11
I_p	0,5	0,5	1	0	0	0	2	11,11
I_y	0	0	0,5	0	0	0	0,5	2,77
I_s	1	1	1	0,5	0	0	3,5	19,44
A_{gs}	1	1	1	1	0,5	0,5	5	27,77
A_{gi}	1	1	1	1	0,5	0,5	5	27,77
	Total						18	100

I_a : I. de acidez I_p : I. de peróxido
 I_y : I. de yodo I_s : I. de saponificación
 A_{gs} : A. grasos saturados A_{gi} : A. grasos insaturados

De acuerdo con los valores obtenidos en la Tabla 20 se puede observar que el aceite que obtuvo

Tabla 18: Propiedades fisicoquímicas de algunos aceites crudos.

Propiedad fisicoquímica	Aceites					
	(I)	(II)	(III)	(IV)	(V)	(VI)
Densidad relativa a 20°C	0,904	0,915	0,910	0,90244	0,973	0,915
Índice de refracción a 20°C	1,472	1,4686	1,4686	1,4675	1,456	1,449
Índice de acidez (%)	1,7	0,5	0,72	0,12	0,96	<4
Índice de Yodo (cg I ₂ /g)	92,8	69,61	82,6	94,2	35,55	8,5
Índice de Peróxidos (meq O ₂ /kg)	9,32	19,58	14,1	—	0,6	<10
Índice de saponificación (g KOH/kg)	206	195,01	187,7	188,29	196,15	256,5

- (I): Pijiguao Rojo (*Bactris gasipaes* HBK)
- (II): Aguacate (*Persea Americana*) [35]
- (III): Oliva (*Olea Europaea*) [36]
- (IV): Durazno (*Prunus Persica*) [31]
- (V): Cacao (*Theobroma Cacao*) [37]
- (VI): Coco (*Cocus Nucifera*) [38]

Tabla 19: Perfil de ácidos grasos de algunos aceites crudos.

Ácidos grasos		Aceites Crudos					
		(I)	(II)	(III)	(IV)	(V)	(VI)
Láurico	C12:0	-	-	-	-	-	51,0
Palmítico	C16:0	33,0	25,1	13,0	6,2	27,27	9,0
Palmitoleico	C16:1	9,2	8,3	-	-	0,3	-
Estearico	C18:0	1,3	1,2	2,5	1,5	32,71	2,5
Oleico	C18:1	46,2	50,2	72,0	69,7	34,38	7,0
Linoléico	C18:2	8,6	13,5	10,0	21,9	3,53	1,8
Linolénico	C18:3	1,3	1,7	1,0	-	1,02	-
Araquídico	C20:0	0,2	-	0,3	-	-	-
Gadoléico	C20:1	0,2	-	0,7	-	-	-
Saturados	-	34,5	26,3	15,5	7,7	59,98	90,5
Insaturados	-	65,5	73,7	83,7	91,63	39,23	8,8

- (I): Pijiguao Rojo (*Bactris gasipaes* HBK).
- (II): Aguacate (*Persea Americana*) [39].
- (III): Oliva (*Olea Europaea*) [40].
- (IV): Durazno (*Prunus Persica*) [31].
- (V): Cacao (*Theobroma Cacao*) [37].
- (VI): Coco (*Cocus Nucifera*) [38].

la mayor ponderación fue el aceite de aguacate (*Persea Americana*) con un 82,6 % de similitud, le sigue el aceite de oliva (*Olea Europaea*) con un 76,4 %, la manteca de cacao (*Theobroma Cacao*) con un 62,6 % y en menor porcentaje se encuentran el aceite de durazno (*Prunus Persica*) y el aceite de coco (*Cocus Nucifera*) con un 57,8 % y 54,6 % de similitud respectivamente.

A partir de estos resultados se puede decir que

Tabla 20: Matriz de ponderación de los factores de evaluación.

Factores	Peso (%)	Aceites Vegetales crudos									
		Aguacate (I)		Oliva (II)		Durazno (III)		Cacao (IV)		Coco (V)	
		puntos	valor	puntos	valor	puntos	valor	puntos	valor	puntos	valor
I. de acidez	11,11	2	0,22	3	0,33	1	0,11	3	0,33	3	0,33
I. de peróxido	11,11	3	0,33	4	0,44	-	-	1	0,11	5	0,56
I. de yodo	2,77	4	0,11	5	0,14	5	0,14	2	0,06	1	0,03
I. de saponificación	19,44	5	0,97	5	0,97	5	0,97	5	0,97	5	0,97
Ac. Grasos saturados	27,77	4	1,11	3	0,83	2	0,56	3	0,83	2	0,56
Ac. Grasos insaturados	27,77	5	1,39	4	1,11	4	1,11	3	0,83	1	0,28
Total	100		4,13		3,82		2,89		3,13		2,73
	%		82,6		76,4		57,8		62,6		54,6

(I): *Persea Americana*
(IV): *Theobroma Cacao*

(II): *Olea Europaea*
(V): *Cocos Nucifera*

(III): *Prunus Persica*

el aceite de pijiguao (*Bactris gasipaes* HBK) posee características bastante similares al aceite de aguacate (*Persea Americana*), aceite de oliva (*Olea Europaea*) y a la manteca de cacao (*Theobroma Cacao*). Todos estos aceites tienen significativo valor dentro de la industria cosmética, por lo que se puede concluir que al aceite de pijiguao se puede utilizar en esta industria en fabricación de cremas para el cuidado de la piel, de jabones, labiales y en la fabricación de champús y acondicionadores para el cuidado del cabello.

4. Conclusiones y Recomendaciones

La composición nutricional de la pulpa del pijiguao rojo y amarillo fue similar. La diferencia más notable fue en la humedad ($49,760 \pm 0,005$) % y ($43,300 \pm 0,005$) % para la variedad roja y amarilla respectivamente.

La variedad que presentó mayor rendimiento en el proceso de extracción de aceite es la roja con un porcentaje de ($15,640 \pm 0,004$) %.

Se obtuvo que las mejores condiciones operacionales para la extracción fueron: 5 gramos de pulpa, 0,850 milímetros de granulometría y 6 horas de tiempo de extracción.

La caracterización del aceite de pijiguao para la variedad roja cumplió con las normas COVENIN a excepción del índice de peróxido.

Con respecto al perfil lipídico los porcentajes de ácidos grasos saturados e insaturados para la variedad roja fueron de 34,5 % y 65,5 % respec-

tivamente, encontrándose en mayor proporción los ácidos oleicos con un 46,2 % y palmítico con 33 %.

No se encontraron síntomas tóxicos en los ensayos de toxicidad aguda para las dosis de (2000 y 5000) mg/kg de peso, clasificándose al aceite de pijiguao como no tóxico.

En el ensayo de irritabilidad dérmica con el aceite de pulpa de pijiguao hubo ausencia de eritemas y edemas, clasificándose a este aceite como no irritante.

Las propiedades fisicoquímicas y el perfil lipídico del aceite de pijiguao lo asemejan al aceite de aguacate, oliva y manteca de cacao.

El aceite de pijiguao puede ser utilizado en la fabricación de cremas para el cuidado de la piel, jabones, productos para el cuidado del cabello y labiales.

Referencias

- [1] David B. Arkcoll and Jaie P. L. Aguiar. Peach palm (*Bactris gasipaes* HBK), a new source of vegetable oil from the wet tropics. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 35(5):520–526, 1984.
- [2] C. R. Clement and D. B. Arkcoll. The pejobaye (*Bactris gasipaes* H.B.K., *Palmae*) as an oil crop: potential and breeding strategy. *Oleagineux*, 46(7):293–299, 1991.
- [3] J Mora-Urpí, CH CLEMENT y MV PATIÑO. Diversidad genética en pejobaye I: Razas e híbridos. In *IV Congreso Internacional sobre Biología, Agronomía e Industrialización del pijuayo.*, pages 11–19, 1993.
- [4] COVENIN 1156-79, Alimentos para animales. Determinación de la humedad. COVENIN, 1979.
- [5] COVENIN 1178–83, Alimentos. Determinación de fósforo. (1^{ra} Revisión). COVENIN, 1983.

- [6] COVENIN 328:2001, Aceites y grasas vegetales. Determinación de cenizas. (3^{ra} Revisión). COVENIN, 2001.
- [7] COVENIN 3218:1996, Alimentos. determinación de la grasa libre. COVENIN, 1996.
- [8] COVENIN 1194-79, Alimentos para animales. Determinación de fibra cruda. COVENIN, 1979.
- [9] COVENIN 1195:1980, Alimentos para animales. Determinación de nitrógeno. Método de Kjeldahl. COVENIN, 1980.
- [10] COVENIN 1158-82, Alimentos para animales. Determinación de calcio. Método de referencia. (1^{ra} Revisión). COVENIN, 1982.
- [11] J. Rondón. Evaluación del proceso de extracción del aceite de la pulpa del fruto de la palma del pijigüao (*Bactris gasipaes* HBK). Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2009.
- [12] COVENIN 323:1998, Aceites y grasas vegetales. Determinación del índice de saponificación. COVENIN, 1998.
- [13] COVENIN 324:2001, Aceites y grasas vegetales. Determinación del índice de Wijs. (4^{ta} Revisión). COVENIN, 2001.
- [14] COVENIN 325:2001, Aceites y grasas vegetales. Determinación de la acidez. (3^{era} Revisión). COVENIN, 2001.
- [15] COVENIN 508:2001, Aceites y grasas vegetales. Determinación del índice de peróxidos. (2^{da} Revisión). COVENIN, 2001.
- [16] COVENIN 702:2001, Aceites y grasas vegetales. Determinación del índice de refracción. (2^{da} Revisión). COVENIN, 2001.
- [17] COVENIN 702:2001, Aceites y grasas vegetales. Determinación de la densidad relativa $t/20^{\circ}\text{C}$. (2^{era} Revisión). COVENIN, 2001.
- [18] COVENIN 2281:2002, Aceites y grasas vegetales. Determinación del perfil de ácidos grasos e índice de yodo por cromatografía de gases. (2^{da} Revisión). COVENIN, 2002.
- [19] OECD. Test N° 420: Acute oral toxicity - fixed dose procedure. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 4 Health Effects, 2002.
- [20] OECD. Test N° 404: Acute dermal irritation/corrosion. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 4 Health Effects, 1992.
- [21] Comisión Nacional de Recursos Fitogenéticos. Costa Rica: Informe Nacional para la Conferencia Técnica Internacional de la FAO sobre los recursos fitogenéticos. Technical report, Conferencia Técnica Internacional de la FAO sobre los Recursos Fitogenéticos, Leipzig, Alemania, 1996.
- [22] Antonio Pasquel, Abel del Castillo, Víctor Sotero y Dora García. Extracción del aceite de la cáscara de *Bactris gasipaes* HBK usando dióxido de carbono presurizado. *Alimentaria*, 2(1):1-14, 2002.
- [23] Dora E Garcia, Victor E Sotero y E Leéis. Caracterización de la fracción lipídica de tres razas de pijuayo (*bactris gasipaes* hbk). *Folia Amazónica*, 9(1-2):29-43, 1998.
- [24] Mario Murillo R., Alex Kroneberg, Julio Mata, José Calzada y Víctor Castro. Estudio preliminar sobre factores inhibidores de enzimas proteolíticas en la harina de pejibaye (*Bactris gasipaes*). *Revista de Biología Tropical*, 31(2):227-231, 2016.
- [25] Lizaur Pérez. *Sistema mexicano de alimentos equivalentes*. FNS, 3^{era} edición, 2008.
- [26] Melvin H Williams. *Nutrición para la salud la condición física y el deporte (Bicolor)*. Editorial Paidotribo, España, 1^{era} edición, 2002.
- [27] Salvador Baduñ Dergal. *Química de los alimentos*. Pearson Educación, México, 4^{ta} edición, 1993.
- [28] Maripi Gadet. *Secretos de la belleza natural*. Random House Mondadori, España, 2005.
- [29] L. Arveláez. Aplicación de un diseño experimental para la extracción de aceite de la almendra de la palma corozo (*acromia aculeata*). Trabajo Especial de Grado, Departamento de Química, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2003.
- [30] COVENIN 30:1997, Aceites y grasas vegetales. norma general. (3^{era} Revisión). COVENIN, 1997.
- [31] G. Santangelo y C. González. Refinación del aceite crudo de durazno (*prunus persica*) y su caracterización. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2004.
- [32] M. Martini, M. Chivot y G. Peyrefitte. *Dermocosmética y Estética: No. 3 Cosmetología*. Masson, Barcelona, España, 1997.
- [33] R. Delgado y M. Ramírez. Desarrollo de un producto cosmético con propiedades antiarrugas a partir del aceite de la semilla de merey (*Anacardium Occidentale* L). Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2006.
- [34] Antonieta Garrote y Ramón Bonet. Cosméticos nutritivos. *Offarm: Farmacia y Sociedad*, 20(9):82-90, 2001.
- [35] M Schwartz, JA Olaeta, P Undurraga y V Costa. Mejoramiento del rendimiento de extracción del aceite de palta (aguacate). In *Actas VI Congreso Mundial del Aguacate*, Viña Del Mar, Chile, 2007.
- [36] S. Sánchez, E. Ruiz, C. Cara y E. Castro. TEC-23. Caracterización de frutos y aceites de oliva vírgenes de olivar marginal de las variedades picual, verdial y nevadillo. In *XI Simposium Científico-Técnico Expoliva 2003*, Bolivia, 2003.
- [37] R. Cuamba. Caracterización de grasas alternativas de la manteca de cacao. Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, México, 2005.
- [38] Alton Edward Bailey. *Aceites y grasas industriales*.

Editorial Reverté, S. A., España, 2001.

- [39] Carlos de Blas Beorlegui, Gonzalo González Mateos y Pilar García Rebollar. *Tablas FEDNA de composición y valor nutritivo de alimentos para la fabricación de piensos compuestos*. Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal, España, 2003.
- [40] M. C. Luna, P. L. Moyano, J. L. Benítez, C. A. Andrada, A. C. Matías, and F. Dalla Lasta. Evaluación de la composición en ácidos grasos de aceites de oliva vírgenes de catamarca (república argentina). *Revista del CIZAS*, 7(1-2):71-79, 2006.

On the Admissibility of LPV Descriptor Systems

Addison Ríos Bolívar^{*,a}, Miguel Narváez^b

^aDepartamento de Sistemas de Control, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Venezuela.

^bDepartamento de Matemática, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Venezuela.

Abstract.-

The contribution of this work is focused on the analysis and synthesis of stabilizing controllers based on static output feedback (SOF), for a class of descriptor linear parameter variable (LPV) systems. Descriptors systems, called also: differential-algebraic systems, singular systems, semi-state systems or generalized state-space systems; are considered to possess disturbances and parametric uncertainties of polytopic type, as are described by the following equation:

$$\mathbb{E}(\rho)\dot{z}(t) = \mathcal{F}(\rho)z(t) + \mathcal{B}(\rho)\omega(t) + Bu(t), \quad h(t) = C(\rho)z(t),$$

where ρ is a parametric variation. From a condition of existence of a linear injective application, representing the generalized inverse matrix of \mathbb{E} , the original descriptor system is transformed to a LPV system. Then, the condition for the static output feedback on the LPV system is analyzed. Synthesis of the SOF-based controller is obtained considering performance indices in \mathcal{H}_2 and \mathcal{H}_∞ , described as linear matrix inequalities, LMIs, as criteria in order to obtain the gain of SOF, in the presence of uncertainties and disturbances. A numerical example is presented to illustrate the results and performance of robust control.

Keywords: descriptor systems; LPV systems; static output feedback (SOF); \mathcal{H}_2 - \mathcal{H}_∞ norms; robust control.

Sobre la admisibilidad de sistemas LPV descriptores

Resumen.-

La contribución de este trabajo está centrada en el análisis y síntesis de controladores estabilizantes, basados en realimentación estática de la salida (SOF), para una clase de sistemas descriptores lineales a parámetros variantes (LPV). Los sistemas descriptores, denominados también: sistemas diferencial-algebraicos, sistemas singulares, sistemas de semi-estado o sistemas generalizados de espacio de estado; se consideran que presentan incertidumbres paramétricas de tipo politópicas y perturbaciones, tal como se describe por la ecuación siguiente:

$$\mathbb{E}(\rho)\dot{z}(t) = \mathcal{F}(\rho)z(t) + \mathcal{B}(\rho)\omega(t) + Bu(t), \quad h(t) = C(\rho)z(t),$$

donde ρ es la variación paramétrica. A partir de una condición de existencia de una aplicación inyectiva lineal, representando la inversa generalizada de la matriz \mathbb{E} , el sistema descriptor original es transformado a un sistema LPV. Luego, se analiza la condición para la realimentación estática de la salida sobre ese sistema LPV. La síntesis del controlador por SOF se obtiene considerando índices de desempeño en \mathcal{H}_2 y \mathcal{H}_∞ , descritos como desigualdades matriciales lineales, LMIs, como criterios para obtener la ganancia de SOF, bajo la presencia de incertidumbres y perturbaciones. Para ilustrar los resultados y el desempeño del control robusto, se presentan dos ejemplos numéricos.

Palabras clave: sistemas descriptores; sistemas LPV; realimentación estática de la salida; normas \mathcal{H}_2 - \mathcal{H}_∞ ; control robusto.

*Autor para correspondencia

Correo-e: ilich@ula.ve (Addison Ríos Bolívar)

Recibido: abril 2017

Aceptado: noviembre 2017

1. Introduction

Since its introduction in 1977 [1], descriptor systems (DS), also called singular systems, semi-state systems, differential-algebraic systems or generalized state-space systems; have been one of the main research fields within control theory, since they are a natural and general representation of dynamic systems. Unlike their regular counterparts in state space, a DS allows a representation that incorporates algebraic constraints in their physical variables. Over the past two decades, descriptor systems have attracted much attention because of the comprehensive uses in many real world systems, such as in the economy (Leontief dynamic model), social models, electrical systems, chemical processes, and mechanical models (robotics). Considerable progress has since been made in the investigation of such systems. A problem that has been well studied is the admissibility of DS, being a research line that still remains open.

On the other hand, the context of linear parameter variable (LPV) systems refers to linear dynamical systems whose state-space representations depend on exogenous non-stationary parameters [2]. LPV systems are a generalization of LTV systems, establishing an intermediate model between linear and nonlinear dynamics, so they can be constituted in a representative model for the control of non-linear processes, allowing the use of all machinery of control of linear systems to the case of particular nonlinear processes control [3, 4]. In addition, if the nonlinear model is formulated as a parameterized linear system, where parameterization is state dependent, it allows an LPV description to represent a non-local nonlinear system, taking advantage of the consequences of a global stabilization [5, 4]. Thus, the LPV representation of a nonlinear system describes a class of systems larger than the original nonlinear system.

When there are combined the modeling of physical systems with uncertain parameters, there arise dynamic systems that represent uncertain DS. As is well known, for modeling many applications and technical processes, only approximate models are available, so that the analysis of DSs

subject to uncertainties has been a very active research line. For example, numerous analysis and synthesis problems have been addressed in the literature: the analysis of robust stability (admissibility), stabilization, analysis of the robust controllability and observability, robust control under the characterization of the \mathcal{H}_∞ - \mathcal{H}_2 norms, robust filtering, analysis and positive real control, among other lines of work, [6, 7, 8, 9]. The main results in the analysis and synthesis of DS-dependent parameters are based on parametric Lyapunov functions, which allow to minimize the conservatism of classic Lyapunov functions, when searching numerical solutions through LMIs, representing a formulation that allows the resolution of complicated control problems very efficiently, and with a remarkable degree of simplicity [10, 9].

In this context, this paper addresses the analysis of robust admissibility and control for an DS class of continuous time and with polytopic type uncertainties in the dependent parameters, by using the characterizations of the \mathcal{H}_2 - \mathcal{H}_∞ norms as LMIs, which arise from parameter dependent Lyapunov functions. The DS class is the one where there is a linear injection application that allows to transform the parameter dependent DS to a regular LPV system. The existence of linear transformation ensures that the analysis of the properties results of the transformed LPV system are transferred to the finite modes of the original parameter dependent DS. Likewise, the robust control design, for the transformed LPV system, is a guarantee of satisfying the admissibility and robust performance for the original DS system. Thus, the condition for the static output feedback (SOF) on the transformed LPV system is analyzed. The SOF controller synthesis is obtained by considering performance indexes in \mathcal{H}_2 and \mathcal{H}_∞ , described as LMIs, as criteria to obtain the extended SOF gain, which considers a feedback gain for the output, and a feedback gain for its derivative.

Notation. \mathfrak{R} is the set of real numbers. For a matrix A , A^T denotes its transpose. $\text{tr}(A)$ defines the trace of the matrix A . In symmetric matrices partitions \star denotes each of its symmetric blocks. \mathbb{I} defines the identity matrix of appropriate dimen-

sion. \mathcal{L}_2 is the Hilbert space of vectorial signals defined on $(-\infty, \infty)$, with scalar product $\langle x | y \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)^* y(\tau) d\tau$ and such that $\|x\|_2 \triangleq \langle x | x \rangle^{1/2} < \infty, \forall x \in \mathcal{L}_2$.

1.1. Preliminaries

Important results that must be taken into account, since they will be used in the development of the proposed technique, correspond to the extended characterizations as linear matrix inequalities (LMI)s of the \mathcal{H}_∞ and \mathcal{H}_2 norms for linear systems [11, 12].

Consider the LTI system defined by

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B\omega \\ y &= Cx + D\omega \end{aligned} \tag{1}$$

Lemma 1 (Relaxed \mathcal{H}_2 performance).

Consider the system (1), where $D = 0$. For $P = P^T > 0$, the following statements are equivalent:

i) A is stable and $\|C(s\mathbb{I} - A)^{-1}B\|_2^2 < \mu$.

ii) There exist P and Z , such that: $tr(Z) < 1$ and

$$\begin{bmatrix} A^T P + PA & PB \\ B^T P & -\mu \mathbb{I} \end{bmatrix} < 0, \quad \begin{bmatrix} P & C^T \\ C & Z \end{bmatrix} > 0 \tag{2}$$

iii) There exist P, Z and G , such that: $tr(Z) < 1$ and

$$\begin{bmatrix} -(G + G^T) & G^T A + P & G^T B & G^T \\ A^T G + P & -P & 0 & 0 \\ B^T G & 0 & -\mu \mathbb{I} & 0 \\ G & 0 & 0 & -P \end{bmatrix} < 0, \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix} P & C^T \\ C & Z \end{bmatrix} > 0$$

iv) There exist P, Z and G , such that: $tr(Z) < 1$ and

$$\begin{bmatrix} -(G + G^T) & G^T A + P + G^T & G^T B \\ A^T G + P + G & -2P & 0 \\ B^T G & 0 & -\mu \mathbb{I} \end{bmatrix} < 0, \tag{4}$$

$$\begin{bmatrix} P & C^T \\ C & Z \end{bmatrix} > 0$$

Proof:

The equivalence between the three first statements has been shown in Theorem 3.3 of [13], which is based on projection lemma and its reciprocal version. The equivalence between ii) and iv) is shown in [11]. ■

For the stability analysis, one knows that when exists relations between the system dynamic matrix and the Lyapunov matrix, the results that are obtained are very conservative, as it is the case of systems with polytopical uncertainties [14]. This situation can be resolved, in certain degree, uncoupling both matrices. In addition, the declaration iv) in the Lemma 1 provides an improved representation of the condition of performance in \mathcal{H}_2 presented in [13].

Similarly for the \mathcal{H}_2 case, there are some results to improve performance in \mathcal{H}_∞ , from improved versions of Bounded Real Lemma, as shown below.

Lemma 2 (Relaxed \mathcal{H}_∞ performance).

Consider the system (1). For $P = P^T > 0$ and the matrix G , the following statements are equivalent:

i) A is stable and $\|C(s\mathbb{I} - A)^{-1}B + D\|_\infty < \gamma$

ii) There exist P , such that

$$\begin{bmatrix} A^T P + PA & PB & C^T \\ B^T P & -\gamma^2 \mathbb{I} & D^T \\ C & D & -\mathbb{I} \end{bmatrix} < 0 \tag{5}$$

iii) There exist P and G such that, for $\tau \gg 1$

$$\begin{bmatrix} -(G + G^T) & G^T A + P + \tau G^T & 0 & G^T B \\ A^T G + P + \tau G & -2\tau P & C^T & 0 \\ 0 & C & -\mathbb{I} & D \\ B^T G & 0 & D^T & -\gamma^2 \mathbb{I} \end{bmatrix} < 0 \tag{6}$$

Proof:

Conditions i) and ii) are the well known *Bounded Real Lemma*. Equivalence between ii) and iii) can be seen in [11]. ■

2. Descriptor systems and LPV systems

2.1. Descriptor systems

The DS systems, also called singular systems, semi-state systems, differential-algebraic systems or generalized state-space systems; have been one of the main fields of control theory research since its introduction in [1]. Over the last two decades, the DSs have attracted much attention due to the comprehensive uses in the economy, such as the Leontief dynamic model, in electrical systems, chemical processes, and mechanical models. Since then, considerable progress has been made in the investigation of such systems [8].

An DS is dynamically defined by

$$\begin{aligned} \mathbb{E}\dot{z}(t) &= \mathcal{F}z(t) + Bu(t), \\ h(t) &= Cz(t) \end{aligned} \quad (7)$$

where $z(t) \in \mathbb{R}^n$ is the vector of descriptor variable (instead of state vector), $\mathbb{E} \in \mathbb{R}^{m \times n}$, with $m \leq n$ and $\text{rank}(\mathbb{E}) = r \leq n$ and which is called the descriptor matrix; and $\mathcal{F} \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{m \times l}$, $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$; the control function u belonging to $L_2(0, \tau; \mathbb{R}^l)$.

If $m = n$ and if for all $t \in [0, \tau]$, the polynomial $p(s) = \det(s\mathbb{E} - \mathcal{F})$ satisfies that $p(s) \neq 0$, it is said that the pair $(\mathbb{E}, \mathcal{F})$ is *regular*. Otherwise, it is called *singular*.

The solution and many of the properties of a free DS ($u = 0$) can be characterized in terms of the *Weierstraß* canonical form [15, 8], which allows to transform the matrix \mathbb{E} into a Jordan canonical form, with a finite number of eigenvalues (finite dynamic mode), plus a nilpotent matrix, also in Jordan canonical form, representing a number of infinite eigenvalues (impulsive mode). The *nilpotency index* of the nilpotent matrix is called *system index*. If \mathbb{E} is non-singular, the system is said to have zero index.

Definition 3. Consider the system (7), and be $\kappa = \text{deg}(\det(s\mathbb{E} - \mathcal{F}))$. If $\kappa = r$ is said that the DS is of free impulse.

Thus, the DS (7) has κ finite dynamic modes, $r - \kappa$ impulsive modes, and $n - r$ non-dynamic modes.

Definition 4. Let the DS given by (7), with $\mathbb{E}, \mathcal{F} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times l}$ and $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$. In addition, be the matrices: \mathbb{T} and \mathbb{S} , with $\text{img } \mathbb{T} = \ker \mathbb{E}^T$, $\text{img } \mathbb{S} = \ker \mathbb{E}$.

- i) For the triplet $(\mathbb{E}, \mathcal{F}, B)$ is said that the system is of stabilizable finite dynamics if $\text{rank}[\lambda\mathbb{E} - \mathcal{F}, B] = n \forall \lambda \in C^+$.
- ii) For the triplet $(\mathbb{E}, \mathcal{F}, B)$ is said that the system is impulse controllable if $\text{rank}[\lambda\mathbb{E}, \mathcal{F}\mathbb{S}, B] = n$.
- iii) For the triplet $(\mathbb{E}, \mathcal{F}, B)$ the system is said to be strongly stabilizable if i) and ii) are satisfied.
- iv) For the triplet $(\mathbb{E}, \mathcal{F}, C)$ is said that the system has detectable finite dynamics if $\text{rank}[\lambda\mathbb{E}^T - \mathcal{F}^T, C^T] = n \forall \lambda \in C^+$.
- v) For the triplet $(\mathbb{E}, \mathcal{F}, C)$ is said that the system is impulse observable if $\text{rank}[\lambda\mathbb{E}^T, \mathcal{F}^T\mathbb{T}, C^T] = n$.
- vi) For the triplet $(\mathbb{E}, \mathcal{F}, C)$ the system is said to be strongly detectable if iv) and v) are satisfied.

A controllability analysis for DS is presented in [16, 17]. In that order of ideas, in [18] a study of the controllability condition for a semilinear non-autonomous DS, by transforming the system from a linear injective application, is presented.

Theorem 5. Let the system (7), with the pair $(\mathbb{E}, \mathcal{F})$ regular; and let $u = 0$.

1. The trivial solution $z = 0$ of the system is stable if and only if all the finite eigenvalues of $\lambda\mathbb{E} - \mathcal{F}$ are in the closed left half-plane and the eigenvalues on imaginary axis are simple.
2. The trivial solution $z = 0$ of the system is asymptotically stable if and only if all the finite eigenvalues of $\lambda\mathbb{E} - \mathcal{F}$ are in the open left half-plane. This means that finite dynamic modes are asymptotically stable.

Proof:

See [19, 7]. ■

The asymptotic stability of DS (7) can be

characterized by a generalized projected Lyapunov equation given by:

$$\mathbb{E}^T \mathcal{X} \mathcal{F} + \mathcal{F}^T \mathcal{X} \mathbb{E} = -\mathcal{Q}, \quad (8)$$

which has a unique solution \mathcal{X} corresponding to a positive semi-definite symmetric matrix, and \mathcal{Q} is a positive definite matrix.

Definition 6. Consider the system (7). It is said that the DS is admissible if it is regular, free impulse and stable.

Definition 6 allows to establish conditions for the control of DS in the sense of its stabilization [10]. Indeed:

1. For the triplet $(\mathbb{E}, \mathcal{F}, B)$ is said that the system has stabilizable finite dynamics and impulse controllable if a matrix \mathbb{K} exists such that the pair $(\mathbb{E}, \mathcal{F} + B\mathbb{K})$ is admissible.
2. For the triplet $(\mathbb{E}, \mathcal{F}, C)$ is said that the system is of finite dynamics detectable and impulse observable if a matrix \mathbb{L} exists such that the pair $(\mathbb{E}, \mathcal{F} + \mathbb{L}C)$ is admissible.

On the other hand, if the system (7) is regular and free impulse, through the algebraic-differential manipulation of the non-dynamic modes, it is possible to obtain a system descriptor of the form

$$\begin{aligned} \mathbb{E}\dot{z}(t) &= \mathbb{F}z(t) + \mathbb{B}u(t), \\ h(t) &= Cz(t) \end{aligned} \quad (9)$$

where $\mathbb{E} \in \mathfrak{R}^{r \times n}$, $\mathbb{F} \in \mathfrak{R}^{r \times n}$ and $\mathbb{B} \in \mathfrak{R}^{r \times m}$, representing the dynamic modes of the original system. Thus, the admissibility problem of the system (7) is equivalent to the admissibility of the system (9).

For example, be the descriptor system

$$\begin{bmatrix} e_1 & e_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \dot{z} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \omega \quad (10)$$

with $e_1, e_2 \neq 0$. This system is regular and free impulse, with $r = 1$. Thus, from the non-dynamic modes we obtain the DS given by

$$\begin{bmatrix} e_1 & e_2 \end{bmatrix} \dot{z} = \begin{bmatrix} a_1 - b_1 & a_2 - b_2 \end{bmatrix} z + u \quad (11)$$

for which the admissibility problem corresponds to the admissibility of the original DS. The procedure is extended to higher order DS.

2.2. LPV systems

The context of LPV systems refers to linear dynamical systems whose state space representations depend on non-stationary exogenous parameters [2]. LPV systems are a generalization of LTV systems, establishing an intermediate model between linear and nonlinear dynamics, so that they can be constituted in a representative model for the control of non-linear processes, allowing the use of all machinery to control linear systems to the case of to design controllers for particular nonlinear processes [3, 4].

Definition 7. An LPV is a dynamic system in which matrices contain functions that depend on a vector of known variant parameters.

According to Definition 7, a representative LPV model is of the form:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(\rho(t))x(t) + B(\rho(t))u(t); & x(t_0) &= x_0 \\ y(t) &= C(\rho(t))x(t) \end{aligned} \quad (12)$$

where $x(t) \in \mathfrak{X}^n$ are the states, $u(t) \in \mathfrak{X}^p$ are the controls and $y(t) \in \mathfrak{X}^q$ are the measured output. $\rho(t) : \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}^l$. If $\rho(t) = t$, $l = 1$, the LPV model describes an LTV system.

From a practical point of view, an LPV system has at least two interesting interpretations [20]:

1. It can be seen as a LTI system with parametric uncertainty, where the uncertainty is given by the time variant parameter $\rho(t)$.
2. It can be seen as a LTV model, or a model resulting from the linearization of a nonlinear system (NLS) along the trajectories of the parameter ρ , applying extended linearization or based-on velocity linearization, which allows to apply the very well known methods and techniques of analysis and synthesis of linear systems.

The typical constraints on exogenous parameters are limits on magnitudes and their indexes of variations, that is, $\forall t \geq 0$

$$\underline{\rho} \leq \rho(t) \leq \bar{\rho}, \quad \underline{\mu} \leq \dot{\rho}(t) \leq \bar{\mu} \quad (13)$$

2.2.1. Polytopical LPV systems

Consider the system (12). That system can be characterized as a polytope if it is defined

$$\mathcal{P} := \left(\begin{array}{cc} A(\rho) & B(\rho) \\ C(\rho) & 0 \end{array} \right) \in \Omega. \quad (14)$$

where Ω is a polytopic set, which is defined as:

$$\Omega := \left\{ \mathcal{P} : \mathcal{P} = \sum_{i=1}^l \rho_i \mathcal{P}_i; \rho_i \geq 0; \sum_{i=1}^l \rho_i = 1 \right\} \quad (15)$$

so that any admissible matrix \mathcal{P} of the system can be written as an unknown convex combination of l vertex matrices given, such that

$$\mathcal{P}_i = \left(\begin{array}{cc} A_i & B_i \\ C_i & 0 \end{array} \right) \quad (16)$$

where $A_i, B_i, C_i, i = 1, \dots, l$, are given matrices, representing the polytope vertices. Thus, this system can be characterized by the convex hull of Ω considering the vertices of the polytope, i.e.

$$C_o \Omega = \left\{ \left(\begin{array}{cc} A_1 & B_1 \\ C_1 & 0 \end{array} \right), \dots, \left(\begin{array}{cc} A_l & B_l \\ C_l & 0 \end{array} \right) \right\}. \quad (17)$$

where these matrix vertices are known, provided that $\rho_i \in \mathfrak{R}, \rho_i \geq 0, i = 1, \dots, l, \sum_{i=1}^l \rho_i = 1$.

Consequently, from the dependence of the system matrices with respect to the ρ parameter, and from the membership of those matrices to the polytope Ω , then, with $x(t_0) = x_0$:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \left(\sum_{i=1}^l A_i \rho_i \right) x(t) + \left(\sum_{i=1}^l B_i \rho_i \right) u(t); \\ y(t) &= \left(\sum_{i=1}^l C_i \rho_i \right) x(t) \end{aligned} \quad (18)$$

where $\rho_i \in \mathfrak{R}, \rho_i \geq 0, i = 1, \dots, l, \sum_{i=1}^l \rho_i = 1$.

The controllability and observability conditions of these systems can be analyzed in [21, 5] and [22]. The stability and robust stabilization of polytopical LPV systems can be studied in [23, 2], as well in [24, 22].

3. Problem formulation

Consider an DS as (7), but with parametric uncertainty and perturbations, that is:

$$\begin{aligned} \mathbb{E}(\rho) \dot{z}(t) &= \mathcal{F}(\rho) z(t) + \mathcal{B}_1(\rho) \omega(t) + Bu(t) \\ h(t) &= C(\rho) z(t) + \mathcal{D}_1(\rho) \omega(t) \\ y(t) &= C_2 z(t) \end{aligned} \quad (19)$$

which constitutes an LPV descriptor system. There, $u(t) \in \mathfrak{R}^q$ are the controls; $\omega(t) \in \mathfrak{R}^d$ are disturbances; $h(t) \in \mathfrak{R}^p$ are the controlled outputs and $y(t) \in \mathfrak{R}^p$ are the measured outputs. The parametric variation ρ is assumed to meet the constraints defined in (13). $\mathbb{E} \in \mathbb{R}^{m \times n}$, and for all ρ , $\text{rank}(\mathbb{E}) = r < n$. It can be assumed that $r = m$, so that the system is of the form given by (9), with parametric uncertainties. The matrices $\mathcal{F}, \mathcal{B}_1, B, C, \mathcal{D}$ and C_2 are of appropriate dimensions. In addition, for all ρ , it is assumed that:

1. For the triplet $(\mathbb{E}(\rho), \mathcal{F}(\rho), B)$, the finite dynamics of the system is stabilizable and impulse controllable.
2. For the triplet $(\mathbb{E}(\rho), \mathcal{F}(\rho), C_2)$, the finite dynamics of the system is detectable and impulse observable.

The above conditions lead to solutions to the stability and robust performance problem for the system (19). B and C_2 are matrices known for the fact that they characterize, from a practical point of view, the actuators and sensors, respectively, which are the suitably selected devices in the control systems.

The study of the robust stabilization of DS type LPV has been reported in [6, 15, 25, 26, 27]. In these contributions the controllers are state feedback type and the uncertainty is usually assumed only in the dynamic matrix. In [28, 29] and in [30] output feedback is applied, again in models with very particular uncertainties. Finally, in [10, 9] SOF is used for the robust stabilization of a polytopical type DS with the matrix \mathbb{E} certain and undisturbed.

3.1. Robust stabilization and performance problem

Consider the system (19) with, for all ρ , $(\mathbb{E}(\rho), \mathcal{F}(\rho), B)$ defining an stabilizable and

impulse controllable finite dynamics; and $(\mathbb{E}(\rho), \mathcal{F}(\rho), C_2)$ is such that the finite dynamics is detectable and impulse observable.

Problem 8. Design a control $u(t)$ for the system (19) such that the corresponding closed loop system will be *admissible*.

Problem 9. Design a control $u(t)$ for the system (19) such that the corresponding closed loop system will be *admissible* and the effect of the perturbation $\omega(t)$ on the controlled output $h(t)$ will be minimum in the sense of the \mathcal{H}_2 - \mathcal{H}_∞ norms.

For Problem 8, relative to robust stabilization, it is assumed that $\omega(t) = 0$. Next, the problem 9 demands, in addition to robust stabilization, to satisfy a robust performance index characterized under the \mathcal{H}_2 - \mathcal{H}_∞ norms.

4. Main results: LPV descriptor systems control

In this section we present the main results of the work, which consists in proposing an extended SOF control that depends on the output and its derivative. So, be the control of the form:

$$u(t) = \mathcal{K}_0 y(t) + \mathcal{K}_1 \dot{y}(t), \quad (20)$$

where \mathcal{K}_0 y \mathcal{K}_1 are the feedback gains, to be determined, for the output and its derivative. In this case, the derivative of the output is used in the context of the derivative action on PID controllers. Thus, the control will be given by

$$u(t) = \mathcal{K}_0 y(t) + \mathcal{K}_1 C_2 \dot{z}(t) \quad (21)$$

There are some aspects that determine the advantages of this type of controller [24]:

1. If $C_2 = \mathbb{I}$, the design is reduced to a typical state feedback control.
2. If $\mathcal{K}_1 = 0$, corresponds to a classic SOF control.
3. By using the \mathcal{K}_0 and \mathcal{K}_1 gains, many systems that can not be controlled by a classic SOF, can be stabilized by this way. In addition, it is easier to implement than a dynamic output feedback control.

As can be seen in the equation (21), the control $u(t)$ depends on the dynamics of $z(t)$. In order to construct the control, a particular class of linear DSs to variant parameters is assumed, those in which the following condition is satisfied:

$$\forall \rho, \quad \det(\mathbb{E}(\rho)\mathbb{E}^T(\rho)) \neq 0 \quad (22)$$

This means that there is a linear injective application $\Gamma(\rho)$, which represents the generalized inverse of $\mathbb{E}(\rho)$, that is, $\mathbb{E}(\rho)\Gamma(\rho)\mathbb{E}(\rho) = \mathbb{E}(\rho)$.

Therefore, let the change of variable $z(t) = \Gamma(\rho)x(t)$. Consequently, $\mathbb{E}(\rho)\Gamma(\rho) = \mathbb{I}$, then the system (19) is transformed into an LPV system:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(\rho)x(t) + \mathcal{B}_1(\rho)\omega(t) + Bu(t) \\ h(t) &= C_1(\rho)x(t) + \mathcal{D}_1(\rho)\omega(t) \\ y(t) &= C_\Gamma(\rho)x(t) \end{aligned} \quad (23)$$

where

$$A(\rho) = \mathcal{F}(\rho)\Gamma(\rho) - \mathbb{E}(\rho)\frac{\partial\Gamma(\rho)}{\partial\rho}\dot{\rho},$$

which is a parametric matrix that depends on ρ , $\dot{\rho}$ that, according to LPV systems, are bounded parameters; $C_1(\rho) = C(\rho)\Gamma(\rho)$ and $C_\Gamma(\rho) = C_2\Gamma(\rho)$. The control design for the original system (19) can be constructed from the transformed system (23).

Proposition 10. Consider the system (23). If for all ρ the pair $(A(\rho), B)$ is controllable and the pair $(C_\Gamma(\rho), A(\rho))$ is observable, then the system (19) is of finite dynamic stabilizable and impulse controllable, and of finite dynamic detectable and impulse observable.

In fact, the existence of the linear transformation $\Gamma(\rho)$ implies that the system (19) is regular and impulse free: if there exists $\Gamma(\rho)$, the regular system (23) is obtained, since the regularity of (19) depends on the pair $(s\mathbb{E}(\rho), \mathcal{F}(\rho))$ be regular, whose condition becomes the regularity of the pair $(s\mathbb{I}, A(\rho))$, which is always satisfied. In addition, (23) is characterized by the dynamic matrix $A(\rho)$ whose spectrum defines the finite modes of the system (19). Then, according to the results shown in [18], the controllability (observability) properties of the original system are transferred in the transformed system, that is, if for all ρ :

1. the triplet $(\mathbb{E}(\rho), \mathcal{F}(\rho), B)$ defines a system with finite dynamics stabilizable and impulse controllable, then the pair $(A(\rho), B)$ is controllable;
2. the triplet $(\mathbb{E}(\rho), \mathcal{F}(\rho), C_2)$ defines a system with detectable and impulse observable finite dynamics, then pair $(C_\Gamma(\rho), A(\rho))$ is observable.

Following the DS example given by (11), in this case

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \frac{e_1}{e_1^2 + e_2^2} \\ \frac{e_2}{e_1^2 + e_2^2} \end{bmatrix}$$

and the transformed system will be

$$\dot{x} = \frac{e_1(a_1 - b_1) + e_2(a_2 - b_2)}{e_1^2 + e_2^2} x + u$$

Therefore, the problem of admissibility for LPV type DS becomes a problem of control of LPV systems. Consequently, let the system (23) and consider a control law given by the equation (20), then

$$u(t) = \mathbb{M}^{-1} (\mathcal{K}_0 C_\Gamma(\rho) + \mathcal{K}_1 C_\Gamma(\rho) A(\rho)) x(t), (24)$$

where $\mathbb{M} = \mathbb{I} - \mathcal{K}_1 C_\Gamma(\rho) B$.

As can be observed, the existence of the control depends on the invertibility of the matrix \mathbb{M} , which is a more weak condition with respect to the conditions for the typical SOF control [24, 22]. In short, the admissibility problem of the system (19) corresponds to the synthesis of a control for the system (23).

4.1. Robust Stabilization

Let the system (23) with the pair $(A(\rho), B)$ controllable and $\omega(t) = 0$. It is also assumed that the system supports a polytopic representation according to (16). Be a control of the form (24), then the closed loop dynamic matrix is:

$$A_c = A(\rho) + B \mathbb{M}^{-1} (\mathcal{K}_0 C_\Gamma + \mathcal{K}_1 C_\Gamma A(\rho)),$$

where \mathbb{M} is a nonsingular matrix, so that \mathbb{M}^{-1} exists, which allows to calculate $u(t)$.

Theorem 11. *Let the system (23) with the pair $(A(\rho), B)$ controllable. There is an extended SOF control of the form (24) that stabilizes in closed-loop system, if there exists \mathbb{M} non-singular and the matrix $P = P^T > 0$, and matrices X, Y, Z such that the following LMI is satisfied*

$$\begin{aligned} PA_i + A_i^T P + BXC_{\Gamma_i} + C_{\Gamma_i}^T X^T B^T + \\ BYC_{\Gamma_i} A_i + A_i^T C_{\Gamma_i}^T Y^T B^T < 0, \end{aligned} \quad (25)$$

where $A_i, C_{\Gamma_i}, i = 1, \dots, l$, representing the polytope vertices, then the feedback gains are obtained from

$$\mathcal{K}_0 = \mathbb{M} Z^{-1} X \quad (26)$$

$$\mathcal{K}_1 = \mathbb{M} Z^{-1} Y \quad (27)$$

with $PB = BZ$ and $\mathbb{M}^{-1} = \mathbb{I} + Z^{-1} Y C_\Gamma(\rho) B$.

Proof:

It is known that for closed-loop stability, there exists $P = P^T > 0$ such that $PA_c + A_c^T P < 0$, then substituting

$$\begin{aligned} PA_i + P B \mathbb{M}^{-1} \mathcal{K}_0 C_{\Gamma_i} + P B \mathbb{M}^{-1} \mathcal{K}_1 C_{\Gamma_i} A_i + A_i^T P + \\ C_{\Gamma_i}^T \mathcal{K}_0^T (\mathbb{M}^{-1})^T B^T P + A_i^T C_{\Gamma_i}^T \mathcal{K}_1^T (\mathbb{M}^{-1})^T B^T P < 0 \end{aligned}$$

For the linearization of the matrix inequality, if $PB = BZ$ and variable changes $X = Z \mathbb{M}^{-1} \mathcal{K}_0$, $Y = Z \mathbb{M}^{-1} \mathcal{K}_1$, the LMI given by (25) is obtained. Moreover, as $\mathbb{M} = \mathbb{I} - \mathcal{K}_1 C_\Gamma(\rho) B$ and $Z^{-1} Y = \mathbb{M}^{-1} \mathcal{K}_1$, then the expression for \mathbb{M}^{-1} is obtained, which depends on the numerical solution of the LMI (25), on known matrices of the system (19), and on $C_\Gamma(\rho)$, which can be selected from the central value of ρ . ■

It may be noted that $Z^{-1} = (B^T B)^{-1} B^T P^{-1} B$. Thus, the admissibility problem of the system (19) is solved by robust stabilization of the system (23).

4.2. Robust stabilization and performance

Let the system (23) with the pair $(A(\rho), B)$ controllable. This system supports a polytopic representation according to (16). Be a control given by (24), then the closed loop system is:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_c x(t) + \mathcal{B}_c \omega(t) \\ h(t) &= C_1(\rho) x(t) + \mathcal{D}_1(\rho) \omega(t) \end{aligned} \quad (28)$$

where

$$\begin{aligned} A_c &= A(\rho) + B\mathbb{M}^{-1}\mathcal{K}_0C_\Gamma(\rho) + \\ &\quad B\mathbb{M}^{-1}\mathcal{K}_1C_\Gamma(\rho)A(\rho) \\ \mathcal{B}_c &= \mathcal{B}_1(\rho) + B\mathbb{M}^{-1}\mathcal{K}_1C_\Gamma(\rho)\mathcal{B}_1(\rho) \end{aligned}$$

As it has been proposed, it is required to design \mathcal{K}_0 and \mathcal{K}_1 such that A_c be robustly stable, and that the effect of the perturbation $\omega(t)$ on controlled output $h(t)$ be minimum according to performance indices in $\mathcal{H}_2 - \mathcal{H}_\infty$, which are characterized by LMIs according to the Lemma 1 and the Lemma 2.

4.2.1. Design in \mathcal{H}_2

Theorem 12. *Let the system (23) with the pair $(A(\rho), B)$ controllable and $\mathcal{D}_1(\rho) = 0$, which supports a polytopic representation whose vertices are defined by A_i , \mathcal{B}_{1i} , C_{Γ_i} and C_{1i} . There is a control law of the form (24), which guarantees a suboptimal performance in \mathcal{H}_2 for the closed loop system (28), if there exist $G \in \mathfrak{R}^{n \times n}$, $X \in \mathfrak{R}^{n \times p}$, $Y \in \mathfrak{R}^{n \times p}$, $P_i = P_i^T > 0 \in \mathfrak{R}^{n \times n}$, $W \in \mathfrak{R}^{p \times p}$ such that $\text{tr}(W) < 1$ and the following LMI is satisfied*

$$\begin{bmatrix} -G - G^T & \Phi & \Upsilon \\ \star & -2P_i & 0 \\ \star & \star & -\mu\mathbb{I} \end{bmatrix} < 0, \begin{bmatrix} P_i & (C_{1i})^T \\ C_{1i} & W \end{bmatrix} > 0, \quad (29)$$

for $i = 1, \dots, l$, where $\Phi = G^T A_i + BXC_{\Gamma_i} + BYC_{\Gamma_i}A_i + P_i + G^T$ and $\Upsilon = G^T \mathcal{B}_{1i} + BYC_{\Gamma_i}\mathcal{B}_{1i}$. The feedback gains are:

$$\mathcal{K}_0 = \mathbb{M}Z^{-1}X \quad (30)$$

$$\mathcal{K}_1 = \mathbb{M}Z^{-1}Y \quad (31)$$

with $G^T B = BZ$ and $\mathbb{M}^{-1} = \mathbb{I} + Z^{-1}YC_\Gamma(\rho)B$.

Proof:

Applying clause iv) of the Lemma 1 to the closed loop system (28), matrix inequalities are obtained. After, for the matrix inequalities linearization are used the changes of variables $G^T B = BZ$ and $X = Z\mathbb{M}^{-1}\mathcal{K}_0$, $Y = Z\mathbb{M}^{-1}\mathcal{K}_1$, which generate, by substitution, the LMI (29). ■

In this case, $Z^{-1} = (B^T B)^{-1}B^T(G^T)^{-1}B$, so that the gains are obtained from the numerical solution

of the LMI and known matrices of the original system (19). Consequently, the admissibility with robust performance of the system (19), has been solved in the transformed system as a robust control problem in \mathcal{H}_2 , using extended SOF.

4.3. Design in \mathcal{H}_∞

Theorem 13. *Let the system (23) with the pair $(A(\rho), B)$ controllable, which supports a polytopic representation whose vertices are defined by A_i , \mathcal{B}_{1i} , C_{Γ_i} and C_{1i} . There is a control law of the form (24), which guarantees a suboptimal performance in \mathcal{H}_∞ for the closed loop system (28), if the following LMI is satisfied*

$$\begin{bmatrix} -G - G^T & \Phi & 0 & \Upsilon \\ \star & -2\tau P_i & (C_{1i})^T & 0 \\ \star & \star & -\mathbb{I} & \mathcal{D}_{1i} \\ \star & \star & \star & -\gamma^2\mathbb{I} \end{bmatrix} < 0, \quad (32)$$

for $i = 1, \dots, l$, where $\Phi = G^T A_i + BXC_{\Gamma_i} + BYC_{\Gamma_i}A_i + P_i + \tau G^T$ and $\Upsilon = G^T \mathcal{B}_{1i} + BYC_{\Gamma_i}\mathcal{B}_{1i}$; $G \in \mathfrak{R}^{n \times n}$, $X \in \mathfrak{R}^{n \times p}$, $Y \in \mathfrak{R}^{n \times p}$, $P_i = P_i^T > 0 \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ and $\tau \gg 1$. The feedback gains are:

$$\mathcal{K}_0 = \mathbb{M}Z^{-1}X \quad (33)$$

$$\mathcal{K}_1 = \mathbb{M}Z^{-1}Y \quad (34)$$

with $G^T B = BZ$ and $\mathbb{M}^{-1} = \mathbb{I} + Z^{-1}YC_\Gamma(\rho)B$.

Proof:

Considering the closed-loop system (28), the Lemma 2 is applied. Then, the procedure of linearization of matrix inequalities is followed by changes of variables, as has been done for the proof of the Theorem 12. ■

In order to reduce conservatism, in the characterization of the relaxed norms in $\mathcal{H}_2 - \mathcal{H}_\infty$ as LMIs, the P matrix does not necessarily have to be unique, so that the matrices $P_i = P_i^T > 0$ can be used. On the other hand, mixed performance indices in $\mathcal{H}_2 - \mathcal{H}_\infty$ can be imposed, so control synthesis, for robust admissibility and performance in closed loop, meet multiple objectives.

4.4. Design using DOF

In order to avoid the selection of $C_{\Gamma}(\rho)$, from the central value of ρ , the controller design can be followed by dynamic feedback output (DOF). In this case, a dynamic controller is proposed, such as:

$$\begin{aligned} \dot{\zeta}(t) &= \mathcal{A}_k \zeta(t) + \mathcal{B}_k y(t) \\ u(t) &= C_k \zeta(t) + \mathcal{D}_k y(t) \end{aligned} \quad (35)$$

Therefore, for system (23) and the control (35), the closed loop system is given by

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\zeta}(t) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} A(\rho) + B\mathcal{D}_k C_{\Gamma}(\rho) & B C_k \\ \mathcal{B}_k C_{\Gamma}(\rho) & \mathcal{A}_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(t) \\ \zeta(t) \end{pmatrix} + \\ &\begin{pmatrix} \mathcal{B}_1(\rho) \\ 0 \end{pmatrix} \omega(t) \\ h(t) &= C_1(\rho)x(t) + \mathcal{D}_1(\rho)\omega(t) \\ y(t) &= C_{\Gamma}(\rho)x(t) \end{aligned} \quad (36)$$

The dynamic matrix of the closed loop system is described by

$$\mathcal{A}_c = \mathfrak{A}(\rho) + \mathfrak{B}\mathfrak{R}_0\mathfrak{C}(\rho) \quad (37)$$

where

$$\begin{aligned} \mathfrak{A}(\rho) &= \begin{pmatrix} A(\rho) & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathfrak{B} = \begin{pmatrix} B & 0 \\ 0 & \mathbb{I} \end{pmatrix}, \\ \mathfrak{C}(\rho) &= \begin{pmatrix} C_{\Gamma}(\rho) & 0 \\ 0 & \mathbb{I} \end{pmatrix}, \quad \mathfrak{R}_0 = \begin{pmatrix} \mathcal{D}_k & C_k \\ \mathcal{B}_k & \mathcal{A}_k \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Thus, \mathfrak{R}_0 can be seen as design gain for a SOF control problem for the system defined by the \mathfrak{A} , \mathfrak{B} , \mathfrak{C} matrices. Consequently, Theorem 11 can be applied for robust stabilization. Theorem 12 or Theorem 13 can be used, in order to obtain the gain \mathfrak{R}_0 for robust stabilization and performance.

Corollary 14 (Robust admisibility). *Let the system (23) with the pair $(A(\rho), B)$ controllable. There is a DOF control of the form (35) that stabilizes the closed-loop system, if there exists the matrix $P = P^T > 0$, and matrices X, Z such that the following LMI is satisfied*

$$P\mathfrak{A}_i + \mathfrak{A}_i^T P + \mathfrak{B}X\mathfrak{C}_i + \mathfrak{C}_i^T X^T \mathfrak{B}^T < 0, \quad (38)$$

where $\mathfrak{A}_i, \mathfrak{C}_i, i = 1, \dots, l$, representing the polytope vertices, then the feedback gain are obtained from

$$\mathfrak{R}_0 = Z^{-1}X \quad (39)$$

with $P\mathfrak{B} = \mathfrak{B}Z$.

Corollary 15 (Robust admisibility in \mathcal{H}_2). *Let the system (23) with the pair $(A(\rho), B)$ controllable and $\mathcal{D}_1(\rho) = 0$, which supports a polytopic representation whose vertices are defined by $A_i, \mathcal{B}_{1_i}, C_{\Gamma_i}$ and C_{1_i} . There is a DOF control of the form (24), which guarantees a suboptimal performance in \mathcal{H}_2 for the closed loop system (36), if there exists $G, X, P_i = P_i^T > 0, W$ such that $\text{tr}(W) < 1$ and the following LMI is satisfied*

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} -G - G^T & \Phi & \Upsilon \\ \star & -2P_i & 0 \\ \star & \star & -\mu\mathbb{I} \end{bmatrix} < 0, \\ \begin{bmatrix} P_i & (\mathfrak{C}_{1_i})^T \\ \mathfrak{C}_{1_i} & W \end{bmatrix} > 0, \end{aligned} \quad (40)$$

for $i = 1, \dots, l$, where $\mathfrak{B}_{1_i} = \begin{pmatrix} \mathcal{B}_{1_i} \\ 0 \end{pmatrix}$, $\mathfrak{C}_{1_i} = (C_{1_i} \ 0)$, $\Phi = G^T \mathfrak{A}_i + \mathfrak{B}X\mathfrak{C}_i + P_i + G^T$ and $\Upsilon = G^T \mathfrak{B}_{1_i}$. The feedback gain is:

$$\mathfrak{R}_0 = Z^{-1}X \quad (41)$$

with $G^T \mathfrak{B} = \mathfrak{B}Z$.

Corollary 16 (Robust admisibility in \mathcal{H}_{∞}).

Let the system (23) with the pair $(A(\rho), B)$ controllable, which supports a polytopic representation whose vertices are defined by $A_i, \mathcal{B}_{1_i}, C_{\Gamma_i}$ and C_{1_i} . There is a DOF control of the form (24), which guarantees a suboptimal performance in \mathcal{H}_{∞} for the closed loop system (36), if there exists $G, X, P_i = P_i^T > 0$ such that the following LMI is satisfied

$$\begin{bmatrix} -G - G^T & \Phi & 0 & \Upsilon \\ \star & -2\tau P_i & (\mathfrak{C}_{1_i})^T & 0 \\ \star & \star & -\mathbb{I} & \mathcal{D}_{1_i} \\ \star & \star & \star & -\gamma^2 \mathbb{I} \end{bmatrix} < 0, \quad (42)$$

for $i = 1, \dots, l$, where $\mathfrak{B}_{1_i} = \begin{pmatrix} \mathcal{B}_{1_i} \\ 0 \end{pmatrix}$, $\mathfrak{C}_{1_i} = (C_{1_i} \ 0)$, $\Phi = G^T \mathfrak{A}_i + \mathfrak{B}X\mathfrak{C}_i + P_i + G^T$, $\Upsilon = G^T \mathfrak{B}_{1_i}$, and $\tau \gg 1$. The feedback gain is:

$$\mathfrak{R}_0 = Z^{-1}X \quad (43)$$

with $G^T \mathfrak{B} = \mathfrak{B}Z$.

For all cases, the matrices of the dynamic controller $\mathcal{A}_k, \mathcal{B}_k, \mathcal{C}_k, \mathcal{D}_k$, are determined from \mathfrak{R}_0 .

5. Numerical example

5.1. Parametric DS

Consider the dynamic modes of one DS described by:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \theta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -(1+\theta) & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -(1+\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} 0 \\ -2 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \omega \\ y &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (44)$$

where $\theta \in [1 \ 2]$ and $\dot{\theta} \in [-1 \ 1]$. For this case,

$$\mathbb{E}(\theta)\mathbb{E}^T(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \theta^2 \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\theta} \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

resulting the following LPV system:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -(1+\theta) & \frac{1}{\theta} \\ 1 & \frac{\theta}{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -2 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \omega \\ y &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & \frac{1}{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (45)$$

It can easily be verified that, for all $\theta, \dot{\theta}$, this system is controllable, which means that the DS can be admissible. In addition, for the stabilization, the transformed system admits an SOF control, so that Theorem 13 can be applied, only to determine the gain \mathcal{K}_0 , which is sufficient for the robust stabilization of the closed-loop LPV system. From the numerical solution of the LMI, with $\gamma = 0,0227$, is obtained:

$$G^T = \begin{bmatrix} 0,2038 & -0,2025 \\ -0,1971 & 0,2221 \end{bmatrix},$$

$$X = [-10,2933 \ 11,1305];$$

thus $Z = 0,2221$, and

$$\mathcal{K}_0 = [-46,3432 \ 50,1127].$$

The Figure 1 shows the closed-loop poles as a function of the parameter $\theta, \dot{\theta}$, which, as can be seen, are stable (see Figure 2). Consequently, the robust admissibility of the DS is guaranteed.

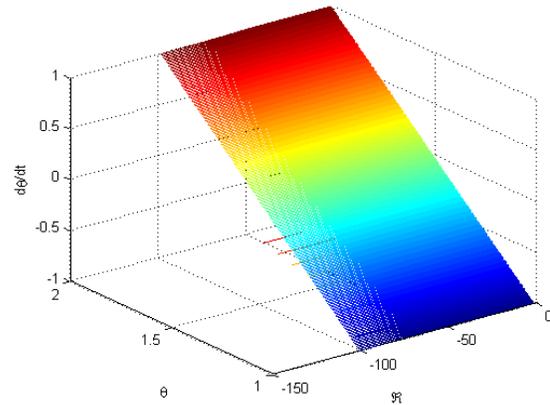


Figure 1: Distribution of closed loop poles.

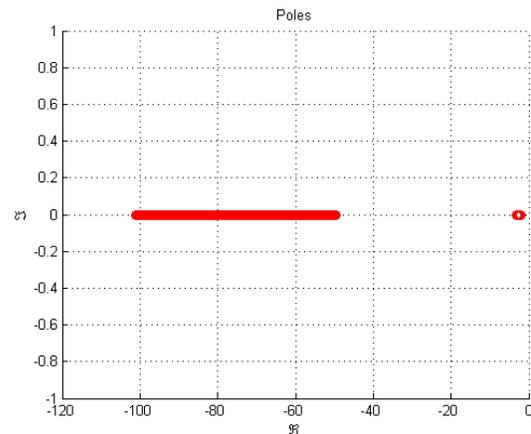


Figure 2: Distribution of projected poles of the closed loop.

To evaluate the outputs of the controlled system, the system in closed loop has been simulated with parametric variations using Matlab®-Simulink®, as is shown in the Figure 3.

Applying the robust control by SOF, which is shown in the Figure 4 and due to robust admissibility, it can be seen that the outputs converge to their steady state, such as is shown in the Figure 5, which is only affected by the perturbation $\omega(t)$, the signal that is shown in the Figure 6.

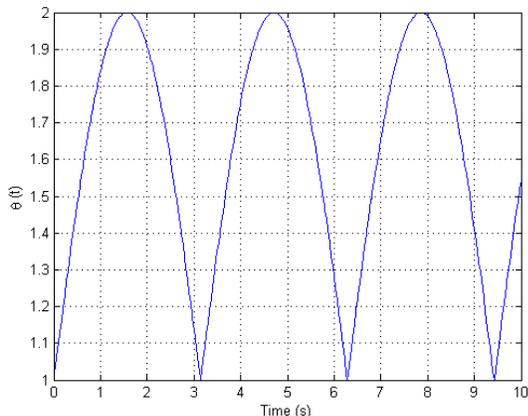


Figure 3: Parameter behavior θ .

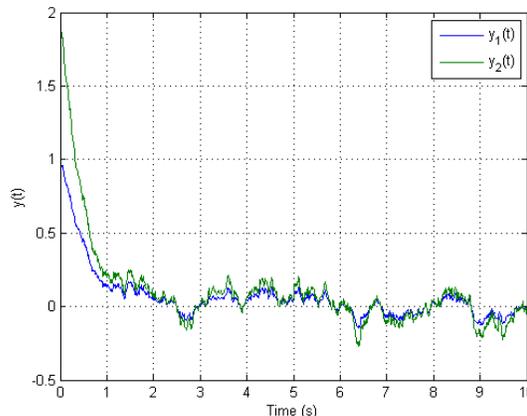


Figure 5: Temporal behavior of the controlled outputs.

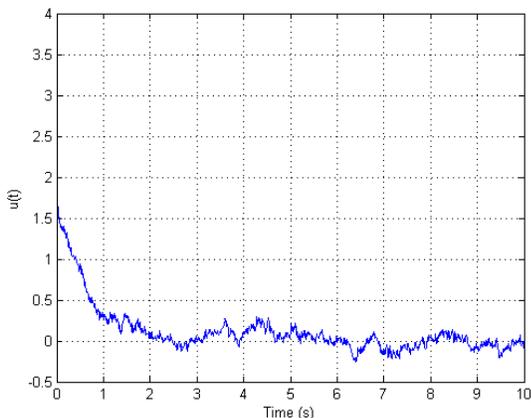


Figure 4: Control temporal behavior.

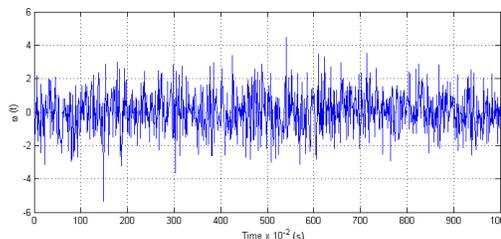


Figure 6: Temporal behavior of the disturbance signal.

5.2. Parametric square SD

Consider the system

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0,1 & 0,2 & 1 + 0,1\theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0,2 \\ -1 - \theta_2 & -1 - \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & \theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix}$$

where $\theta_1 \in [0 \ 1]$, $\theta_2 \in [0,25 \ 1]$, $\theta_3 \in [0 \ 0,5]$. This system has zero index. Then, for all θ_i , it is regular and impulse free, but is not admissible. Although

the matrix \mathbb{E} is uncertain, there are two aspects that allow to apply the design technique that has been developed:

1. For all θ_1 , the matrix \mathbb{E} is non-singular (zero index).
2. The matrix of the measured outputs is of complete order, so that the system supports a classic SOF control.

Thus, the transformation linear is $\Gamma = \mathbb{E}^{-1}$, that is

$$\Gamma(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{-1}{\theta_1+10} & \frac{-2}{\theta_1+10} & \frac{10}{\theta_1+10} \end{bmatrix}$$

Accordingly, the transformed system corresponds to following LPV system:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{5(\theta_1+10)} & 1 - \frac{2}{5(\theta_1+10)} & \frac{2}{\theta_1+10} \\ -\theta_2 - 1 & -\theta_1 - 1 & 0 \\ \frac{-\theta_3}{\theta_1+10} & \frac{-2\theta_3}{\theta_1+10} & \frac{10\theta_3}{\theta_1+10} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 - \frac{1}{\theta_1+10} & -\frac{2}{\theta_1+10} & \frac{10}{\theta_1+10} \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 - \frac{1}{\theta_1+10} & 1 - \frac{2}{\theta_1+10} & \frac{10}{\theta_1+10} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$

The admissibility problem can be solved by stabilizing of transformed LPV system applying the Theorem 11, with $u = \mathcal{K}_0 y$. In effect, the following matrices are obtained:

$$P = \begin{bmatrix} 47,2127 & 6,8250 & 13,3801 \\ 6,8250 & 12,6129 & -2,7575 \\ 13,3801 & -2,7575 & 10,8275 \end{bmatrix},$$

$$X = \begin{bmatrix} -11,8221 & 0,3080 & -6,3564 \end{bmatrix},$$

$$Z = 8,9627,$$

then

$$\mathcal{K}_0 = [-1,3190 \quad 0,0344 \quad -0,7092].$$

In order to verify the robust admissibility, Figure 7 shows the location of the poles in closed loop based on the variations of the parameters θ_i , for $i = 1, 2, 3$.

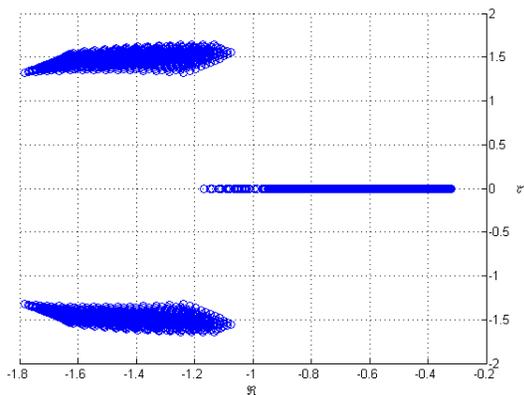


Figure 7: Distribution of the poles for the system in closed loop.

6. Concluding remarks

From the results obtained in this research, the contributions are focused on the analysis and synthesis of controllers for a class of linear descriptor systems dependent on parameters. First, a model of linear descriptor systems with variable parameters has been considered, which consider uncertainties in the descriptor matrix. Then, an analysis of admissibility and robust control for a class of descriptor systems with polytopic

parametric uncertainties has been presented. The class is defined by those processes where there is a linear injective application that allows to transform the parameter-dependent descriptor system to a regular LPV system. Thus, the properties and conditions of the original system are conserved in the transformed system, which guarantees the design of a control for the robust admissibility (stability) and the robust performance. The design of the control in the transformed system is a guarantee of satisfying the robust admissibility and performance for the original descriptor system. The synthesis of the control law has been done by means of the static feedback of the extended output, which is based on obtaining a feedback gain for the output and a feedback gain for its derivative. A design technique based on dynamic output feedback has been also proposed, where the dynamic controller is obtained from a static output feedback control problem. The gains are derived by robust stabilizing and robust performance of LPV systems, using the characterizations of the \mathcal{H}_2 - \mathcal{H}_∞ norms as LMIs, which arise from parameter dependent Lyapunov functions. The design technique also allows to impose multi-objective specifications. The theoretical results have been evaluated through simulations.

Acknowledgements

The research was funded by the CDCHTA-ULA under grant project I-1302-12-02-B, for which is gratefully acknowledged this support.

References

- [1] D. G. Luenberger. Dynamic equations in descriptor form. *IEEE Trans. Automat. Control*, 22(3):312–321, 1977.
- [2] Jeff S. Shamma. *Control of Linear Parameter Varying Systems with Applications*, chapter An Overview of LPV Systems, pages 3–26. Springer, 2012.
- [3] Guang-Ren Duan and Hai-Hau Yu. *LMIs in Control Systems: Analysis, Design and Applications*. CRC Press, Center for Control Theory and Guidance Technology, China, 2013.
- [4] Corentin Briat. *Robust control and observation of LPV time-delay systems*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2008.

- [5] K. M. Hangos, J. Bokor, and G. Szederkényi. *Analysis and Control of Nonlinear Process Systems*. Springer, London, 2004.
- [6] H-S Wang, C-F Yung, and F-R Chang. Bounded real lemma and H_∞ control for descriptor systems. *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 145(3):316–322, 1998.
- [7] Elizabeth Yip and Richard Sincovec. Solvability, controllability, and observability of continuous descriptor systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 26(3):702–707, 1981.
- [8] Guang Ren Duan. *Analysis and Design of Descriptor Linear Systems*. Springer, New York, 2010.
- [9] Gabriela Iuliana Bara. Robust analysis and control of parameter-dependent uncertain descriptor systems. *Systems & Control Letters*, 60(5):356–364, 2011.
- [10] M Chaabane, F Tadeo, D Mehdi, and M Souissi. Robust admissibilization of descriptor systems by static output-feedback: an LMI approach. *Mathematical Problems in Engineering*, 2011(1):1–10, 2011.
- [11] C.P. Wei. On applications of the projection lemma to analysis and design of continuous-time systems. Master Thesis, National Sun Yat-Set University, 2003.
- [12] Goele Pipeleersa, Bram Demeulenaere, Jan Swevers, and Lieven Vandenbergh. Extended LMI characterizations for stability and performance of linear systems. *Systems & Control Letters*, 58(7):510–518, July 2009.
- [13] P. Apkarian, H.D. Tuan, and J. Bernussou. Continuous-time analysis, eigenstructure assignment, and \mathcal{H}_2 synthesis with enhanced linear matrix inequalities (LMI) characterizations. *IEEE Trans. on Autom. Control*, 46(12):1941–1946, 2001.
- [14] M.C. Oliveira, J. Bernussou, and J.C. Geromel. A new discrete-time robust stability condition. *Systems & Control Letters*, 37:261–265, 1999.
- [15] Philip Losse, Volker Mehrmann, Lisa Katrin Poppe, and Timo Reis. Robust control of descriptor systems. Technical report, Institut für Mathematik, TU Berlin, 2007.
- [16] Thomas Berger and Timo Reis. Controllability of linear differential-algebraic systems - a survey. Technical report, Institut für Mathematik, Technische Universität Ilmenau, Germany, 2009.
- [17] J Klamka. Controllability of dynamical systems. a survey. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 61(2):335–342, 2013.
- [18] Hugo Levia, Addison Ríos Bolívar, Ambrosio Tineo Moya y Miguel Narvaez. Análisis de la controlabilidad de sistemas descriptores semi-lineales analysis of the controllability of semilinear descriptor systems. *Ciencia e Ingeniería*, 38(2):187–196, 2017.
- [19] Volker Mehrmann and Tatjana Stykel. Descriptor systems: A general mathematical framework for modelling, simulation and control. Technical report, Institut für Mathematik, Technische Universität Berlin, Germany, 2006.
- [20] F. Bruzelius, S. Pettersson, and C. Breitholtz. Linear parameter-varying descriptions of nonlinear systems. In *Proc. American Control Conf.*, pages 1374–1379, Boston, Massachusetts, 2004. ACC.
- [21] Gary J. Balas, Jozsef Bokor, and Zoltán Szabó. Invariant subspaces for lqv systems and their applications. *IEEE Trans. Automat. Control*, 48:2065–2069, 2003.
- [22] Addison Ríos-Bolívar. *Control de Sistemas Lineales: Realimentando la salida*. Editorial Académica Española, Alemania, 2014.
- [23] F. Bruzelius. *Linear Parameter-Varying Systems: an approach to gain scheduling*. PhD thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2004.
- [24] A. Ríos, F. Hidrobo y J. Suárez. Control robusto por realimentación estática de la salida extendida. *Revista Técnica de Ingeniería*, 34(3):255–262, 2011.
- [25] Mohammed Chadli, Mohamed Darouach, and Jamal Daafouz. Static output stabilisation of singular LPV systems: LMI formulation. In *CDC*, pages 4793–4796, 2008.
- [26] Anis Bouali, Mohamed Yagoubi, and Philippe Chevrel. Gain scheduled observer state feedback controller for rational LPV systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2):4922–4927, 2008.
- [27] Mohammed Chadli, Jamal Daafouz, and Mohamed Darouach. Stabilisation of singular LPV systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2):9999–10002, 2008.
- [28] Izumi Masubuchi, Tomoaki Akiyama, and Masami Saeki. Synthesis of output feedback gain-scheduling controllers based on descriptor LPV system representation. In *Decision and Control, 2003. Proceedings. 42nd IEEE Conference on*, volume 6, pages 6115–6120. IEEE, 2003.
- [29] Izumi Masubuchi. Output feedback controller synthesis for descriptor systems satisfying closed-loop dissipativity. *Automatica*, 43(2):339–345, 2007.
- [30] Ilhan Polat, Esref Eskinat, and IE Kose. Dynamic output feedback control of quasi-LPV mechanical systems. *IET Control Theory & Applications*, 1(4):1114–1121, 2007.

Synthesis and characterization of tertiary hydrotalcites and their oxides: $Me^{2+} Fe^{3+} Al^{3+}$ ($Me^{2+} = Co^{2+}, Mg^{2+}, Ni^{2+}$ o Zn^{2+})

Edwin Oviedo^{*a}, Philippe Ayrault^b, Sylvette Brunet^b, Carlos Linares^a

^a*Departamento de Química, Unidad de Síntesis de Materiales y Metales de Transición, Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología, Universidad de Carabobo, Venezuela*

^b*IC2MP UMR CNRS 7285 40, Université de Poitiers, 86022, Poitiers, France.*

Abstract.-

Eleven (11) hydrotalcites were synthesized with Fe^{3+}/Al^{3+} variable amounts, and varying the divalent cation: Co^{2+} , Mg^{2+} , Ni^{2+} or Zn^{2+} using the co-precipitation method in an alkaline medium at 60 °C for 24 h. A selected sample of each divalent cation series was calcined. As-synthesized and calcined samples were characterized by usual techniques: Fourier-transformed infrared spectroscopy (FT-IR), X-ray diffraction (XRD), and surface textural measurements such as: BET surface area, and pore diameter and volume. Results show that the divalent cation has an important role in unity cell parameters of as-synthesized hydrotalcites, while the Fe^{3+}/Al^{3+} ratio did not show a high impact in the unity cell parameters. On the other hand, a relation between surface parameters, divalent cation nature or Fe^{3+}/Al^{3+} ratio from as-synthesized hydrotalcites and their oxides was not found.

Keywords: tertiary hydrotalcites; characterization; mixed oxides.

Síntesis y caracterización de hidrotalcitas terciarias y sus óxidos: $Me^{2+} Fe^{3+} Al^{3+}$ ($Me^{2+} = Co^{2+}, Mg^{2+}, Ni^{2+}$ o Zn^{2+})

Resumen.-

Se sintetizaron once (11) hidrotalcitas con contenido variable Fe^{3+}/Al^{3+} , y variando el catión divalente: Co^{2+} , Mg^{2+} , Ni^{2+} o Zn^{2+} usando el método de coprecipitación en medio alcalino a 60 °C por 24 h. Una muestra de cada serie del catión divalente fue calcinada. Las muestras sintetizadas y calcinadas fueron caracterizadas por las técnicas usuales de espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR), difracción de rayos X (DRX), y medidas texturales de superficies, tales como: área específica por el método de BET, y diámetro y volumen de poro. Los resultados más importantes señalan que el catión divalente tiene gran influencia en los parámetros de la celda unidad de las hidrotalcitas sintetizadas mientras que la relación variable Fe^{3+}/Al^{3+} no generó gran impacto en estos parámetros. Por otro lado, no se encontró una relación directa entre las propiedades texturales de las hidrotalcitas obtenidas o sus óxidos con la naturaleza del metal divalente o la relación Fe^{3+}/Al^{3+} utilizada.

Palabras clave: hidrotalcitas terciarias; caracterización; óxidos mixtos.

Recibido: noviembre 2017

Aceptado: diciembre 2017

1. Introducción

Las hidrotalcitas o hidróxidos laminares dobles (HLD), como también son conocidas, pertenecen

a la familia de materiales de fórmula genérica: $[M^{2+}_{1-x}M^{3+}_x(OH)_2]^{x+}[A^{n-}_{x/n} \cdot y H_2O]^{x-}$; donde M^{2+} y M^{3+} son iones catiónicos diva y trivalentes, y A^{n-} es un anión de estado de oxidación n^- [1]. Las hidrotalcitas derivan de la estructura de la brucita, $Mg(OH)_2$, donde el Mg^{2+} octaédrico (hexa-coordinado a grupos hidroxilos) comparte sus lados con otras moléculas de $Mg(OH)_2$ formando capas infinitas. Estas capas poliméricas

*Autor para correspondencia

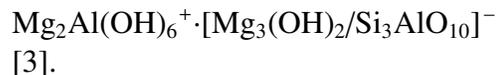
Correo-e: ejoviedo@uc.edu.ve (Edwin Oviedo)

de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ se mantienen unidas por encima y por debajo a otras capas poliméricas de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ mediante puentes de hidrógeno. Cuando una parte de estos cationes Mg^{2+} es sustituida por algún catión trivalente de radio similar al Mg^{2+} , por ejemplo el Al^{3+} , se genera una carga positiva que debe ser compensada por algún anión. La incorporación del anión entre las capas antes mencionadas, genera la estructura de la hidrotalcita [2]. En este tipo de sistema puede ocurrir la sustitución isomorfa de otros pares catiónicos y/u otros aniones en la intercapa x es la fracción de sitios catiónicos ocupados por cationes trivalentes $[(\text{M}^{3+}/(\text{M}^{3+}+\text{M}^{2+}))]$, y es bien conocido que el intervalo de x permitido para la formación de las estructuras tipo hidrotalcita está entre: 0,2 ($\text{M}^{2+}/\text{M}^{3+}= 4$) y 0,33 ($\text{M}^{2+}/\text{M}^{3+}= 2$) [2]. Por otra parte, y representa el número de moléculas de agua presente entre las capas aniónicas.

La versatilidad en la síntesis de este tipo de materiales es infinita [3]. Es posible que el catión Mg^{2+} pueda ser sustituido por algunos cationes de radios similares tales como: Cu^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{2+} y Mn^{2+} . En el caso de los cationes: Be^{2+} y Ca^{2+} , éstos son muy pequeños y muy grande respectivamente, y no conllevan a la formación de la estructura. El ion Al^{3+} , también puede ser sustituido por algunos cationes con intervalo de tamaño entre 0,5 y 0,8 Å, con excepción del V^{3+} y el Ti^{3+} , los cuales son inestables en aire. Así, tenemos que: Ga^{3+} , Ni^{3+} , Co^{3+} , Fe^{3+} , Mn^{3+} , Cr^{3+} e In^{3+} pueden conducir a la formación de las HLD.

Con la misma variedad de cationes que acompañan a las hidrotalcitas; los aniones también pueden ser muy diversos y prácticamente no se encuentran limitaciones. Dentro de los posibles aniones están:

- Los aniones inorgánicos (Cl^- , F^- , Br^- , I^- , NO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , ClO_4^- y otros).
- Los ácidos orgánicos (adípico, succínico, oxálico, malónico y otros).
- Los hetero poliácidos: $(\text{PMo}_{12}\text{O}_{40})^{3-}$, $(\text{PW}_{12}\text{O}_{40})^{3-}$ y otros.
- Los compuestos laminares, como en el mineral siguiente



El número, tamaño, orientación, y fuerza entre los enlaces del anión y de los grupos hidroxilos de las capas tipo brucita determina el espesor de las intercapas.

Luego, no solamente son conocidas las HLD binarias, con presencia única de dos cationes: uno divalente y otro trivalente, sino que también existe la posibilidad de encontrar hidrotalcitas terciarias y cuaternarias con mezclas de tres o cuatro cationes divalentes y trivalentes. En todo caso, la formación de las HLD dependerá que se respete el valor de x correspondiente ($0,2 < x < 0,33$), como se mencionó anteriormente, x es la fracción de sitios catiónicos ocupados por los cationes trivalentes.

La calcinación de estas muestras de hidrotalcitas, conlleva a propiedades muy interesantes según la temperatura de calcinación. Dentro de las características presentes en los óxidos mixtos formados durante la calcinación, se cuenta con: aumento de la superficie, dispersión homogénea de sus elementos, efecto sinérgico entre los elementos que conforman la hidrotalcita y el efecto memoria, capaz de reconstruir la hidrotalcita de partida a partir de sus óxidos en condiciones medias de reacción y en presencia de soluciones acuosas con algún anión presente [4].

En este trabajo, se sintetizaron y caracterizaron, cuatro series de tipo de hidrotalcitas terciarias conteniendo los cationes trivalentes invariables: Al^{3+} y Fe^{3+} , y variando el catión divalente: Mg^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} o Zn^{2+} . La relación $\text{Fe}^{3+}/\text{Al}^{3+}$ fue variada en tres relaciones diferentes para cada serie; lo que conllevó a un total de once hidrotalcitas sintetizadas. También se calcinó una muestra representativa de cada serie de hidrotalcitas con el fin de determinar cómo varían las propiedades específicas de las mismas con la calcinación. La selección de los metales escogidos para este estudio tuvo que ver con sus amplias y diversas aplicaciones [4, 5]. Las hidrotalcitas y sus óxidos fueron caracterizados por las técnicas comunes de difracción de rayos X (DRX), espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR) y

medidas texturales de superficie (área específica BET, diámetro y volumen de poro).

2. Desarrollo experimental de la investigación

2.1. Síntesis de las hidrotalcitas terciarias y sus óxidos

Se sintetizaron cuatro series de hidrotalcitas terciarias conteniendo los cationes trivalentes Al^{3+} y Fe^{3+} , y variando el catión divalente: Mg^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} o Zn^{2+} . Para cada una de las series se variaron las relaciones atómicas molares $\text{Fe}^{3+}/\text{Al}^{3+}$ (Tabla 1).

Tabla 1: Parámetros de síntesis de las hidrotalcitas terciarias Fe^{3+} , Al^{3+} y (Co^{2+} , Ni^{2+} , Mg^{2+} o Zn^{2+}) sintetizadas y sus óxidos. Condiciones de reacción: temperatura y presión ambiente, 24 h de reacción.

Hidrotalcita terciaria	Moles Al^{3+}	Moles Fe^{3+}	Moles Me^{2+}	Color hidrotalcita	Color óxido mixto
MgFeAl (0,16)	0,15	0,0240	0,617	Marrón	Marrón
MgFeAl (0,32)	0,16	0,0512	0,749	Marrón	Marrón
CoFeAl (0,21)	0,17	0,0357	0,729	Púrpura	Negro
CoFeAl (0,42)	0,14	0,0588	0,704	Púrpura	Negro
CoFeAl (0,50)	0,15	0,0750	0,798	Púrpura	Negro
NiFeAl (0,33)	0,18	0,0594	0,849	Verde	Negro
NiFeAl (0,54)	0,17	0,0918	0,928	Verde	Negro
NiFeAl (0,85)	0,16	0,1360	0,985	Verde	Negro
ZnFeAl (0,10)	0,16	0,0160	0,624	Beige	Beige
ZnFeAl (0,20)	0,16	0,0320	0,681	Beige	Beige
ZnFeAl (0,48)	0,15	0,0720	0,787	Beige	Beige

Los valores entre paréntesis se refieren a la relación $\text{Fe}^{3+}/\text{Al}^{3+}$.
 Me^{2+} : Mg^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} o Zn^{2+}

Las reacciones de co-precipitación se realizaron bajo agitación continua, a temperatura y presión ambiente, usando dos soluciones: la primera solución estuvo constituida por las mezclas catiónicas de los metales di y trivalente disolviendo las cantidades adecuadas (Tabla 1) de: $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (Riedel-de Haên, 98 %) y $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (Riedel-de Haên, 98 %), y

$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Riedel de Haen, 97 %) o $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (BDH Chemical Ltd, 97 %) o $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Riedel-de Haên, 97 %) o $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Riedel-de Haên, 97 %) en 250 mL de agua destilada con el fin de obtener una concentración catiónica con una relación $\text{M}^{2+}/\text{M}^{3+} = 3,55$ ($\text{M}^{3+}/(\text{M}^{3+} + \text{M}^{2+}) = 0,22$). La segunda solución fue preparada disolviendo hidróxido de sodio (0,04 moles, Loba Chemie, 98 %) y carbonato de sodio (0,02 moles, Riedel de Haen 99,5 %) en 250 mL de manera de lograr la precipitación de los metales. Una solución de hidróxido de sodio se usó para mantener un pH aproximado de 11 durante toda la co-precipitación [6]. La primera solución fue lentamente adicionada sobre la segunda bajo agitación constante, presión atmosférica y temperatura ambiente. Después de la adición total de la primera solución sobre la segunda, el precipitado formado se dejó agitando a temperatura ambiente por 24 h [7].

Pasado el tiempo de añejamiento, los sólidos obtenidos se filtraron, se lavaron con suficiente agua destilada hasta alcanzar un pH aproximado de 7 y se secaron a 60 °C por 24 h. Dependiendo de los metales usados, la coloración de las hidrotalcitas obtenidas fue diferente (Tabla 1).

Luego, una muestra seleccionada de cada serie fue calcinada en crisoles de porcelana abiertos en una mufla (Barnstead Thermolyne 6000 furnace) operando en atmósfera de aire usando una rampa de calentamiento de 5 °C min^{-1} desde temperatura ambiente hasta 700 °C [7]. Durante la calcinación de las mismas, la coloración inicial de las muestras fue notablemente cambiada (Tabla 1).

2.2. Caracterización de las hidrotalcitas y sus óxidos

Las hidrotalcitas terciarias sintetizadas y las muestras de óxidos seleccionados de cada serie fueron caracterizados por diferentes técnicas físico-químicas tales como: espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR), difracción de rayos (DRX), y medidas de texturales de superficie (área específica, volumen y diámetro de poro).

Para los análisis de espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR), las muestras de hidrotalcitas y sus óxidos fueron previamente mezcladas en un mortero de ágata con KBr, en proporción en peso 1:3 (muestra:KBr) para la formación de una fina pastilla. Dicha pastilla fue colocada en un portamuestra adecuado y analizada en un equipo de infrarrojo con transformada de Fourier Perkin Elmer modelo A Analyst 200 FT-IR. El análisis fue llevado en un intervalo comprendido entre 500 y 4000 cm^{-1} .

Los análisis de difracción de rayos X de polvo fueron hechos en un equipo Phillips PW3442 en el intervalo comprendido entre 5 a 80° $2(\theta)$ a una longitud de onda $\text{CuK}(\alpha)$ 1,54060. Las muestras, finamente divididas, fueron colocadas en un portamuestra adecuado para su posterior análisis bajo los rayos X provenientes del tubo de cobre. La identificación de las fases correspondientes se hizo mediante la comparación de los datos obtenidos con los archivos PDF del software X Powder12.

Se empleó un sistema de adsorción de gas TRIS-TAR 3000, adsorción-desorción de nitrógeno, usando nitrógeno líquido a -196 °C para determinar las medidas texturales de superficie de las hidrotalcitas y sus óxidos. Las muestras fueron previamente desgasificadas bajo un vacío secundario durante 12 h a 250 °C. La ecuación BET se utilizó para calcular el área superficial (m^2/g) de las muestras a presiones relativas entre 0,05 y 0,25.

3. Análisis y Discusión de Resultados

3.1. Espectros de FT-IR

En las Figuras 1, 2, 3 y 4 se muestran los espectros de FT-IR de las hidrotalcitas sintetizadas y sus óxidos mixtos obtenidos por calcinación. En general, los espectros de FT-IR no son una herramienta diagnóstica para las hidrotalcitas, pero éstos pueden ser usados para identificar la presencia de aniones en las intercapas de la brucita o la formación de óxidos correspondientes. En el caso, de las hidrotalcitas, todas ellas presentaron espectros muy similares.

Una banda ancha ubicada entre 3700 y 3200 cm^{-1} con un máximo alrededor de 3400 cm^{-1}

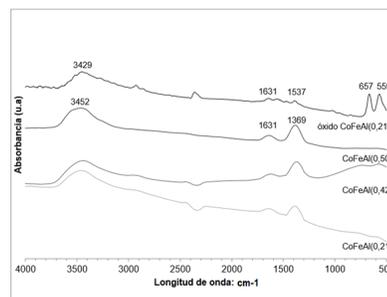


Figura 1: Espectros de infrarrojo (FT-IR) de las hidrotalcitas sintetizadas del tipo CoFeAl y de un óxido CoFeAl seleccionado.

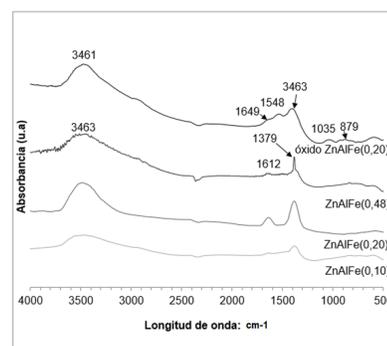


Figura 2: Espectros de infrarrojo (FT-IR) de las hidrotalcitas sintetizadas del tipo ZnFeAl y de un óxido ZnFeAl seleccionado.

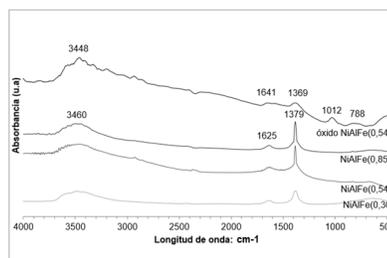


Figura 3: Espectros de infrarrojo (FT-IR) de las hidrotalcitas sintetizadas del tipo NiFeAl y de un óxido NiFeAl seleccionado.

se debe a las vibraciones de estiramiento de los grupos hidroxilos asignados a las capas de la brucita y a moléculas de agua localizadas en el espacio interlamilar. El hombro entre 3000 y 3100 cm^{-1} es atribuido a las interacciones entre los aniones carbonatos y las moléculas de agua entre las láminas de la hidrotalcita ($\text{HOH}-\text{CO}_3$). Todos los espectros señalan una banda entre 1630 cm^{-1} la cual ha sido relacionada con la deformación angular de las moléculas de agua

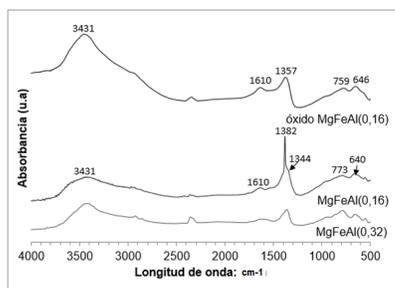


Figura 4: Espectros de infrarrojo (FT-IR) de las hidrotalcitas sintetizadas del tipo MgFeAl y de un óxido MgFeAl seleccionado.

adsorbidas en los sólidos. La banda a 1750 cm^{-1} se debe a moléculas de agua entre las capas de la hidrotalcita; mientras que la señal cerca de 1380 cm^{-1} es atribuida a las vibraciones de estiramiento de las moléculas de carbonato. Esta señal está ligeramente desplazada a bajas frecuencias cuando existe un mayor contenido de aluminio y de carbonato. Esta banda también alrededor de 1380 cm^{-1} podría estar solapada con bandas correspondientes a los iones nitratos que de igual forma se incorporan en las láminas de la hidrotalcita junto con los iones carbonatos [8]. Estos iones nitratos proceden de los reactivos usados durante la síntesis de estos materiales.

Las bandas por debajo de 783 cm^{-1} son adjudicadas a enlaces vibracionales metal-oxígeno o metal-metal-oxígeno en las capas de la brucita [9, 10].

Para las muestras calcinadas (Figuras 1, 2, 3 y 4), los espectros lucen diferentes de las muestras de hidrotalcita original. En la mayoría de los casos, las bandas correspondientes al agua (alrededor de 3400 y 1631 cm^{-1}) permanecen. De igual manera, las bandas correspondientes a los iones carbonato y nitrato (alrededor de los 1370 cm^{-1}) tienden a desaparecer. Estos cambios son originados por la calcinación, proceso donde los grupos hidroxilos son deshidratados, los aniones nitrato y carbonato son expulsados de las láminas de la hidrotalcita y ocurre el colapso del material. En algunos casos, estas bandas permanecen, y son el producto del “efecto memoria”, proceso donde se recupera la estructura inicial de la hidrotalcita [4].

Las bandas intensas y menores a 1012 cm^{-1} son producto de la formación de enlaces metal-

oxígeno durante la calcinación de la muestra [7].

3.2. Difractogramas de rayos X

De acuerdo a los resultados observados en los difractogramas de rayos X de las Figuras 5, 6, 7 y 8, los patrones de difracción, son en general, muy parecidos entre ellos. En todo caso se pueden observar picos agudos y simétricos correspondientes a los planos: (003), (006), (110) y (113), acompañados con picos más anchos y asimétricos en los planos (009) y (015) respectivamente. Estos picos corresponden con la fase de arcillas con estructura laminar (PDF- 22700). Estos picos no son iguales ni en intensidad ni en ancho, lo cual sugiere diferentes tipos de cristalinidad. En algunos casos, junto con esta fase de hidrotalcita, aparecen otros picos correspondientes a nitrato de sodio (PDF-851461). La presencia de esta fase, resiste, en algunos casos, a los lavados exhaustivos durante la filtración del sólido.

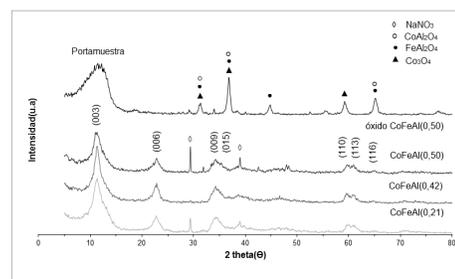


Figura 5: Difractograma de rayos X de las hidrotalcitas sintetizadas del tipo CoFeAl y de un óxido CoFeAl seleccionado.

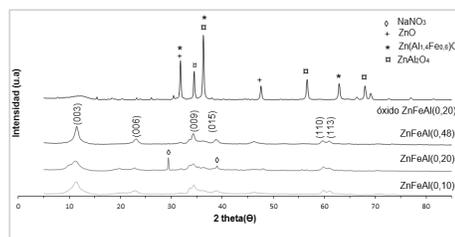


Figura 6: Difractograma de rayos X de las hidrotalcitas sintetizadas del tipo ZnFeAl y de un óxido ZnFeAl seleccionado.

Un análisis en profundidad de estos difractogramas debe hacerse en función del contenido de los metales trivalentes (Fe^{3+} y Al^{3+}), y la naturaleza

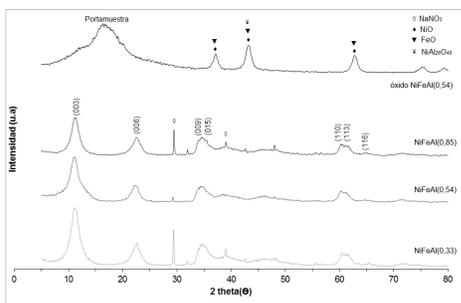


Figura 7: Difractograma de rayos X de las hidrotalcitas sintetizadas del tipo NiFeAl y de un óxido NiFeAl seleccionado.

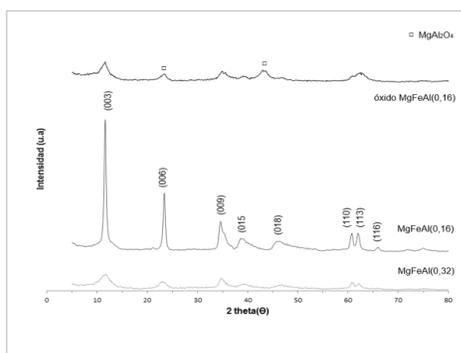


Figura 8: Difractograma de rayos X de las hidrotalcitas sintetizadas del tipo MgFeAl y de un óxido MgFeAl seleccionado.

del radio iónico de los metales tri y divalentes respectivamente. Así, se tiene el siguiente orden decreciente del radio atómico cristalino en función del catión: $Co^{2+}(88,5) > Zn^{2+}(88) > Mg^{2+}(86) > Ni^{2+}(83) > Fe^{3+}(69) > Al^{3+}(67)$ pm [11]. La relación atómica $[M^{3+}/(M^{3+}+M^{2+})]$ se mantuvo constante en 0,22 durante todas las síntesis, por lo tanto los desplazamientos y anchos de los picos se ven poco afectados por este parámetro; inclusive cuando se varía la relación Fe^{3+}/Al^{3+} también se varía, en igual proporción, la concentración del metal divalente originado que se mantenga la relación $[M^{3+}/(M^{3+}+M^{2+})]$ antes mencionada. Mayor importancia tiene la diferencia entre el radio atómico del catión divalente: Zn^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} y Mg^{2+} , y el catión trivalente: Fe^{3+} y Al^{3+} . Por lo tanto, mayores diferencias en las intensidades de los picos debería encontrarse entre las hidrotalcitas que contienen Mg^{2+} y aquellas hidrotalcitas que contienen Zn^{2+} , Co^{2+} o Ni^{2+} en su estructura. La inserción de Zn^{2+} , Co^{2+} o Ni^{2+} , de radio atómico

diferente al Mg^{2+} propician la distorsión de la red de la hidrotalcita inducida por la sustitución del Mg^{2+} por cationes de mayor o menor tamaño, de allí la diferencia en las intensidades de los difractogramas de DRX entre los cationes Zn^{2+} , Co^{2+} o Ni^{2+} y Mg^{2+} .

Los cálculos de los parámetros de la unidad de celda se realizaron por los picos indexados en el sistema cristalino hexagonal considerando un polimorfismo 3R [12].

Por otro lado, haciendo uso de la información que aportó los difractogramas de las hidrotalcitas, se determinó los parámetros de red de celda del cristal, así como su tamaño de cristal (Tabla 2).

Tabla 2: Parámetros de celda de las hidrotalcitas terciarias sintetizadas: Fe^{3+} , Al^{3+} y (Co^{2+} , Ni^{2+} , Mg^{2+} o Zn^{2+}).

Hidrotalcita terciaria	a (Å)	c (Å)	c' (Å)	λ (Å)
MgFeAl(0,16)	3,05	22,87	7,62	20
MgFeAl(0,32)	3,04	22,46	7,49	4
CoFeAl(0,21)	3,09	23,35	7,78	5
CoFeAl(0,42)	3,08	23,45	7,82	8
CoFeAl(0,50)	3,08	23,39	7,8	7
ZnFeAl(0,10)	3,08	23,22	7,74	6
ZnFeAl(0,20)	3,08	23,45	7,82	4
ZnFeAl(0,48)	3,09	23,17	7,72	11
NiFeAl(0,30)	3,06	24,17	8,06	5
NiFeAl(0,54)	3,06	24,17	8,06	5
NiFeAl(0,85)	3,06	23,2	7,73	5

λ: tamaño de cristal.

El parámetro *a* representa la distancia entre dos cationes adyacentes (di o trivalente) en las capas de la hidrotalcita [13, 14]. Este valor fue calculado del plano (110) que corresponde al primer pico del doblete cercano a $2\theta=60^\circ$. Para ello se utilizó la siguiente fórmula:

$$a = 2d_{110} \text{ en } \text{Å}$$

El parámetro *c* representa la distancia entre las láminas de la brucita, es una consecuencia del contenido de agua, del tamaño, orientación y carga del anión [13, 14]. Su valor viene determinado por la distancia interplanar del pico d_{003} usando la siguiente fórmula:

$$c = 3d_{003} \text{ en } \text{Å}$$

El parámetro c' se refiere al espesor total de las capas de las capas tipo brucita y la distancia entre capas [13, 14, 15], así:

$$c' = c/3 \text{ en } \text{Å}$$

El parámetro a puede ser examinado como la sustitución de iones Mg^{2+} por Zn^{2+} , Co^{2+} o Ni^{2+} en la red cristalina de la hidrotalcita. El parámetro a para la hidrotalcita MgFeAl fue de 3,05 Å, el cual es cercano al reportado por Valente *et al.*, [16] (3,076 Å). La incorporación de cationes de mayor radio atómico que el Mg^{2+} , como el Co^{2+} o el Zn^{2+} originan mayores cambios en el parámetro a (3,08 Å para la hidrotalcita de cobalto y 3,09 Å para la hidrotalcita de cinc); en cambio un radio iónico más pequeño como el Ni^{2+} , de tamaño comparable al ion Mg^{2+} , genera pocos cambios en el parámetro a (3,06 Å para la hidrotalcita de Ni^{2+}). Las variaciones molares del catión divalente en la hidrotalcita $\text{Fe}^{3+}/\text{Al}^{3+}$ no perturban en gran medida el parámetro a .

Por su parte, los parámetros c y c' relacionados con las distancias entre las láminas de la brucita están íntimamente acorde con el anión entre las láminas. Los parámetros c de las hidrotalcitas de cobalto, níquel y cinc presentan valores cercanos a los 23 Å, los cuales se encuentran alejados de los valores reportados para el anión carbonato (22,95 Å) o el ion nitrato (26,37Å) [3]. Así que las hidrotalcitas de cobalto, níquel y cinc podrían tener una mezcla de ambos aniones entre sus capas, lo cual es muy posible por el ancho de la banda observada en los FT-IR. Para las hidrotalcitas de magnesio, el anión podría ser el ion carbonato acorde con los valores obtenidos.

Por otra parte, los valores del tamaño de cristal determinados para la orientación c (d_{003}) para las hidrotalcitas de Co, Zn y Ni estuvieron comprendidos entre 5 y 11 nm, que son valores propios para este tipo de sólidos. En el caso de las hidrotalcitas de Mg el valor determinado de cristal fue de unos 20 nm y 4 nm, lo que da cuenta de la alta cristalinidad.

De igual manera, también se estudió por DRX, la calcinación de muestras seleccionadas de las hidrotalcitas sintetizadas (Figuras 5, 6, 7 y 8).

Para que la estructura de la hidrotalcita permanezca estable, la relación $\text{M}^{2+}/\text{M}^{3+}$ debe ser superior a 1:1. Durante la calcinación de las hidrotalcitas, se remueven gran cantidad de aniones volátiles tales como el carbonato o el nitrato, conllevando a la formación de óxidos usualmente del tipo M^{2+}O y la formación de espinelas del tipo $\text{M}^{2+}\text{M}^{3+}_2\text{O}_4$. Obviamente la naturaleza del metal y la temperatura de calcinación tienen gran influencia en la formación de las espinelas correspondientes.

En la muestra calcinada de $\text{MgFeAl}(0,16)$, se determinó la presencia de la espinela MgAl_2O_4 : 23 y 45° 2 θ (PDF-330853); no se descarta la formación de MgO , la cual coincide con los picos determinados para la espinela de magnesio. Los otros picos no marcados se corresponden con la estructura original de la hidrotalcita de magnesio. Esta estructura en particular, pudo haberse renovado después de la calcinación por el llamado “efecto memoria” que permite la reconstrucción de la hidrotalcita si la humedad del medio lo permite.

En la hidrotalcita conteniendo cinc, la calcinación de la muestra $\text{ZnFeAl}(0,20)$ conllevó a la formación de ZnO : 32 y 47° 2 θ (PFD-740534) y a las espinelas: $\text{Zn}(\text{Al}_{1,4}\text{Fe}_{0,6})\cdot\text{O}_4$: 32 y 36° 2 θ (PFD-821046) y ZnAl_2O_4 : 37, 56 y 68° 2 θ (PFD-821043).

Para el caso de la hidrotalcita de cobalto calcinada, $\text{CoFeAl}(0,50)$, los óxidos formados fueron las espinelas de CoAl_2O_4 : 32, 37 y 65° 2 θ (PDF-100458), FeAl_2O_4 : 32, 37 y 45° 2 θ (PDF-030894) y Co_3O_4 : 32,37 y 59° 2 θ (PDF-731701). La ausencia de picos de correspondientes a óxidos de hierro, podrían indicar que parte del hierro se incorpora para la formación de la espinela correspondiente.

Cuando se calcinó la hidrotalcita de níquel: $\text{NiFeAl}(0,54)$; se observaron las fases siguientes: NiO (PFD-011239) a 37 y 43° 2 θ , FeO (PFD-722355 y 751550) a 37, 43 y 62° 2 θ , y la espinela $\text{NiAl}_{26}\text{O}_{40}$ (PFD-200776) a 37 y 43° 2 θ . Estos compuestos son los esperados en este tipo de hidrotalcitas calcinadas. La presencia de hierro, como óxido y en la espinela de níquel, indica, quizás, un exceso de hierro que logran

incorporarse en la espinela, y el exceso de éste formaría a ser parte del óxido.

3.3. Medidas texturales de superficie (área específica BET, volumen y diámetro de poro)

Por otra parte, también se determinaron algunos parámetros superficiales tanto a las hidrotalcitas sintetizadas como aquellas muestras calcinadas seleccionadas (Tabla 3). De acuerdo a los parámetros superficiales y la síntesis de las hidrotalcitas sintetizadas, no existe una relación clara entre la composición de la hidrotalcita y el área específica obtenida. Todas la hidrotalcitas sintetizadas tienen una relación $[M^{3+}/(M^{3+}+M^{2+})] = 0,22$, la cual está en el intervalo ideal para la síntesis de las hidrotalcitas, por lo tanto, ese no sería un factor importante para los resultados obtenidos, tal como los presentados por Rivera-Ortega *et al.*, [17]. En general, las hidrotalcitas sintetizadas con Zn^{2+} y Mg^{2+} muestran áreas específicas superiores que aquellas sintetizadas con Ni^{2+} o Co^{2+} , esto quizás es independiente del radio iónico de las especies divalentes involucradas, y quizás tiene mayor influencia la facilidad de formación de especies más densas tales como las espinelas formadas. Asimismo, tampoco se encontró una relación directa entre el área específica de muestras seleccionadas de hidrotalcitas calcinadas y aquellas sin calcinación. Para las muestras que contienen Co^{2+} o Ni^{2+} , el área disminuye; mientras que para las muestras en donde está la presencia de Mg^{2+} o Zn^{2+} el área específica aumenta. Algunos autores argumentan que el incremento de la porosidad, y por ende de la superficie específica, está relacionada con la formación de mesoporos debido a la expulsión de CO_2 y del H_2O durante la calcinación de la hidrotalcita [18]; mientras que una disminución del área específica durante la calcinación de la hidrotalcita es producto de formación de fases densas como las espinelas, así como la sinterización de los cristallitos formados [19].

El tamaño de los cristales tampoco tiene mayor influencia en los datos de la superficie obtenida. La mayoría de las hidrotalcitas presentaron tamaño de cristal mucho más pequeños que la hidrotalcita de $MgFeAl(0,16)$, la cual presentó la mayor área

específica y también el mayor tamaño de cristal. Por lo que se argumenta, que el área específica está relacionada con la cristalinidad de las muestras obtenidas [19].

En comparación de los resultados obtenidos de diámetro de poro y área específica de las hidrotalcitas sintetizadas y aquellas calcinadas, tampoco es posible establecer una correlación específica, un aumento de poros se debe a la expulsión de aniones como el CO_2 y el agua, mientras que una disminución del mismo resulta del colapso de la estructura. Estudios realizados por Fernández *et al.*, [14] señalan que no es la composición en el contenido de Fe que afecta los datos superficiales, estos estarían más bien orientado a la cristalinidad de las muestras sintetizadas.

Tabla 3: Parámetros superficiales de las hidrotalcitas terciarias sintetizadas: Fe^{3+} , Al^{3+} y (Co^{2+} , Ni^{2+} , Mg^{2+} o Zn^{2+}) y muestras de óxidos seleccionadas.

Hidrotalcita Terciaria	Área específica BET (m^2/g)	Diámetro de poro (nm)	Volumen de poro (cm^3/g)
MgFeAl(0,16)	73	25,5	0,413
MgFeAl(0,32)	41	6,2	0,063
óxido MgFeAl(0,16)	31	15,8	0,111
CoFeAl(0,21)	15	15,5	0,037
CoFeAl(0,42)	2	ND	ND
CoFeAl(0,50)	1	ND	ND
óxido CoFeAl(0,50)	36	14,7	0,124
NiFeAl(0,33)	2	ND	0,004
NiFeAl(0,54)	18	16,9	0,052
NiFeAl(0,85)	1	ND	ND
óxido NiFeAl(0,54)	86	7,6	0,163
ZnFeAl(0,10)	66	9,7	0,141
ZnFeAl(0,20)	15	13,1	0,048
ZnFeAl(0,48)	85	11	0,212
óxido ZnFeAl(0,20)	13	22,2	0,059

Los valores entre paréntesis se refieren a la relación Fe^{3+}/Al^{3+} .
ND: no determinados.

4. Conclusiones

Se sintetizaron y caracterizaron once hidrotalcitas terciarias con Al^{3+} y Fe^{3+} variable, y variando el catión divalente: Mg^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} o Zn^{2+} . Además, muestras seleccionadas de estas hidrotalcitas también fueron calcinadas y caracterizadas.

Los resultados de DRX mostraron la presencia de la fase hidrotalcita. Otras fases, como nitrato de sodio, fueron observadas como impurezas en algunas de las hidrotalcitas sintetizadas. En el caso, de las muestras calcinadas se observó la presencia de óxidos y espinela de los cationes que componen la hidrotalcita. Los parámetros de la unidad de celda tuvieron un comportamiento coherente con respecto al catión divalente usado en la síntesis de estos materiales. Los parámetros de superficie, tales como: área específica, volumen y diámetro de poro no presentaron un comportamiento definido con respecto al contenido metálico del catión divalente o la relación atómica de los cationes trivalentes.

Agradecimientos

Los autores agradecen al proyecto estratégico del FONACIT: PE: 2012001441 por la ayuda financiera a este proyecto. También al Programa de Cooperación de Postgrado (PCP) Francia-Venezuela por el apoyo en la elaboración de este proyecto N°: 2013000444.

Referencias

- [1] D. Meloni, R. Monaci, V. Solinas, A. Auroux, and E. Dumitriu. Characterisation of the active sites in mixed oxides derived from LDH precursors by physico-chemical and catalytic techniques. *Applied Catalysis A: General*, 350(1):86–95, 2008.
- [2] CP Kelkar and AA Schutz. Ni-, mg-and co-containing hydrotalcite-like materials with a sheet-like morphology: synthesis and characterization. *Microporous materials*, 10(4-6):163–172, 1997.
- [3] F Cavani, Ferruccio Trifirò, and A Vaccari. Hydrotalcite-type anionic clays: Preparation, properties and applications. *Catalysis today*, 11(2):173–301, 1991.
- [4] A Vaccari. Clays and catalysis: a promising future. *Applied Clay Science*, 14(4):161–198, 1999.
- [5] Zhi Ping Xu, Jia Zhang, Moses O Adebajo, Hong Zhang, and Chunhui Zhou. Catalytic applications of layered double hydroxides and derivatives. *Applied Clay Science*, 53(2):139–150, 2011.
- [6] Piotr Kuśtrowski, Alicja Rafalska-Łasocha, Dorota Majda, Dominika Tomaszewska, and Roman Dziembaj. Preparation and characterization of new Mg–Al–Fe oxide catalyst precursors for dehydrogenation of ethylbenzene in the presence of carbon dioxide. *Solid State Ionics*, 141:237–242, 2001.
- [7] Wei Ma, Nannan Zhao, Gang Yang, Liyan Tian, and Ren Wang. Removal of fluoride ions from aqueous solution by the calcination product of Mg–Al–Fe hydrotalcite-like compound. *Desalination*, 268(1):20–26, 2011.
- [8] Nora A Comelli, María L Ruiz, Nora A Merino, Ileana D Lick, E Rodríguez-Castellon, A Jimenez-Lopez, and Marta I Ponzi. Preparation and characterisation of calcined Mg/Al hydrotalcites impregnated with alkaline nitrate and their activities in the combustion of particulate matter. *Applied Clay Science*, 80:426–432, 2013.
- [9] S Velu, V Ramkumar, A Narayanan, and CS Swamy. Effect of interlayer anions on the physicochemical properties of zinc–aluminium hydrotalcite-like compounds. *Journal of Materials Science*, 32(4):957–964, 1997.
- [10] RV Prikhod'ko, MV Sychev, IM Astrelin, K Erdmann, A Mangel, and RA Van Santen. Synthesis and structural transformations of hydrotalcite-like materials Mg-Al and Zn-Al. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 74(10):1621–1626, 2001.
- [11] Robert D Shannon. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Acta crystallographica section A: crystal physics, diffraction, theoretical and general crystallography*, 32(5):751–767, 1976.
- [12] AS Bookin and VA Drits. Polytype diversity of the hydrotalcite-like minerals. i. possible polytypes and their diffraction features. *Clays and Clay Minerals*, 41(5):551–557, 1993.
- [13] Viky-C Mujica, Carlos F Linares y Ingrid Velásquez. El efecto de los tratamientos: Radiación microondas y co-precipitación sobre las propiedades cristalinas en hidrotalcitas de Co-Al y Ni-Al. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 35(2):344–356, 2015.
- [14] José María Fernández, María Angeles Ulibarri, Francisco M Labajos, and Vicente Rives. The effect of iron on the crystalline phases formed upon thermal decomposition of Mg–Al–Fe hydrotalcites. *Journal of Materials Chemistry*, 8(11):2507–2514, 1998.
- [15] Manuel Sánchez-Cantú, Lydia M Pérez-Díaz, Efraín Rubio-Rosas, Victor H Abril-Sandoval, Jorge G Merino-Aguirre, Federico M Reyes-Cruz, and Laura Orea. MgZnAl hydrotalcite-like compounds preparation by a green method: effect of zinc content. *Chemical Papers*, 68(5):638–649, 2014.
- [16] Jaime S Valente, Jose Hernandez-Cortez, Manuel S Cantu, Gerardo Ferrat, and Esteban López-Salinas. Calcined layered double hydroxides Mg–Me–Al (Me: Cu, Fe, Ni, Zn) as bifunctional catalysts. *Catalysis Today*, 150(3):340–345, 2010.
- [17] JA Rivera-Ortega, G Fetter y P Bosch-Giral. Caracterización de catalizadores básicos tipo hidrotalcita sintetizados por irradiación de microondas. *Revista mexicana de ingeniería química*, 5(3), 2006.

- [18] Karthikeyan Chelladurai and Manivannan Rajamanickam. Environmentally benign neem biodiesel synthesis using nano-Zn-Mg-Al hydrotalcite as solid base catalysts. *Journal of Catalysts*, 2014:1–6, 2014.
- [19] Lucjan Chmielarz, Piotr Kuśtrowski, Alicja Rafalska-Łasocha, and Roman Dziembaj. Influence of Cu, Co and Ni cations incorporated in brucite-type layers on thermal behaviour of hydrotalcites and reducibility of the derived mixed oxide systems. *Thermochimica Acta*, 395(1):225–236, 2002.

Determination of the Behavior of the Hardness as a function of the Traction Effort in an AISI 1005 Steel

Itzrel Dauhajre^a, Carlos Alfonzo^{*,b}, Argel Porrello^b, Carmelo Torres^b

^a*Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.*

^b*Centro de Investigaciones en Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.*

Abstract.-

The purpose of this investigation is to determine the behavior of the hardness of an AISI 1005 steel by subjecting it to different tensile stresses. For this purpose, steel specimens were manufactured according to the ASTM E8M standard and subjected to a series of tests grouped in three stages: The first stage chemical analysis of the material was carried out, verified according to the ASTM A29 standard. In the second stage the test specimens were subjected to tensile tests, the yield strength of the material was calculated through the Offset Method, a load range applicable to the specimen was created without crossing the limit of the elastic zone of the material. In stage number three, consisting of two tests: the first is the tensile test, by which the test piece was subjected to the action of a pre-established load and the test was stopped, then the hardness test was applied, measuring the hardness that experiences the material subjected to the action of a certain force value. This phase was repeated increasing the load applied at 1000N until reaching the calculated yield strength. During this stage it was observed that the material increases its hardness as it is being traded, then when it approaches the yield point this mechanical property begins to decrease until it reaches the value it originally had.

Keywords: Hardness; traction effort; AISI 1005.

Determinación del Comportamiento de la Dureza en función del Esfuerzo de Tracción en un Acero AISI 1005.

Resumen.-

El propósito de esta investigación es determinar el comportamiento de la dureza de un acero AISI 1005 al someterlo a diferentes esfuerzos de tracción. Para esto se fabricaron probetas de Acero de acuerdo a la norma ASTM E8M y se sometieron a una serie de ensayos agrupados en tres etapas: La primera etapa se realizaron análisis químicos del material, verificándose según la norma ASTM A29. En la segunda etapa se sometieron las probetas a ensayos de tracción, se calculó el límite de fluencia del material a través del Método Offset, se creó un rango de carga aplicable a la probeta sin cruzar el límite de la zona elástica del material. En la etapa número tres, constituida por dos ensayos: el primero es el ensayo de tracción, mediante el cual se sometió la probeta a la acción de una carga preestablecida y se detuvo el ensayo, posteriormente se aplicó el ensayo de dureza, midiendo la dureza que experimenta el material sometido a la acción de cierto valor de fuerza. Esta fase se repitió aumentando la carga aplicada en 1000N hasta llegar al límite de fluencia calculado. Durante esta etapa se observó que el material va incrementando su dureza a medida que se va traccionando, seguidamente cuando se acerca al límite de fluencia esta propiedad mecánica comienza a disminuir hasta llegar al valor que tenía originalmente.

Palabras clave: Dureza; esfuerzos de tracción; AISI 1005.

Recibido: noviembre 2017

Aceptado: diciembre 2017

*Autor para correspondencia

Correo-e: calfonzo@uc.edu.ve (Carlos Alfonzo)

1. Introducción

El acero AISI 1005 se utiliza en piezas de maquinaria o elementos donde su resistencia a la tracción sea de menor importancia o donde se requiere un severo doblado y buena soldabilidad, su principal uso es en la fabricación de hebillas, tornillos, remaches, cadenas, argollas, canastillas, estanterías, ganchos, loceros, núcleos (soldadura), parrillas, repisas de baño, repisas organizadoras, espárragos, pernos, pernos en U o grapas, tuercas, accesorios para motos, carros para autoservicios, elementos decorativos, exhibidores, bulones, pasadores, bujes, accesorios de lujo para el sector automotriz, etc., Como se indica en la norma ASTM A29 [1]. Debido a el amplio uso del acero AISI 1005, es de gran interés realizar un proceso evaluativo de la dureza de este al aplicársele esfuerzos de tracción para conocer el comportamiento de estas propiedades a la hora de ser requeridas en el diseño de un elemento mecánico.

Los esfuerzos residuales tanto en soldaduras como en acoples se calculan a través de diferentes métodos el más común es el método de “Hole Drilling”; estos métodos se consideran semi-destructivos porque se tiene que remover material de la pieza para hacer su estudio. Al establecer una relación entre el esfuerzo y la dureza de un material basta con colocar un durómetro en varios puntos, leer las durezas indicadas y entrar en la gráfica esfuerzo-dureza para leer los esfuerzos a los cuales está sometida una pieza o incluso el material en bruto [2].

El objetivo de este proyecto es identificar si existe una relación entre el esfuerzo de tracción que se aplica a una pieza y la dureza dentro de la zona elástica del material.

2. Metodología

Para el presente trabajo se utilizó un acero AISI 1005 suministrado en pletinas de 6 m de largo, con ancho de 25,4 mm y un espesor de 4,76 mm, de la cual se extrajeron 10 probetas con las dimensiones establecidas por la norma ASTM E8-M [3]. Se ensayaron dos (2) probetas a

tracción, tres (3) probetas para análisis de material con espectroscopia de emisión óptica (OES) y cinco (5) probetas para ensayo tracción-dureza. Teniéndose un total de diez (10) probetas, cuyas dimensiones se muestra en la Figura 1.

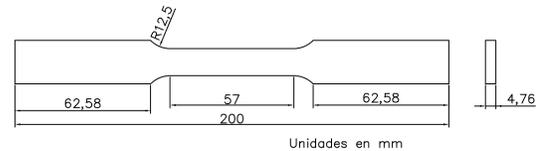


Figura 1: Dimensiones de probeta de acuerdo a la norma ASTM E8-M [1].

Ensayo de Tracción-Dureza

Los ensayos de tracción se realizaron utilizando la máquina de ensayos universales de materiales marca “Galdabini” modelo CTM-20, perteneciente al Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo. Este ensayo se hizo de acuerdo con las recomendaciones de la norma ASTM E8M [3]. Para realizar este ensayo se marcaron las probetas en la zona calibrada, midiendo su longitud inicial, ancho y espesor con un vernier, sujetando firmemente los extremos de la probeta a las mordazas de la máquina de tracción se aplicó la carga estirando la probeta hasta que ocurrió la fractura. Con la información obtenida de los ensayos se construyeron curvas de esfuerzo-deformación, a partir de estas curvas se obtuvo el esfuerzo de fluencia identificando el límite elástico del Acero. Para obtener este esfuerzo de fluencia (S_y) se utilizó el método offset como lo indica J. Shackelford [4].

Para determinar el comportamiento del acero, las probetas fueron sometidas a esfuerzos de tracción uniaxial, inferiores al esfuerzo de fluencia del material (zona elástica), y mientras se mantenía el esfuerzo, se tomaron cuatro medidas de dureza.

Para el ensayo de dureza se empleó un durómetro portátil Krautkramer MIC20 (ver Figura 2), perteneciente al Laboratorio de La Refinería El Palito (PDVSA), el cual permite el registro, gráfica y cálculo de media de tomas de dureza, utilizando El Método de Rebote para realizar el ensayo.

Tabla 1: Composiciones químicas del material estudiado y del acero ASTM A1005 [?].

Material	Fe (%)	C (%)	Mn (%)	P _{max} (%)	S _{max} (%)
Estudiado	99,53	0,0505	0,3337	0,003	0,002
ASTM 1005	----	0,06 max	0,35 max	0,04	0,05



Figura 2: Durómetro portátil Krautkramer MIC20.

Para llevar a cabo El Método de Rebote el equipo consta de un cuerpo de impacto, un dispositivo de impacto, y una unidad de visualización. El cuerpo de impacto tiene un carburo de tungsteno o bola de diamante en la punta, y un imán permanente para generar un impulso de tensión. El dispositivo tiene una unidad para la tensión y para acelerar el impacto del cuerpo, así como una bobina de inducción para detectar el imán en el cuerpo de impacto. A través de este método se midió la velocidad de variación debido a pinzamiento del cuerpo de impacto. Durante este proceso, el imán del cuerpo de impacto induce una señal de voltaje en la bobina cuya altura es proporcional a la velocidad de impacto (I_p). El impacto provoca una deformación plástica del material, y una indentación esférica permanente se produce en la superficie. La relación de velocidad se determina exactamente en el momento del impacto de rebote a través del procesamiento de la señal especial.

Con los resultados de este ensayo se obtuvieron los datos para generar las curvas esfuerzo-dureza de un acero AISI 1005.

El objetivo del análisis con espectroscopia de emisión óptica es determinar la composición química exacta de la pletina que se adquirió para la fabricación de las probetas

3. Resultados y discusión

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos del análisis de material mediante espectroscopia de emisión óptica (OES) y el grado de designación equivalente de acuerdo a la norma ASTM A 29 [1] que corresponde al grado ASTM 1005. Sólo se reporta el promedio de los elementos Fe, Mn, P y S que son los establecidos por la norma. El análisis OES arrojó el porcentaje de otros elementos como: Si, Cr, Ni, Al, Co, Cu, Nb, Ti, V, W, Pb, Sn, B, Zr, As y Bi, para los cuales el contenido fue menor o igual a 0,037 %. En la Figura 3, se observan las marcas dejadas por el procedimiento de OES.



Figura 3: Curvas de esfuerzo y deformación unitarios del material estudiado.

3.1. Ensayo de tracción

A través de este ensayo se busca obtener un rango de valores dentro de la zona elástica del material, así como también conocer el comportamiento mecánico del este.

En la Figura 4 se muestran las curvas esfuerzo-deformación unitarios obtenidas del ensayo de tracción aplicado a las probetas de Acero AISI 1005.

En la Figura 4, la primera parte de la curva es prácticamente una recta, que muestra la proporcionalidad entre la deformación con respecto al esfuerzo aplicado. Utilizando el Método "Offset", establecido en la norma ASTM E8-M [2], se determinó el límite de fluencia o límite aparente de elasticidad con un valor promedio de 210

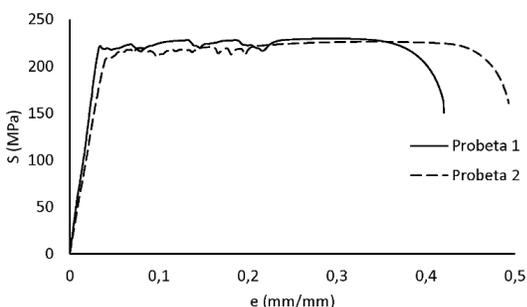


Figura 4: Curvas de esfuerzo y deformación unitarios del material estudiado.

MPa, mostrando una amplia zona de deformación plástica (entre 0,1 y 0,4 de deformación), lo cual indica que es un material bastante dúctil.

Con estos resultados se creó un rango de carga (2000N-7000N) para trabajar dentro de la zona elástica del Acero.

3.2. Ensayos tracción-Dureza

Se trabajo dentro de la zona elástica del material, utilizando un intervalo de carga de 2000 N a 7000 N. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2 y se muestran gráficamente en la Figura 5.

Se puede observar cómo cambia la dureza a medida que se tracciona la probeta al inicio del ensayo esta tiende a endurecerse, pero a medida que va aumentando el esfuerzo aplicado (tracción) su dureza va disminuyendo progresivamente hasta llegar a el valor de dureza que tenía en su condición original, esto ocurre al acercarse al límite de fluencia del Acero de estudio.

El comportamiento que se obtiene al relacionar valores de esfuerzo de tracción y dureza no describe ningún modelo matemático conocido, tal como lo indican Shen y Chawla en su estudio [3].

4. Conclusiones

Se comprobó por medio del análisis de espectrometría que el acero de estudio presento una composición química propia de un acero AISI 1005, así lo confirma la Norma ASTM A-29 [1].

A medida que la probeta de estudio se le aplica el ensayo de tracción su dureza tiende a regresar a la condición original, es decir el grado de dureza al aplicar el mínimo y máximo esfuerzo dentro de la

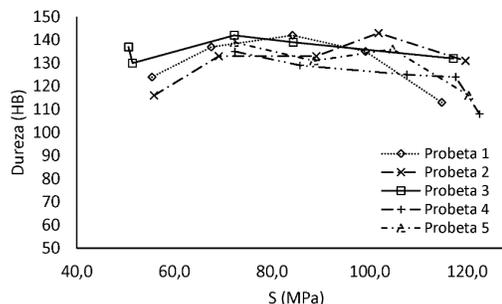


Figura 5: Grafica de valores obtenidos en ensayo tracción-dureza.

Tabla 2: Valores obtenidos de ensayo tracción-dureza.

Probeta	Carga (N)	S (Mpa)	Dureza (HB)
1	3296	55,4	124
	4020	67,6	137
	5010	84,2	142
	5900	99,2	135
	6830	114,8	113
2	3320	55,8	116
	4110	69,1	133
	5300	89,1	133
	6060	101,8	143
	7120	119,7	131
3	3010	50,6	137
	3060	51,4	130
	4300	72,3	142
	5020	84,4	139
	6970	117,1	132
4	4308	72,4	135
	5100	85,7	129
	6405	107,6	125
	7000	117,6	124
	7290	122,5	108
5	4300	72,3	139
	5270	88,6	131
	6230	104,7	136
	7160	120,3	116

zona elástica es prácticamente constante, este varía solo durante la aplicación de esfuerzos intermedios. No existe modelo matemático conocido que represente este tipo de comportamiento.

La dureza del material no mostró una tendencia definida al variar el esfuerzo de tracción en la zona elástica.

Recomendaciones

Con la finalidad de profundizar el estudio de la relación entre la dureza de un material y el esfuerzo que actúa sobre este se recomienda realizar el estudio para el mismo acero (AISI 1005)

aplicando esfuerzos de compresión.

Referencias

- [1] ASTM A29 / A29M-05(2005), Standard specification for steel bars, carbon and alloy, hot-wrought, general requirements for, 2005.
- [2] ASTM E8-04(2004), Standard test methods for tension testing of metallic materials, 2004.
- [3] Y. L. Shen and N. Chawla. On the correlation between hardness and tensile strength in particle reinforced metal matrix composites. *Materials Science and Engineering: A*, 297(1-2):44–47, 2001.
- [4] James F. Shackelford. *Ciencia de materiales para ingenieros*. Pearson Educación, sexta edición.

Evaluation of solidifying agents in the process stabilization solidification applied to chemical sludges

José Antonio Pérez^{*,a}, Ysoris Noguera^a, Belén María Paricaguán^b

^a*Departamento de Ingeniería Química, Escuela de Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela*

^b*Laboratorio de Polímeros y Derivado Petroquímicos, Centro de Investigaciones Químicas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.*

Abstract.-

Different solidifying agents were considered in the stabilization / solidification process applied to chemical sludge generated in an effluent treatment plant from the printing stage in the production of corrugated cardboard, with the aim of chemically stabilizing them and being able to achieve their disposal in a filling sanitary. A total of six alternatives were evaluated, obtaining the average physical characteristics of the sludge: pH 7,36 and moisture content 22,46 %. The average chemical composition of the sludge leachate was: total chromium 0,14 mg/L and total lead 11,39 mg/L, indicating that this is a toxic waste and the mixture cement- (peat-silicate sodium-sludge) was selected with a relation cement sludge 2: 1, managing to reduce lead levels in the leachate by 98,9 %.

Keywords: stabilization/solidification; heavy metals; peat; leachate; solidifying agents.

Evaluación de agentes solidificantes en el proceso estabilización/solidificación aplicado a lodos químicos

Resumen.-

Se consideraron diferentes agentes solidificantes en el proceso estabilización/solidificación aplicado a lodos químicos generados en una planta de tratamiento de efluentes provenientes de la etapa de impresión en la producción de cartón corrugado, con el objetivo de estabilizarlos químicamente y poder lograr su disposición en un relleno sanitario. Se evaluaron un total de seis alternativas, obteniéndose las características físicas promedio del lodo: pH 7,36 y contenido de humedad 22,46 %. La composición química promedio del lixiviado del lodo fue: cromo total 0,14 mg/L y plomo total 11,39 mg/L, indicando que éste es un desecho tóxico y se seleccionó la mezcla cemento-(turba-silicato de sodio-lodo) con una relación lodo cemento 2:1, logrando reducir los niveles de plomo en el lixiviado en 98,9 %.

Palabras clave: solidificación/estabilización; metales pesados; turba; lixiviado; agentes solidificantes.

Recibido: mayo 2017

Aceptado: octubre 2017

1. Introducción

En la actualidad la gestión de los residuos peligrosos es una de las principales preocupacio-

nes en los países industrializados. La resolución de este problema debe ser estudiada desde dos perspectivas: por una parte, controlar el impacto de estos residuos sobre el medio mediante una gestión adecuada de los mismos; y por otra, restaurar los daños producidos en aquellos lugares que se han visto afectados por malas prácticas llevadas a cabo en el pasado. La estabilización/solidificación es un proceso de tratamiento de residuos peligrosos ideado para mejorar la manipulación y propieda-

*Autor para correspondencia

Correo-e: jperez12011@hotmail.com (José Antonio Pérez)

des físicas de los residuos peligrosos, o para limitar la solubilidad (lixiviabilidad) de los constituyentes peligrosos de los residuos peligrosos. Estas tecnologías están basadas en un conjunto de operaciones que, mediante la utilización de aglomerantes y aditivos, reducen la movilidad y toxicidad de los contaminantes contenidos en los residuos convirtiéndolos en aceptables por el medio ambiente previo a su deposición en vertederos [1, 2]. A través del proceso de estabilización/solidificación (E/S), el residuo es químicamente estabilizado y físicamente modificado en una matriz sólida de baja permeabilidad y alta integridad estructural, reduciéndose así, la lixiviación de sus constituyentes peligrosos al medio [3, 4, 5]. Las técnicas de estabilización/solidificación (E/S) están consideradas como la mejor tecnología disponible para el tratamiento de residuos, cuyo principal problema es la presencia de metales, razón por la cual tienen la categoría de residuos peligrosos (RP). Como inversión para el futuro, la mejor estrategia es adoptar medidas de tipo preventivo, encaminadas a reducir la generación de residuos en origen y/o procurar la valorización de los mismos [3]. El problema de la contaminación del medio ambiente se puede establecer en varias ramas, como por ejemplo las aguas residuales y el manejo de los residuos, para dar un tratamiento y disposición final a este tipo de residuos se debe optar por alguna de las tecnologías disponibles para el tratamiento de desechos peligrosos, entre las que destaca: descomposición térmica, fusión en plasma, inmovilización y relleno sanitario controlado.

Todos los métodos mencionados, excepto inmovilización, requieren de una gran inversión inicial en la construcción de la infraestructura requerida para llevar a cabo el tratamiento [6].

Por su parte, la inmovilización con materiales cementantes requiere sólo de una mezcladora de cemento como infraestructura o equipo y se puede hacer el tratamiento in situ, ex situ, en planta e incluso en planta móvil. Esta tecnología es aplicable al tratamiento de desechos tóxicos por sus niveles de metales pesados, otras especies inorgánicas y recientemente ha sido utilizado para el tratamiento de algunas sustancias orgánicas [7,

8].

El término general 'inmovilización' incluye métodos físicos y químicos tanto para solidificar como para estabilizar los residuos. Un proceso eficaz de inmovilización es aquél donde los potenciales agentes contaminantes son inmovilizados con éxito en una estructura de residuos estabilizados o solidificados y aislados del medio ambiente, haciéndolos inadecuados para la lixiviación [9].

La estabilización es un término general para describir técnicas o métodos mediante los cuales los residuos peligrosos son convertidos en una forma más estable. Normalmente esto se logra mediante la adición de reactivos que mejoran el manejo y las características físicas del residuo, disminuyen la superficie a través de la cual se puede dar la liberación de los contaminantes, reduce o limita la solubilidad de cualquier contaminante presente en el residuo y finalmente reduce la toxicidad de los contaminantes. Se debe entender por lixiviación como el proceso mediante el cual los contaminantes se transfieren de una matriz estabilizada a un medio líquido como el agua [10]. Las tecnologías de E/S fueron aplicadas inicialmente al tratamiento de los residuos radioactivos y posteriormente a los RP, así como a suelos y sedimentos contaminados. En la actualidad se aplican también en otros procesos, entre los que destacan el tratamiento de residuos procedentes de otros procesos de eliminación de contaminación, el tratamiento de suelos contaminados, residuos industriales peligrosos y mezcla de residuos [10, 11, 12]. El proceso de E/S es un tratamiento efectivo, tanto económica como técnicamente, para residuos peligrosos en los cuales no sea económicamente viable la reutilización o el reciclado. Debido a la importancia que está adquiriendo esta tecnología mundialmente para el tratamiento de los residuos industriales y de suelos contaminados, la EPA la considera como la mejor tecnología disponible y demostrada, BDAT (Best Demonstrated Available Technology) para 57 residuos listados por dicho organismo [1, 2, 3].

El objetivo de este estudio fue realizar la evaluación de diferentes agentes solidificantes en el proceso estabilización/solidificación aplicado

a lodos químicos generados en una planta de tratamiento de efluentes provenientes de la etapa de impresión en la producción de cajas de cartón corrugado, con la finalidad de estabilizarlos químicamente y poder lograr su disposición en un relleno sanitario. Dicho lodo es potencialmente peligroso por su contenido de níquel, cromo y cobre. La tecnología de inmovilización es considerada como una técnica muy prometedora por lo simple de su aplicación y su bajo costo, representando una alternativa de solución en el tratamiento de desechos tóxicos. Específicamente se ensayó con el lodo de la empresa y diferentes tipos de materiales cementantes.

2. Materiales y métodos

2.1. Muestreo

Se cuantificó una población de 683 tambores de aproximadamente 200kg cada uno, los cuales se encuentran debidamente almacenados e identificados como tóxicos.

La selección de estos tambores se hizo en forma aleatoria y a partir de estos se prepararon 10 muestras compuestas formadas por un total de 10 tambores cada una. De cada tambor se tomó una porción cuyo volumen es representativo del material muestreado, una cantidad de 0,5 kg extraídos de diferentes puntos de manera de garantizar la mayor exactitud posible en los resultados de los análisis posteriores.

2.2. Caracterización del lodo en estudio

Una vez realizadas las muestras compuestas se procedió a caracterizar tanto física como químicamente, esto con el objetivo de conocer de manera integral el tipo de lodo al cual se le realizará el tratamiento.

2.3. Propiedades físicas

En cuanto a las propiedades físicas del lodo, se evaluaron el pH, contenido de humedad y contenido de sólidos, debido a que estas variables influyen directamente en el procesamiento del desecho durante la aplicación de la estabilización/solidificación. Específicamente el contenido de sólidos ayuda en la determinación de la relación

desecho-agente solidificante, y el contenido de humedad es importante ya que indica si se debería añadir o remover agua en el procesamiento. La determinación se realizó por triplicado a cada una de las muestras compuestas descritas anteriormente y con la finalidad de caracterizar el lodo, se tomó el valor máximo, mínimo y promedio de la variable determinada.

2.3.1. Composición química del lixiviado del lodo

Con el objetivo de conocer el nivel de toxicidad del lodo en estudio se determinó la composición química del lixiviado por triplicado a las muestras compuestas, característica ésta que indica la capacidad migratoria de los componentes del desecho en condiciones extremas. Dicha composición química está basada en el contenido de metales pesados, específicamente zinc total, plomo total, cromo total y cobre total, debido a que la planta de tratamiento, de donde se originó el desecho sólido, procesaba efluentes contaminados con tintas flexográficas inorgánicas en la cual predominan los metales anteriormente descritos.

A cada una de las muestras se le realizó una extracción con un fluido acuoso durante 20 horas, siguiendo la metodología indicada por la Norma COVENIN N° 2797-91, para obtener el lixiviado del lodo. Posteriormente el lixiviado de cada extracción se analizó por absorción atómica para determinar su composición química.

2.4. Generación de alternativas

Para lograr el objetivo de estabilizar química y mecánicamente el lodo en estudio. Se consideró un desecho de tipo inorgánico (contentivo de compuestos de metales pesados), se seleccionaron como agentes solidificantes los siguientes materiales cementantes y puzolánicos: cemento, cal, ceniza y silicato de sodio; además de un aditivo específico para mejorar las características del desecho, como lo es la turba. En virtud de lo anterior fueron propuestas seis alternativas quedando de la siguiente manera: Alternativa 1: Basada en cemento. Alternativa 2: Cemento-ceniza. Alternativa 3: Cemento-silicato de sodio. Alternativa 4: Cal-ceniza. Alternativa 5: Basada en cemento, previo pretratamiento con turba.

Alternativa 6: Cemento-silicato de sodio, previo pretratamiento con turba.

La selección de agentes solidificantes de tipo inorgánico, como el cemento, cal, ceniza y silicatos solubles se fundamentan en que estos se adaptan mejor a residuos inorgánicos, especialmente aquellos que contienen metales pesados, debido a que ellos son retenidos como hidróxidos insolubles o carbonatos en la estructura endurecida, como resultado del elevado pH de los agentes solidificantes. Además otro criterio de selección es la economía, ya que estos materiales presentan una amplia disponibilidad y un bajo costo relativo en comparación con los agentes solidificantes de tipo orgánico (polietileno, polibutadieno, poliéster, urea-formaldehído, entre otros). Por otro lado, se seleccionó el cemento *Pórtland* tipo I, ya que es el cemento normal usado para propósitos de construcción y por ende el de mayor disponibilidad en el mercado.

Con el objetivo de lograr una relación óptima lodo-agente solidificante, se prepararon mezclas en diferentes proporciones para cada alternativa. A continuación se presentan en las Tablas 1, 2, 3, 4, 5 y 6 las proporciones para la aplicación del proceso estabilización/solidificación propuestas para dichas mezclas:

Tabla 1: Proporción de la mezcla cemento-lodo.

Muestra	Porcentaje (%)	
	Cemento	Lodo
T1	66,7	33,3
T2	50,0	50,0
T3	33,3	66,7

Tabla 2: Proporción de la mezcla cemento-ceniza-lodo.

Muestra	Porcentaje (%)		
	Cemento	Ceniza	Lodo
T4	30,0	20	50,0
T5	13,3	20	66,7

2.5. Evaluación de las alternativas

Para la evaluación de cada una de las alternativas se tomo en consideración aquella mezcla de

Tabla 3: Proporción de la mezcla cemento-(lodo-silicato de sodio).

Muestra	Porcentaje (%)	
	Cemento	Lodo
T6	50,0	50,0
T7	33,3	66,7

Nota: El lodo se humedece con una solución acuosa de silicato de sodio al 10 % v/v.

Tabla 4: Proporción de la mezcla cal-ceniza-lodo.

Muestra	Porcentaje (%)		
	Cal	Ceniza	Lodo
T8	25,0	25,0	50,0
T9	16,6	16,6	66,7

Tabla 5: Proporción de la mezcla cemento-turba-lodo.

Muestra	Porcentaje (%)		
	Cemento	Turba	Lodo
T10	31,2	6,2	62,6
T11	26,6	20,0	53,4

Tabla 6: Proporción de la mezcla cemento-turba-lodo.

Muestra	Porcentaje (%)		
	Cemento	Turba	Lodo
T12	31,2	6,2	62,6

Nota: El lodo se humedece con una solución acuosa de silicato de sodio al 10 % v/v.

lodo, cuya composición química en el lixiviado presentará el mayor contenido de metales (plomo), garantizando de esta manera la estabilización de las muestras de menor concentración.

Debido a las características físicas que presentó el lodo, se hizo necesaria la adición de agua en cada alternativa para lograr de esta manera la consistencia adecuada de la mezcla.

En las tres primeras alternativas, se utilizó el mismo procedimiento, el cual consiste en mezclar adecuadamente los materiales cementantes correspondientes con el lodo, adicionando agua hasta obtener la consistencia apropiada.

En la alternativa 4, el procedimiento seguido consistió en primer lugar, en el humedecimiento

del lodo con una solución diluida de silicato de sodio (10 %v/v) en una proporción de aproximadamente 18mL por cada 100g de lodo, seguido por la adición de mezcla del cemento y agua necesaria.

En la alternativa 5, se le realizó un pretratamiento al lodo con la Turba debido a su comprobada capacidad de retener metales pesados; este pretratamiento se llevó a cabo al poner en contacto por aproximadamente 1 hora la turba y el desecho, adicionando también, la cantidad de agua suficiente para homogeneizar la mezcla, y de esta manera alcanzar un mayor rendimiento en la acción de la turba. Una vez finalizado el pretratamiento, se procedió a la adición del cemento a la mezcla anteriormente descrita para completar así el proceso de estabilización/solidificación.

Igualmente, en la alternativa 6 se realizó el pretratamiento con la turba, añadiendo después la solución de silicato de sodio, aproximadamente en la misma proporción de la alternativa 4 y finalmente se le adicionó a esta mezcla la cantidad de cemento correspondiente.

Para cada una de las alternativas descritas anteriormente las mezclas resultantes del tratamiento se vacían en moldes, en donde ocurre la etapa de fraguado y endurecimiento, que tiene una duración de 7 días. De manera general, una vez solidificada la muestra de lodo tratado se procedió a triturarla hasta un tamaño de partícula menor de 2mm aproximadamente, para posteriormente realizarle las pruebas de lixiviación (TCLP) según Norma COVENIN N° 2797-9, con el objetivo de determinar la eficiencia del proceso, debido a que ésta establece el grado de inmovilización de los metales pesados contenidos en el desecho.

De manera que la comparación entre las concentraciones de los metales en el lixiviado del lodo antes y después del tratamiento sea confiable, la cantidad de lodo utilizado para las mezclas fue la misma que se empleó para la prueba de lixiviación del lodo no tratado, al igual que la cantidad del fluido de extracción utilizado, garantizando de esta manera las mismas condiciones para el análisis.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización del desecho

El primer paso que se realizó en el proceso de estabilización/solidificación fue la caracterización física del desecho a tratar debido a que éstas afectan significativamente el proceso de tratamiento y la propia formulación química de éste.

Entre las propiedades físicas analizadas se encuentra el pH, el cual como se observa en la Tabla 7, varía desde un valor mínimo de 5,971 hasta un valor máximo de 8,786, y con un promedio de 7,359 ver Tabla 8, esto se debe a que las condiciones necesarias de pH en la unidad de coagulación, precipitación y sedimentación de la planta de tratamiento para que se forme dicho lodo están alrededor del pH neutro.

Por otro lado, los resultados del contenido de humedad y el contenido de sólidos, como se muestra en la Tabla 8, presentan amplios rangos de valores. Esto se debe, en primer lugar, a que el tiempo de almacenamiento del lodo en los tambores no es el mismo, por lo tanto los de mayor tiempo presentaron una mayor deshidratación.

Además, las condiciones climáticas también afectan las características físicas del lodo ya que estos tambores se encuentran almacenados al aire libre y algunos de ellos presentaban deterioro.

Asimismo el bajo contenido de humedad que presenta el lodo (valor promedio 22,46 %) indica que es necesario la adición de agua, ya que se requiere agua para la hidratación de los materiales cementantes en cada una de la alternativas de aplicación del proceso estabilización/solidificación, es decir, se descarta la posibilidad de un pretratamiento para eliminar el agua.

3.2. Composición química de lixiviado de lodo

Los valores obtenidos de la composición química del lixiviado del lodo de cada una de las muestras, se observa en la Tabla 9, indica que para cada metal existe una gran variabilidad de resultados, lo cual se puede atribuir a la variación de las características del efluente tratado en la planta de tratamiento, originado por la diversidad de pigmentos (colores) utilizados en cada fase de producción de tintas flexográficas.

Tabla 7: Propiedades físicas de los lodos químicos según metodología de [13].

Muestra	pH (pH \pm 0.001)	Humedad promedio (H \pm 0.0001) %	Sólidos totales promedio (ST \pm 0.0001) %	Sólidos volátiles promedio (SV \pm 0.0001) %	Sólidos fijos promedio (ST \pm 0.0001) %
A1	6,216	5,9504	94,0496	65,3247	34,6753
A2	5,971	6,1127	93,8873	70,1877	29,8123
A3	6,051	5,4212	94,5788	68,8769	31,1231
A4	6,298	18,8748	81,1252	54,9718	45,0282
A5	8,216	9,4703	90,5297	37,5308	62,4692
A6	8,786	31,6161	68,3839	50,7529	49,2471
A7	8,170	20,8037	79,1963	40,3191	59,6809
A8	8,017	27,2807	72,7193	52,7240	47,2760
A9	8,128	51,0056	48,9944	54,4925	45,5075
A10	7,744	48,1143	51,8857	55,6418	44,3582

Tabla 8: Valor máximo, mínimo y promedio de las propiedades físicas del lodo.

Propiedad	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio
pH	5,971	8,786	7,359
Humedad (%)	5,4212	51,0056	22,4650
Sólidos totales (%)	48,9944	94,5788	77,5350
Sólidos volátiles (%)	37,5308	70,1877	55,0822
Sólidos fijos (%)	29,8123	62,4692	44,9177

Tabla 9: Resultados del análisis químico correspondiente al lixiviado del lodo químico en estudio según metodología [14].

M	Concentración (mg/L)			
	Cromo total (Cr \pm σ)	Cobre total (Cu \pm σ)	Plomo total (Pb \pm σ)	Zinc total (Zn \pm σ)
A1	0,21 \pm 0,01	0,48 \pm 0,02	34 \pm 2	1,72 \pm 0,02
A2	0,10	0,29 \pm 0,03	11 \pm 1	2,8 \pm 0,2
A3	0,25 \pm 0,05	0,9 \pm 0,1	42 \pm 1	2,60 \pm 0,02
A4	0,14 \pm 0,02	0,077	4,1 \pm 0,3	0,16 \pm 0,01
A5	0,2 \pm 0,1	0,078 \pm 0,002	3,3 \pm 0,4	0,065 \pm 0,005
A6	0,10	0,10 \pm 0,01	1,72 \pm 0,06	0,080 \pm 0,008
A7	0,10	0,077	0,45	0,015 \pm 0,005
A8	0,10	0,077	3,6 \pm 0,2	0,06 \pm 0,02
A9	0,10	0,19 \pm 0,03	14 \pm 1	1,0 \pm 0,2
A10	0,10	0,077	0,45	0,075 \pm 0,005

M: muestra.

 σ : desviación estándar correspondiente a la corrida de cada muestra.

En la Tabla 9 se observa que la muestra que presenta mayor contenido de plomo en el lixiviado es la muestra A3 con un valor de 42mg/L, por esta razón esta muestra fue seleccionada para la

evaluación de las alternativas, ya que de esta manera se garantiza la estabilización de los lodos con menor contenido de plomo lixivante.

Los resultados correspondientes a la composición química del lixiviado del lodo mostrados en la Tabla 10, indican que el lodo en estudio es un desecho tóxico, debido a que la concentración promedio del plomo en el lixiviado es de 11,46mg/L, la cual excede en un 129,20% el límite máximo permisible (5mg/L), establecido por el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables en el decreto 2211 de la Gaceta Oficial de Venezuela N° 4418, para la disposición de desechos que contenga este metal, sin embargo, la concentración promedio de cromo, cobre y zinc de 0,14 mg/L, 0,23 mg/L y 0,85 mg/L respectivamente se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles (1 y 10 mg/L).

Tabla 10: Valor máximo, mínimo y promedio de la composición química del lixiviado del lodo.

Muestra	Concentración (mg/L)			
	Valor mínimo	Valor máximo	Valor promedio*	Máxima permisible**
Cromo	0,10	0,25	0,14	1,00
Cobre	0,077	0,9	0,23	10,00
Plomo	0,45	42	11,46	5,00
Zinc	0,015	2,8	0,86	10,00

*: cuando la muestra presenta un valor por debajo del límite detectado por el equipo, se asumió este como valor de la variable.

**: exigida por el M.A.R.N.R..

3.3. Evaluación de las alternativas

Una vez seleccionado la muestra A3 esta fue incorporada a cada una de las alternativas propuestas generando el lodo solidificado y a continuación se presentan los resultados que evidencian la efectividad del tratamiento.

Tabla 11: Análisis químico del lixiviado del lodo tratado con la alternativa 1.

Muestra	Concentración (mg/L)			
	Cromo total (Cr $\pm \sigma$)	Cobre total (Cu $\pm \sigma$)	Plomo total (Pb $\pm \sigma$)	Zinc total (Zn $\pm \sigma$)
T1	2,39 \pm 0,07	0,450 \pm 0,003	4,10 \pm 0,02	0,018
T2	2,03 \pm 0,03	0,88 \pm 0,02	0,45	0,018
T3	1,50 \pm 0,02	0,69 \pm 0,02	0,45	0,018

Tabla 12: Análisis químico del lixiviado del lodo tratado con la alternativa 2.

Muestra	Concentración (mg/L)			
	Cromo total (Cr $\pm \sigma$)	Cobre total (Cu $\pm \sigma$)	Plomo total (Pb $\pm \sigma$)	Zinc total (Zn $\pm \sigma$)
T4	6,14 \pm 0,03	0,80 \pm 0,02	1,55 \pm 0,09	0,018
T5	4,39 \pm 0,05	0,20 \pm 0,01	0,45	0,018

Tabla 13: Análisis químico del lixiviado del lodo tratado con la alternativa 3.

Muestra	Concentración (mg/L)			
	Cromo total (Cr $\pm \sigma$)	Cobre total (Cu $\pm \sigma$)	Plomo total (Pb $\pm \sigma$)	Zinc total (Zn $\pm \sigma$)
T6	1,34 \pm 0,02	0,410 \pm 0,008	8,20 \pm 0,01	0,09 \pm 0,01
T7	6,34 \pm 0,02	0,38 \pm 0,06	0,45	0,018

La efectividad del proceso estabilización/solidificación fue evaluada sólo a través de la comparación de los resultados obtenidos en el ensayo de toxicidad (TCLP) de la muestra de lodo tratada y no tratada. De esta manera se logró

Tabla 14: Análisis químico del lixiviado del lodo tratado con la alternativa 4.

Muestra	Concentración (mg/L)			
	Cromo total (Cr $\pm \sigma$)	Cobre total (Cu $\pm \sigma$)	Plomo total (Pb $\pm \sigma$)	Zinc total (Zn $\pm \sigma$)
T8	5,14 \pm 0,02	0,25 \pm 0,01	0,45	0,06 \pm 0,01
T9	3,7 \pm 0,1	0,63 \pm 0,01	0,45	0,018

Tabla 15: Análisis químico del lixiviado del lodo tratado con la alternativa 5.

Muestra	Concentración (mg/L)			
	Cromo total (Cr $\pm \sigma$)	Cobre total (Cu $\pm \sigma$)	Plomo total (Pb $\pm \sigma$)	Zinc total (Zn $\pm \sigma$)
T10	3,5 \pm 0,1	0,60 \pm 0,02	5,3 \pm 0,2	0,10 \pm 0,01
T11	0,48 \pm 0,02	0,83 \pm 0,01	0,45	0,08 \pm 0,01

Tabla 16: Análisis químico del lixiviado del lodo tratado con la alternativa 6.

Muestra	Concentración (mg/L)			
	Cromo total (Cr $\pm \sigma$)	Cobre total (Cu $\pm \sigma$)	Plomo total (Pb $\pm \sigma$)	Zinc total (Zn $\pm \sigma$)
T12	0,14 \pm 0,03	0,22 \pm 0,01	0,45	0,10 \pm 0,01

determinar la estabilidad química del desecho tratado y por ende el efecto potencial contaminante de éste sobre el ambiente. Como se puede observar en las Tablas 11, 12, 13 y 14 la proporción lodo-agente solidificante 2:1 en cada una de las alternativas es la que presenta mejores resultados con respecto a la concentración de plomo, la cual es menor 0,45 mg/L para todas ellas, lo que representa un porcentaje de reducción de más del 98,9%. No obstante, al comparar cada una de estas alternativas con la proporción 2:1, como se muestra en la Tabla 17, todas presentan un incremento en las concentraciones de cromo en el lixiviado con respecto al lodo no tratado.

Este incremento de la concentración de cromo en el lixiviado del lodo tratado, se puede atribuir

Tabla 17: Porcentaje de reducción de las alternativas.

Metal	Porcentaje de reducción (%)			
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Cromo	-500	-1656	-2436	-1380
Cobre	54	86,6	74,6	26,6
Plomo	98,9	98,9	98,9	98,9
Zinc	99,3	99,3	99,3	99,3

a que mayormente este elemento está presente en el desecho en su estado de valencia $6+$, ya que los pigmentos inorgánicos utilizados en el proceso productivo contienen el cromo en forma de dicromato. Este estado de valencia del cromo le confiere una alta movilidad, debido a que este es más soluble que el Cr^{3+} en soluciones alcalinas.

Debido a estos resultados, surgió la necesidad de realizarle un pretratamiento al desecho con el objetivo de mejorarlo para la aplicación del proceso estabilización/solidificación, es decir, considerar la reducción del Cr^{6+} a Cr^{3+} , ya que este tiene una menor solubilidad y toxicidad. El pretratamiento se realizó a la alternativa 1 (proporción 2:1) debido a que esta presenta un menor incremento en la concentración de cromo.

Para la etapa de pretratamiento planteada, se consideró como aditivo la turba, la cual tiene la propiedad de reducir el Cr^{6+} a Cr^{3+} , así como también retener este último, ya que de los grupos funcionales oxigenados presentes en la turba pueden oxidarse y acomplejarse al metal en su forma más reducida. Este pretratamiento se puede catalogar como una depuración química, debido a que la turba reacciona con los constituyentes del desecho y a su vez los entrapa.

De esta manera se generó la alternativa 5, la cual está conformada por la mezcla cemento-(lodo-turba), en donde se fijaron dos proporciones de mezcla, una con alto contenido de turba (20%) y otra con bajo contenido de turba (6,20%). Los resultados del análisis del lixiviado, mostrados en la Tabla 15, indican que se necesita una gran cantidad de turba, debido a que con un 20% todavía existe un incremento en la concentración de cromo con respecto al lodo no tratado, siendo esto una desventaja debido a que se incrementa el

volumen del producto final de estabilización.

Por tal motivo, surge la alterativa 6, que está conformada por la mezcla cemento-(turba-silicato de sodio-lodo), en donde el silicato aumenta la capacidad encapsulante como se demuestra en los resultados de la Tabla 16, en donde se logró la reducción de la concentración de cromo con un 6,20% de turba, es decir, con poca cantidad de esta.

Por lo tanto, la alternativa seleccionada desde el punto de vista ambiental fue la 6, debido a que esta estabiliza el lodo de manera eficaz, solventando el problema de la alta solubilidad del Cr^{6+} , obteniéndose de manera un desecho solidificado que cumple con las regulaciones ambientales solucionando un problema en lo que respecta a la disposición de residuos sólidos.

Finalmente, el tipo de procedimiento escogido para la aplicación en campo del proceso es la mezcla en planta de tipo discontinuo, debido a la cantidad de desecho a tratar y a la manera como está dispuesto este en su sitio de almacenamiento, además de permitir un buen control sobre las proporciones y homogeneidad de la mezcla. De esta manera, el proceso consistirá en la adición de las cantidades establecidas de lodo, turba y agua a la mezcladora de tal forma de homogeneizar la mezcla, para luego dejarla en reposo durante una hora, posteriormente se combina con la solución de silicato de sodio y el cemento. El material resultante se vacía en los tambores respectivos, donde se lleva a cabo el fraguado.

Sin embargo, las ventajas y desventajas de los diferentes procesos de E/S varían con el proceso, los aglomerantes, el residuo, las condiciones del lugar y otros factores específicos [12]. Los procesos que están basados en reacciones de cementación con puzolanas o con reactivos inorgánicos son, en general, de bajo coste y fáciles de utilizar, sin embargo, aumentan el volumen del material final a manejar. Los procesos basados en encapsulación con materiales poliméricos orgánicos apenas producen aumento del volumen, y tienen un elevado rendimiento, pero generalmente su coste es elevado, con materiales que son costosos, y en algunos casos conllevan dificultades de tratamiento. Se pueden utilizar

diferentes ensayos de lixiviación, dependiendo de la característica que deseamos conocer de los sólidos estabilizados/solidificados [15]. Por todo esto a la hora de evaluar las ventajas y desventajas de las diferentes tecnologías de E/S hay que tener en cuenta las condiciones específicas asociadas a cada una; la determinación de la estrategia de E/S óptima desde el punto de vista económico requiere el estudio de las características del producto final generado, así como de la disponibilidad, cantidad y coste de los aglomerantes y aditivos empleados en cada uno de los procesos viables en base a una potencial implementación [1].

4. Conclusiones

El lodo es catalogado como un desecho sólido tóxico, ya que la concentración de plomo total en el lixiviado (11,43 mg/L) estando por encima del límite máximo permitido (5 mg/L).

La adición de silicato de sodio a la mezcla cementante reduce el tiempo de fraguado y endurecimiento del producto final, así como también disminuye el volumen final del mismo.

De acuerdo a los resultados obtenidos se concluye que la turba puede ser usada en el tratamiento de lodos químicos con contenido de metales pesados.

El proceso estabilización/solidificación representa una solución técnica viable para el problema de disposición final de los lodos químicos estudiados, ya que estos pueden ser convertidos en un desecho sólido que cumpla con el decreto 2211 de la Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 44118.

Referencias

- [1] Roger D. Spence and Caijun Shi, editors. *Stabilization and Solidification of Hazardous, Radioactive, and Mixed Wastes*. CRC press, 2004.
- [2] J. R. Conner, editor. *Chemical fixation and solidification of hazardous wastes*. Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [3] Angel Irabien y J. J. Rodríguez. *Los residuos peligrosos, caracterización, tratamiento y gestión*. Síntesis, Madrid, España, 2006.
- [4] Rachana Malviya and Rubina Chaudhary. Factors affecting hazardous waste solidification/stabilization: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 137(1):267–276, 2006.
- [5] C. S. Poon and K. W. Lio. The limitation of the toxicity characteristic leaching procedure for evaluating cement-based stabilised/solidified waste forms. *Waste Management*, 17(1):15–23, 1997.
- [6] G. Tchobanoglous, Hilary Theisen, and S. A. Vigil. *Integrated solid waste management: engineering principles and management issues*. McGraw-Hill, 1993.
- [7] Maricruz Vargas Camareno and Luis Guillermo Romero Esquivel. Tecnología de inmovilización de desechos peligrosos en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 19(3):3–8, 2006.
- [8] Carlton C. Wiles. Solidification and stabilization technology. In *Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal*, chapter 7.3, pages 7.31–7.46. McGraw Hill, 1997.
- [9] David Wilson, Fritz Balkau y Maggie Thurgood. *Manual de formación en gestión de residuos peligrosos para países en vías de desarrollo*. ISWA, primera edición, 2002.
- [10] Michael D. LaGrega, Philip L. Buckingham y Jeffrey C. Evans. *Gestión de residuos tóxicos: tratamiento, eliminación y recuperación de suelos*. McGraw-Hill, 1996.
- [11] Edwin F. Barth, Paul de Percin, and M. M. Arozarena. *Stabilization and solidification of hazardous wastes*. Number 186. Noyes Data, 1990.
- [12] Jesse R. Conner and Steve L. Hoeffner. A critical review of stabilization/solidification technology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 28(4):397–462, 1998.
- [13] Arnold E. Greenberg, Lenore S. Clesceri, and Eaton Andrew D., editors. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. APHA, 18th edition, 1992.
- [14] COVENIN 2797-1991, Desechos tóxicos o peligrosos. método de lixiviación. COVENIN, 1991.
- [15] Miriam Pérez Clemente. Estabilización/solidificación de metales peligrosos en matrices geopoliméricas que contienen zeolitas. Trabajo Especial de Grado, Dep. Ingeniería Química y Ambiental, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2016.

Characterization of fertilizer based on potassium dihydrogen phosphite obtained with different metallic reducing agents

Alexander Núñez, Ana Rodríguez, Jhonny Medina, Belén Paricaguán*

Laboratorio de Polímeros y Derivado Petroquímicos, Centro de Investigaciones Químicas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Abstract.-

The main objective of this research is to characterize fertilizers obtained of potassium dihydrogenphosphite once synthesized from the phosphoric acid (H_3PO_4) for a process of oxide - reduction with the agents metallic reducers zinc (Zn) and magnesium (Mg). To this, tests of pH, conductivity, density, total phosphorus under the spectrophotometric method molibdovanadofosfato, determination of the amount of phosphorus as phosphite in the fertilizer and metals present such as Zn, Mg and K, by the method is performed by inductively coupled plasma (ICP). Fertilizer products were obtained operating conditions of 165 °C, for a period of 60 to 70 hours of reaction, with the addition of an acidifying medium. The content of the main macronutrients K and P in the products obtained with Zn and Mg were 20,34 % w/w of K_2O ; 27,56 % w/w of P_2O_5 ; 19,52 % w/w of K_2O ; and 27,22 % w/w of P_2O_5 respectively.

Keywords: fertilizer; potassium dihydrogenphosphite; reducing agents.

Caracterización de fertilizante basado en el fosfito diácido de potasio obtenido con diferentes agentes reductores metálicos

Resumen.-

El objetivo fundamental de esta investigación es caracterizar los fertilizantes obtenidos de fosfito diácido de potasio sintetizado a partir del ácido fosfórico (H_3PO_4) por un proceso de óxido-reducción con los agentes reductores metálicos zinc (Zn) y magnesio (Mg). Para esto, se realizaron ensayos de pH, conductividad, densidad, fósforo total bajo el método espectrofotométrico de molibdovanadofosfato, determinación de la cantidad de fósforo como fosfito en el fertilizante y metales presente tales como Zn, Mg y K, por medio del método de plasma de inducción acoplada (ICP). Los productos fertilizantes fueron obtenidos en condiciones de operación de 165 °C, durante un lapso de 60 a 70 horas de reacción, con la incorporación de un medio acidificante. El contenido de los macronutrientes principales K y P en los productos obtenidos con Zn y Mg fueron 20,34 % p/p de K_2O ; 27,56 % p/p de P_2O_5 ; 19,52 % p/p de K_2O ; y 27,22 % p/p de P_2O_5 respectivamente.

Palabras clave: fertilizante; fosfito diácido de potasio; agentes reductores.

Recibido: marzo 2017

Aceptado: octubre 2017

1. Introducción

La población mundial está aumentando considerablemente y según registros de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) estima que esta tendencia continuará en las próximas décadas debido al crecimiento demográfico en los países en vía de desarrollo. Mientras esto sucede, la disponibilidad de la tierra para el

* Autor para correspondencia

Correo-e: belenparicaguan@gmail.com (Belén Paricaguán)

cultivo disminuye vertiginosamente, necesitando la agricultura suelos más fértiles que puedan mantener las condiciones favorables de productividad que se precisa para satisfacer las necesidades en materia de alimentación de la población global. En esas circunstancias, actualmente es conveniente la utilización de fertilizantes más eficaces para la obtención de altos rendimientos en los cultivos y además que aporten condiciones favorables a la incidencia de las plagas y enfermedades sobre las plantas [1].

Existen diferentes tipos de fertilizantes que están destinados a cubrir los nutrientes necesarios de diversos suelos y cultivos definidos por su contenido de fósforo (P), nitrógeno (N) y potasio (K), macroelementos primarios y esenciales en la vida vegetal [2]. De los fertilizantes a base de potasio, emergen los fosfitos potásicos, los cuales aportan dos de los principales elementos esenciales como son el P y K, los cuales ofrecen mayores ventajas que los fosfatos al poseer propiedades fungicidas, es decir, proporcionan protección ante los ataques de los hongos a los cultivos [3].

En este sentido, el fosfito puede inhibir el crecimiento y la esporulación de microorganismos patógenos, actuando como una toxina sobre los hongos, igual que la mayoría de los fungicidas. Sin embargo, el fosfito también podría provocar un aumento de las sustancias de defensa de las plantas, lo que no sucede con la mayoría de los productos comercializados como fungicidas. Estos compuestos son las fitoalexinas, que en muchos cultivos, especialmente de frutas y hortalizas, muestran acción fisiológica positiva desde el punto de vista de fitosanitario natural, lo que lleva a una mayor resistencia de las plantas y por lo tanto, de carácter preventivo, actuando indirectamente sobre el agente patógeno [3].

Además de la diferencia entre la estructura molecular del fosfito y del fosfato, poseen una marcada diferencia biológica. El fosfito es muy soluble en agua y al ser muy activo en la planta es fácilmente absorbido por la misma tanto a través de las raíces como de las hojas [3].

Los microorganismos del suelo son capaces de asimilar fosfitos y liberar fosfatos, ganando energía y nutrientes durante la conversión biológi-

ca. Debido a la gran solubilidad del fosfito, cuando se aplica al suelo, éste es más disponible para los microorganismos y a las raíces de las plantas al ser absorbido que el fosfato. La oxidación biológica del fosfito ocurre gradualmente, pero en menor cantidad [4].

El fosfito diácido de potasio (KH_2PO_3), gracias a la particular forma en la que se presenta el elemento P (ion fosfitodiácido, H_2PO_3^-), es capaz de producir un rápido estímulo en importantes procesos metabólicos de las plantas, implicados en la superación del estrés ambiental, patológico y nutricional. El empleo de los fosfitos potásicos, ayuda a la planta a crear unas estructuras y condiciones que la hacen menos sensible a los ataques de aquellos patógenos [3].

El KH_2PO_3 posee el mismo mecanismo de aplicación que los fosfatos, no obstante una vez en la planta, éste tiene la ventaja de reaccionar en menor medida con los minerales del suelo y las hierbas que causan daño a los cultivos (malezas) no la pueden usar, por lo tanto, queda disponible un mayor porcentaje de P para la planta. Con el uso del fosfito, no sólo se aportan los nutrientes esenciales para las plantas, sino que también se reduce el costo de producción y la necesidad de aplicar herbicidas, que a largo plazo puede ser tóxico. Por tal motivo, los fosfitos permiten minimizar la aplicación de fertilizantes, ya que esta forma fosforada reacciona en menor medida con el medio, como los microorganismos, y hace que las plantas metabolicen el fosfito a través de un proceso de oxidación y puedan absorber en gran cantidad el fosfato presente; contribuyendo en gran medida en los aspectos económico y ambiental [4].

Debido a su doble carácter de transportador de nutrientes e inductor de resistencia, el fosfito puede considerarse como un “comodín” en la agricultura moderna, una herramienta de fundamental importancia, que el productor puede utilizar para corregir las deficiencias de nutrientes de forma rápida y eficiente en los cultivos, y evitar la acción de los hongos, resultando en una mayor productividad, calidad y longevidad de la plantación [3].

En Venezuela, los fertilizantes mayormente

producidos son la urea y el amoníaco, como compuestos nitrogenados y los fosfatos como los compuestos que aportan el fósforo necesario para los cultivos. Es de resaltar que en el país no se producen fertilizantes a base de fosfitos, pero actualmente la Compañía Anónima Venezolana de las Industrias Militares (CAVIM) se encuentra desarrollando alternativas tecnológicas para la obtención de fertilizantes líquidos basados en fosfito diácido de potasio con la finalidad de ofrecerle a los productores nacionales un producto para que aprovechen al máximo las ventajas del fosfito de potasio en aras del incremento de la productividad de sus cosechas [5]. En virtud de lo señalado y en correspondencia al área de interés del Laboratorio de Polímeros del Centro de Investigaciones Químicas (CIQ) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, se planteó como objetivo fundamental de esta investigación obtener y caracterizar un fertilizante, como el fosfito diácido de potasio, mediante la utilización de agentes reductores metálicos, en la búsqueda de mejorar las condiciones fitosanitarias y la superficie dedicada a la agricultura en términos de nutrientes esenciales, para que así conlleve a un incremento de la productividad.

2. Metodología

Los fertilizantes caracterizados, fueron obtenidos en un sistema de reacción constituido por el H_3PO_4 y el agente reductor, empleándose recipientes de polietrafluoroetileno (teflón) con capacidad de 100 mL, para llevar las condiciones hidrotermales de la síntesis; los agentes los cuales arrojaron mayores beneficios reductores son el Zn y el Mg, además se incorporó un medio acidificante en la misma, proporcionado por el ácido acético. Estos recipientes se colocaron en la estufa, a las condiciones de operación de 165 °C de temperatura, durante un periodo de 60 a 70 horas de reacción [6].

El sólido obtenido al finalizar la reacción, con cada agente reductor, se lavó con agua destilada, descartándose por decantación las especies insolubles. Al medio acuoso obtenido se le añadió hidróxido de potasio (KOH), agitando vigorosamente y monitoreando el pH tras la adición.

Luego, se aplicó una prueba de identificación cualitativa para determinar la presencia del grupo fosfito por medio de la reacción con solución de nitrato de plata ($AgNO_3$) 0,1 N [6]. Una vez obtenido los productos fertilizantes basados en el fosfito diácido de potasio, utilizando los agentes reductores Zn y Mg, fueron caracterizados por medio de los métodos que se detallan a continuación.

2.1. Determinación de las características físico-químicas del fertilizante fosfito diácido de potasio

Para la caracterización de los productos obtenidos se realizaron las siguientes pruebas:

2.1.1. Determinación del pH

Para la determinación del pH del fosfito diácido de potasio, se colocaron 50 mL de la muestra homogénea en un vaso de precipitado previamente lavado y curado; luego se introdujo el electrodo del pH-metro de marca Orión, modelo 410 A con apreciación 0,01 adimensional, y aguardando un tiempo de estabilización, se observó el valor de la muestra arrojado por el equipo, siguiendo el procedimiento establecido en la norma COVENIN 2462-2002 [7].

2.1.2. Determinación de la conductividad eléctrica

En la determinación de la conductividad del fertilizante, se colocaron 100 mL de la muestra homogénea en un vaso de precipitado y se introdujo el electrodo del conductímetro marca Orión con apreciación 0,1 $\mu S/cm$, previamente calibrado siguiendo el procedimiento COVENIN 3050-93 [8].

2.1.3. Determinación de la densidad

En la determinación de la densidad del fertilizante, primeramente se pesó un picnómetro vacío de 10 mL de capacidad, previamente limpio y seco, en una balanza analítica marca OHAUS de la serie Adventurer, modelo AR2140 de apreciación 0,0001 g. Luego se llenó el picnómetro con una muestra del fosfito diácido de potasio, y se pesó

nuevamente en la balanza. Con la diferencia de los valores antes obtenidos entre el volumen analítico del instrumento se estimó la densidad [9].

2.1.4. Determinación del fósforo total en fertilizantes

Para determinar el contenido de fósforo total en el fertilizante obtenido, se empleó el método espectrofotométrico de molibdovanadofosfato, descrito en la norma del método oficial 958.01 de la Asociación de Químicos Analíticos Oficiales (AOAC, según sus siglas en inglés), que consistió en lo siguiente:

Preparación de la solución de molibdovanadato de amonio. Se disolvieron completamente 5 g de molibdato de amonio $[(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ en 50 mL de agua caliente y se dejó enfriar hasta la temperatura ambiente. Por otro lado se disolvió 0,2500 g de metavanadato de amonio (NH_4VO_3) en 35,00 mL de agua caliente y se dejó enfriar a las mismas condiciones anteriores, luego se adicionó 60,00 mL de ácido perclórico (HClO_4) al 70 % a la solución. Posteriormente se adicionó gradualmente la solución de molibdato a la solución de vanadato con constante agitación y por último se trasvasó a un balón aforado de 250 mL y se completó con agua destilada hasta el aforo [10].

Preparación de los estándares de calibración: se prepararon siete (7) soluciones de 100 mL de KH_2PO_4 (52,15 % P_2O_5) que contenían de 0,4 a 1,0 mg de P_2O_5 por mililitro (mL). Una vez preparadas, se tomó una alícuota de 5 mL de cada una de las 7 soluciones en balones aforados de 100 mL y se le adicionó 20 mL de la solución molibdovanadato, continuamente se completó hasta el aforo. Finalmente se obtuvo estándares de 20; 25; 30; 35; 40; 45 y 50 ppm respectivamente [10].

Preparación de la muestra. Se tomó aproximadamente 1 g de la muestra del fertilizante se disolvió en un volumen adecuado para que la concentración de la solución esté entre 400 y 1000 ppm. Se tomó 5,00 mL de esta solución y se trasvasó a un balón

aforado de 100 mL, adicionando en él 20,00 mL de la solución molibdovanadato. Luego se aforó con agua destilada [10].

Curva de calibración: antes de hacer las mediciones para la curva de calibración, inicialmente se realizó un barrido espectrofotométrico con todos los estándares, para verificar la longitud de onda en la que se produce la máxima absorción del complejo y fijarla para las mediciones posteriores.

Se colocó el espectrofotómetro Diode Array Spectrophotometer Hp a la longitud de onda establecida, 380 nm y se ajustó a cero de absorbancia (0 A), con la solución estándar que contiene 20 ppm introducida en la celda de adsorción o cuba, siendo este el blanco de la técnica. Luego se llenó la celda con la solución de 25 ppm y se determinó la absorbancia. Este procedimiento, se utilizó con los otros estándares preparados. Finalmente se graficó la absorbancia en función de la concentración en ppm [10].

Determinación de la concentración de fosforo total en la muestra. Se llenó la celda con la solución de la muestra y se midió la absorbancia. Con la curva de calibración se determinó la concentración de la misma.

2.1.5. Determinación de la cantidad de fosfitos en la muestra

Para la determinación de la cantidad de fósforo como fosfito en el fertilizante, se usó el método de oxidación con yodo, una técnica de óxido-reducción. Para esto se dispuso de un matraz erlenmeyer de 250 mL provisto de tapón esmerilado, en el cual se colocaron 25 mL de solución buffer de pH cercano a la neutralidad. Posteriormente se agregaron 25 mL de solución del fertilizante, provenientes de una dilución 1:100 de la muestra, se agitó y se añadieron 50 mL de una solución de yodo de concentración aproximada 0,1 N, que fue previamente preparada. Se tapó y agitó suavemente, se dejó en la oscuridad durante una hora.

Luego se agregaron 5 mL de CH_3COOH 6 N y se valoró el exceso de yodo contenido en la

solución, con solución de tiosulfato de sodio 0,1 N, usando una solución de almidón como indicador.

2.1.6. Determinación del contenido de metales en el fertilizante

Para la determinación del contenido de metales (Zn, Mg y K) en el fertilizante se empleó el método de determinación de metales por plasma de inducción acoplada (ICP) descrito en la Norma internacional Standard Methods 3120-B 2005 [11], en el equipo ICP marca Perkin Elmer. Empleando para el análisis 1 mL de solución del fertilizante de aproximadamente 100 mg/L, el cual se preparó en un balón aforado de 100 mL, completando el resto del volumen hasta enraizar con agua ionizada.

2.1.7. Análisis de varianza

Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA), unifactorial, para determinar las diferencias significativas que pudiese existir entre los resultados de las propiedades caracterizadas de los fertilizantes obtenidos mediante los dos agentes reductores metálicos estudiados. Para la separación de medias se aplicó la prueba de Fischer, con un nivel de confianza del 95 % ($p \leq 0,05$).

3. Resultados y discusión

En la Tabla 1, se muestra los resultados de la caracterización de los fertilizantes a base de KH_2PO_3 preparados.

Tabla 1: Características fisicoquímicas del fosfito diácido de potasio obtenido.

Parámetros	Agentes Reductores	
	Zn	Mg
Densidad ($\rho \pm 0,0001$) g/mL	1,2280	1,2032
Conductividad (CE $\pm 0,01$) dS/m	1,31	1,29
pH (pH $\pm 0,01$) adim	9,60	9,78
Fósforo ($\text{P}_2\text{O}_5 \pm 0,01$) % p/p	27,56	27,22
Potasio ($\text{K}_2\text{O} \pm 0,01$) % p/p	20,34	19,52
Cinc (Zn $\pm 0,01$) % p/p	0,40	-
Magnesio (Mg $\pm 0,01$) % p/p	-	0,38
Porcentaje del ion fosfitodiácido ($\%\text{H}_2\text{PO}_3^- \pm 0,01$) % p/p	5,64	5,61
Fósforo equivalente como ion fosfitodiácido, en función del fósforo total ($\%\text{P}_2\text{O}_5 \pm 0,01$) %	17,93	18,06

La densidad de los fertilizantes preparados con Zn y Mg como agentes reductores fueron de 1,2280 g/mL y 1,2032 g/mL respectivamente, estos valores se encuentran en el rango tolerable según la norma Colombiana ICONTEC NTC 5167 [12], la cual establece valores aceptables de densidad mayores a 1 g/mL para ser utilizado como fertilizantes del tipo PK. Adicional a lo anterior, Duggan y Melgar (2015) [13], exponen que la densidad de los fertilizantes líquido es de suma importancia para llevar a cabo la dosificación, es un factor a tener en cuenta en el manejo de la siembra y cultivo.

Otra propiedad de importancia a nivel de la aplicación de los fertilizantes en los cultivos, es la conductividad (CE) la cual tuvo un valor en los mismos de 1,31 dS/m y 1,29 dS/m, utilizando Zn y Mg respectivamente. Ahora bien, la norma Colombiana ICONTEC NTC 5167 [12], establece que los agroquímicos no deben poseer valores de CE mayores a 4 dS/m, ya que de ser así se restringe su uso. Por lo expuesto, se dice que los fertilizantes obtenidos poseen valores adecuados para su utilización y que la conductividad adquirida, es favorable para el desarrollo del sabor durante el período de maduración de los frutos, permitiendo a la planta el poder de absorber y retener más agua [14]. Unos de los requisitos indispensables para lograr eficiencia en el sistema agua-suelo-planta es una baja salinidad, medida por la conductividad eléctrica (CE) de la solución fertilizante [14]. Por tanto una baja conductividad arroja una menor salinidad en la formulación. También en base a la CE se puede estimar de forma aproximada la presión osmótica, por lo que indica que a menor presión osmótica, menor probabilidad de daño foliar; en consecuencia, es deseable un producto que logre la menor conductividad eléctrica posible, siendo un valor de seguridad para la aplicación [15].

En cuanto al pH de los fertilizantes, según ICONTEC NTC 5167 [12] el rango favorable de pH sobre el que crecen vigorosamente la mayor parte de las plantas cultivadas oscila entre 6,0 a 7,0; es decir, se habla de suelos ligeramente ácidos o neutros, debido a la gran variedad y versatilidad de los tipos de cultivos y suelos. Este hecho es

debido a que la mayor parte de las sustancias nutritivas para las plantas, presentes en la solución del suelo, son fácilmente asimilables o absorbidos por las raíces en el intervalo anteriormente mencionado. Aunque es permisible hasta un pH de 9 según dicha norma, para suelos y tipos de cultivos específicos. Navarro y Navarro (2003) [2], afirma que la disponibilidad de los nutrientes depende del pH, por esto la aplicación de este fertilizante obtenido depende del suelo y el cultivo al cual se suministre.

Los fertilizantes están constituidos por nutrientes o elementos esenciales que promueven el correcto crecimiento y desarrollo de las etapas vegetativas de la planta, por tal motivo es necesario conocer su contenido nutricional a la hora de aplicar un producto fertilizante. En este sentido, el contenido de los macronutrientes principales P y K en los productos obtenidos se reportan en la Tabla 1, expresados en porcentaje peso/peso anhídrido fosfórico (%p/p P_2O_5) y porcentaje peso/peso óxido de potasio (%p/p K_2O), los cuales se ajustan a lo establecido por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación y la Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes (2002) [15], que señalan que el contenido de estos elementos deben presentarse entre (6-30) %p/p para ser aplicados como fertilizantes multinutrientes de tipo PK.

El fósforo es necesario para el crecimiento de las plantas y participa en los procesos metabólicos, tales como la fotosíntesis, la transferencia de energía y la degradación de los carbohidratos, satisfaciendo los requerimientos nutricionales de los cultivos.

Según Manahan, A. (2007) [16] señala que las plantas en crecimiento utilizan niveles relativamente altos de potasio. El potasio activa algunas enzimas y desempeña un papel en el equilibrio del agua en las plantas. También es esencial para algunas transformaciones de carbohidratos.

Ahora bien, el contenido de Zn obtenido fue de 0,40 % p/p, de acuerdo a [17], este porcentaje se encuentra dentro del contenido tolerable declarado por la misma, esta expone un porcentaje mínimo de 0,01 %p/p y un máximo permisible de 0,5 %p/p, específicamente para fertilizantes líquidos con

contenido de Zn como microelemento mineral aportado al suelo.

El Zn es necesario en pequeñas cantidades en el cultivo, sea para la síntesis de ciertas proteínas, para formación de clorofila, conservación de almidón en azúcares entre otros aportes en el desarrollo de las plantas [18].

El magnesio es un nutriente esencial para las plantas. Es clave para una amplia gama de funciones en los vegetales, como en las reacciones enzimáticas relacionadas a la transferencia de energía de la planta. Uno de los papeles bien conocidos del magnesio se encuentra en el proceso de la fotosíntesis, ya que es un componente básico de la clorofila [2].

El porcentaje del ion $H_2PO_3^-$ obtenido con Zn y Mg fue de 5,64 %p/p y 5,61 %p/p respectivamente. Es de resaltar, que la principal función de los fosfitos de potasio es la de activar algunas defensas naturales de las plantas (Fitoalexinas) para proteger a los cultivos contra hongos patógenos como Oomicetos, Phytophthora, plasmopora entre otros. Estudios científicos avalan esta efectividad elicitora y fungicida.

Asimismo no es obligatorio declarar el origen del $\%P_2O_5$, es decir, la especiación química no es regulada en ninguna norma, se podría mezclar fosfato con fosfito y declarar todo el contenido de fósforo como P_2O_5 , sin especificar qué proporción, proviene del fosfato o fosfito. El fosfito es el único que tiene actividad elicitora y fungicida, por tanto, el ideal es que el 100 % del P_2O_5 reportado, sea por causa del fosfito, no del fosfato. Por lo dicho, el producto obtenido usando Zn como agente reductor posee un 27,56 %p/p P_2O_5 de fósforo total, en el cual un 17,93 % de ese contenido proviene del fosfito; de manera análoga el fertilizante obtenido con Mg como agente posee un 27,22 %p/p P_2O_5 de fósforo total, en el cual un 18,06 % de ese contenido proviene del fosfito.

A los resultados obtenidos del porcentaje del ion fosfito diácido en los fertilizantes preparados se le fue aplicado un análisis de varianza (ANOVA) tomando como factor de estudio el tipo de agente reductor empleado. Para estos resultados no fueron detectadas diferencias significativas entre los fertilizantes obtenidos utilizando los

agentes reductores Zn y Mg, representando que estos agentes analizados pueden ser utilizados para la preparación de fertilizantes basados en el fosfito diácido de potasio, sin ningún tipo de inconveniente.

4. Conclusiones

En virtud de todos los señalamientos precedentes, se estableció que los productos basados en el fosfito diácido de potasio preparados, disponen de las características fisicoquímicas adecuadas para ser empleados como fertilizantes, debido a que reúne las condiciones para satisfacer los requerimientos nutricionales de los cultivos.

Agradecimientos

Al FONACIT por el financiamiento recibido a través del proyecto N° 2011001269, el cual permitió sufragar parte de los costos involucrados para la realización de este trabajo y al personal docente y técnico que labora en el Laboratorio de Polímeros y Derivados Petroquímicos del Centro de Investigaciones Químicas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo por su apoyo en el desarrollo de esta investigación.

Referencias

- [1] R. Guerrero. *Manual técnico: propiedades generales de los fertilizantes*. Monómeros Colombo Venezolanos S. A., Colombia.
- [2] S. Navarro y G. Navarro. *Química Agrícola*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España, 2^{da} edición, 2003.
- [3] O. Rubilar y A. Balbontin. Biorend-fosfito: su química y bioquímica. Informe técnico, Bioaro S. A., 2009.
- [4] C. J. Lovatt and R. L. Mikkelsen. Phosphite fertilizers: What are they?. can you use them?. what can they do? *Better Crops*, 90(4):11–13, 2006.
- [5] J. Bastidas. Estudio de factibilidad técnica para la producción de fosfato de potasio en La Compañía Anónima Venezolana de Industrias Militares (CAVIM) en la gerencia de producción y servicios Morón, Estado Carabobo. Informe de pasantías, Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional, Núcleo Carabobo, Valencia, Venezuela, 2014.
- [6] Alexander Núñez y Ana Rodríguez. Obtención de un fertilizante basado en el fosfito diácido de potasio mediante el uso de diferentes agentes reductores. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2016.
- [7] COVENIN 2642-2002, Aguas naturales, industriales y residuales. Determinación del pH. COVENIN, 2002.
- [8] COVENIN 3050-1993, Aguas naturales, industriales y residuales. Determinación de conductividad eléctrica. COVENIN, 1993.
- [9] Sartorius. *Manual of weighing applications. Part 1. Density*. Sartorius, 1999.
- [10] COVENIN 3010-1993, Aceites lubricantes y aditivos. Determinación de fósforo. COVENIN, 1993.
- [11] APHA, AWWA, and WEF. 3120 B. Inductively coupled plasma (ICP) method. In *Standard methods for the examination of water and waste water*, pages 3.34–3.40. American Public Health Association, Washington, 2005.
- [12] NTC 5167, Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. Icontec Internacional, 2004.
- [13] T. Duggan y R. Melgar. *Manual de fertilizantes fluidos : ¿cómo optimizar el uso de fertilizantes fluidos en Argentina y agro-sistemas sudamericanos?* Fluid Fertilizer Foundation, Buenos Aires, Argentina, 2014.
- [14] Pieter Klaassen. La importancia de la conductividad eléctrica. <https://goo.gl/Mu1GKd>. Consulta: 2016, Febrero, 24.
- [15] FAO and Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes. *Los fertilizantes y su uso*. FAO, Roma, cuarta edición, 2002.
- [16] Stanley E. Manahan. *Introducción a la Química Ambiental*. Editorial Reverté S.A., México, 2007.
- [17] L. González. Evaluación de metodologías utilizadas en Venezuela para el análisis fósforo en fertilizantes comerciales. Trabajo Especial de Grado, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, Maracay, Aragua, Venezuela, 1991.
- [18] Marcos Galindez. Evaluación de metodologías utilizadas en Venezuela para determinar potasio, calcio y magnesio en fertilizantes comerciales. Trabajo Especial de Grado, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, Maracay, Aragua, Venezuela, 1991.

Determination of constructive operation performances fitted to probability distributions by manual simulation means

Gustavo Guerra, Anahyl Tortosa, Francisco Soto, Reny Marin*

Departamento de Estructuras, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Abstract.-

This research aims to evaluate runtimes for constructive activities to determine statistical factors that will facilitate the development of a methodology of simulation of the processes mentioned above and therefore to obtain adapted performances to reality. For this, activities for preparation and placement of reinforcing steel in structural elements were defined and divided with their respective tasks, taking real runtimes, and a statistical study was developed applying different frequency distributions such as: Normal, Lognormal, Exponential, Beta, Triangular and uniform distribution fitted under certain tests for goodness-of-fit such as: Chi Square and Kolmogorov-Smirnov, to obtain in this way the probability curve that best fits to the analyzed tasks' times. Later, the random numbers were generated that will serve to develop the methodology of simulation in future studies and therefore to obtain adapted results to the reality of work for every company that wants to obtain a more accurate planning of runtimes for constructive activities.

Keywords: performances; simulation; for constructive activities.

Determinación de rendimientos de operaciones constructivas ajustadas a distribuciones de probabilidad mediante simulación manual

Resumen.-

El presente trabajo tiene como finalidad evaluar tiempos de ejecución de actividades constructivas para determinar estadísticos que facilitaran el desarrollo de una metodología de simulación de dichos procesos y así obtener rendimientos adaptados a la realidad. Para esto se definieron actividades de preparación y colocación de acero de refuerzo en elementos estructurales divididas con sus respectivas tareas tomándose tiempos reales de ejecución de las mismas y se realizó un estudio estadístico aplicando distintas distribuciones de frecuencia como lo son: La distribución Normal, Lognormal, Exponencial, Beta, Triangular y uniforme, ajustadas bajo ciertas pruebas de bondad de ajuste tales como: Chi Cuadrado y la prueba de Kolmogorov-Smirnov para obtener de esta manera la curva probabilística que más se ajusta a los tiempos de las tareas analizadas. Posteriormente se generaron los números aleatorios que servirán para desarrollar en futuros estudios la metodología de simulación y de esta manera obtener resultados adaptados a la realidad de trabajo de cada empresa que desee obtener una planificación más certera de los tiempos de ejecución de una obra.

Palabras clave: rendimientos; simulación; procesos constructivos.

Recibido: julio 2017

Aceptado: noviembre 2017

1. Introducción

En la planificación y ejecución de obras, es necesario el uso de herramientas para la toma de decisiones que optimicen los procesos constructivos, de manera de cumplir con los requerimientos

* Autor para correspondencia

Correo-e: renymarin1972@gmail.com (Reny Marin)

establecidos de tiempo de finalización, calidad y costos. Para esto es necesario evaluar la elección de procesos y sistemas constructivos, así como las características de los recursos a utilizar, como lo son los materiales, las maquinarias y las cuadrillas de mano de obra [1]

Esto se hace mediante la revisión de factores como la disponibilidad de los recursos, la capacitación de la mano de obra, las condiciones físicas de la obra, y sobre todo los rendimientos que se consigan en cada proceso constructivo. Lo recomendado en la gerencia de obra es generar simulaciones de los procesos para determinar la causa de los retrasos y aumento de precio de las actividades.

Basados en esta premisa, se desarrolló una metodología para simular operaciones de construcción partiendo del cálculo de rendimientos por medio de datos tomados en campo ajustados a distribuciones de frecuencia.

Para realizar esta simulación se utiliza el Sistema CYCLONE (CYCLic Opreations Network System), el cual fue desarrollado por el Dr. Daniel Halpin [1] y que se basa en tres estados temporales básicos en que se puede encontrar cualquier recurso: estado activo o de procesamiento, estado pasivo o de espera, y transición entre estados. La representación de estos estados otorga un formato gráfico para la construcción del modelo, el cual transcribe a un lenguaje computacional en el proceso de simulación.

Siguiendo la convención de representar el estado activo con un cuadrado, el pasivo con un círculo y los arcos de unión con flechas, se definen los elementos que se usan en la modelación de operaciones de construcción con el sistema CYCLONE.

El sistema CYCLONE permite representar los tiempos durante el cual las unidades están involucradas con las secuencias de tareas, determinar los tiempos ociosos de los recursos y la influencia sobre la productividad de las diferentes distribuciones de recursos, de modo que la gerencia pueda planificar y controlar la operación de construcción. Finalmente, es posible determinar la carga de trabajo asignada a recursos específicos de equipo y mano de obra, de modo que puedan hacerse

valoraciones representativas de los niveles de calidad de trabajo que puedan lograrse.

2. Marco teórico de la investigación

2.1. Operación de construcción

Una operación de construcción es, según Halpin [1], un conjunto de actividades que a su vez están formadas por una colección de tareas que son procesos que abarcan el uso de los recursos dentro de un formato tecnológico o metodología para el logro de los componentes físicos de la construcción. La descripción completa de las operaciones de construcción requiere la identificación de las tecnologías empleadas, la numeración y la secuencia de las tareas y la enumeración y ubicación de los recursos requeridos.

En lo anterior descrito, una tarea se refiere a la identificación y asignación de las porciones elementales del trabajo a los agentes de campo. Finalmente, una tarea es el elemento más básico de los procesos y operaciones y así, varias tareas forman una actividad.

2.2. Planificación y control de obra

Ahora bien, según Abreu y Dakak [2] es comprobable que una buena planificación asegura que cada tarea tenga la oportunidad de ser ejecutada adecuadamente, en el lugar apropiado y en el momento oportuno. Es decir, la planificación tiene como propósito principal lograr el cumplimiento de un objetivo con la mínima interferencia producida por eventos que puedan retrasar o detener su logro.

Sin duda la gerencia proyecta el uso eficiente de los recursos para el logro de la producción en el tiempo programado y con la calidad aceptable. A nivel de la operación de construcción los recursos son la mano de obra, equipos y materiales.

En efecto las características básicas de un proyecto y su impacto sobre la selección de los métodos de construcción y requerimiento de equipos son considerados en las etapas de planificación y estimado del proceso de construcción. Estas decisiones iniciales establecen el marco para las operaciones de construcción en campo. La gerencia entonces espera que los agentes de campo

trabajen dentro de los parámetros establecidos y que suplan la habilidad y el conocimiento requerido para cada operación de construcción.

Usualmente existen diversas tecnologías que describen la metodología y la manera en que estos recursos serán empleados para cada tarea. La tecnología seleccionada depende de una serie de factores tales como las condiciones del sitio, cantidades involucradas, disponibilidad de equipos, destreza de las cuadrillas y tiempos disponibles, y cada tecnología conduce a variaciones de la manera de lograr el cometido.

Es evidente que el interés de la gerencia de asegurar que el proyecto se cumpla en el tiempo y dentro del presupuesto asignado. El problema básico de la gerencia de construcción a nivel de obra es la apropiada y oportuna ubicación y aplicación de los recursos a las operaciones en sitio a lo largo de la vida del proyecto.

2.3. Rendimientos

En todo caso cuando se trata de la programación de las actividades, es necesario recurrir al tema de los rendimientos, puesto que la duración de una labor, tarea, trabajo, depende de la rapidez con que esta se realice, siendo el rendimiento la cantidad de unidades realizadas en una unidad de tiempo. Lo ideal sería que todas las actividades de la construcción se hicieran tan rápidamente como se quisiera, pero existen factores que pueden evitar que los recursos estén disponibles en el tiempo óptimo y limitar la velocidad del proceso.

Algunos de los factores son la dificultad o ineficiencia del proceso constructivo, suministro y dotación de material, disponibilidad de máquinas y equipos, capacidad del personal, factores climáticos, imprevistos como interrupción de los servicios públicos, etc.

Atendiendo estas consideraciones, estimar los rendimientos es esencial para cualquier decisión de la gerencia en la etapa de planificación y control de obra, por lo que resulta preciso la inspección y conducción del personal para la buena ejecución de las actividades, además del control de los rendimientos de cada jornada, para generar los ajustes que sean necesarios.

2.4. Simulación

Una herramienta de gran uso y que va a permitir tomar decisiones en la planificación es la simulación ya que a través de esta se van a poder detectar cualquier tipo de fallas que se presentes en un proyecto.

De manera global, la simulación es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo de un sistema o proceso y conducir experimentos, involucrando ciertos tipos de modelos matemáticos, con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar estrategias con las cuales se puede operar el sistema a través de largos periodos de tiempo.

Al realizar un experimento de simulación, se introducen valores de entrada probabilísticos generados aleatoriamente y se utiliza el modelo para calcular los resultados.

2.5. Tiempos de duración para simulación

Los valores de entrada para una simulación se deben ajustar a tiempos reales medidos en campo o estimaciones. Los tiempos de tránsito de las tareas determinan los lapsos durante los cuales los recursos son usados en una tarea.

Según Abreu y Dakak [?] estos tiempos se ven influenciados por factores como:

1. La magnitud del trabajo realizado en la tarea
2. Tamaño y eficiencia de los equipos
3. Extensión del uso de mano de obra. La composición de la cuadrilla, la intensidad del esfuerzo físico y la motivación.
4. Ambiente físico del sitio de trabajo, condiciones de trabajo, horario, clima.
5. Eficiencia del control y dirección de la obra

Como método para la medición de tiempos en campo, el cronometrado es la técnica más utilizada para establecer los tiempos normales de ejecución de tareas. Existen dos técnicas para realizar una medición de cronómetro:

Método continuo: consiste en poner en marcha el cronómetro en el momento de comienzo del estudio y detenerlo en el momento que se concluya este.

Método intermitente: consiste en activar el cronómetro al comienzo del estudio y cada vez que finalice un elemento se detiene y se devuelve la

lectura a cero, obteniéndose así la duración de cada elemento.

2.6. Distribuciones de probabilidad

Para la aplicación del sistema CYCLONE se tomó en consideración las distribuciones de probabilidad que aporta el Dr. Daniel Halpin [1] y que representan la mayoría de las distribuciones de tiempos probabilísticos en operaciones de construcción.

Dado que la dificultad implícita es conocer los tiempos de ejecución de las tareas y las distribuciones de probabilidad de esos tiempos para operaciones típicas de construcción es que se desarrolla esta investigación tomando tiempos de ejecución de tareas propias de cada actividad que forma la operación de construcción seleccionada.

2.7. Distribución normal

La distribución normal, también llamada distribución de Gauss o distribución gaussiana, es la distribución de probabilidad que con más frecuencia aparece en estadística y teoría de probabilidades.

Esto se debe a dos razones:

Su función de densidad es simétrica y con forma de campana, lo que favorece su aplicación como modelo a gran número de variables estadísticas.

Es además límite de otras distribuciones y aparece relacionada con multitud de resultados ligados a la teoría de las probabilidades gracias a sus propiedades matemáticas.

2.8. Distribución beta

En estadística la distribución beta es una distribución de probabilidad continua con dos parámetros de forma (a y b) y que se asemeja a la Distribución Normal.

2.9. Distribución exponencial

En estadística la distribución exponencial es una distribución de probabilidad continua con un parámetro $\lambda > 0$.

2.10. Distribución uniforme

En estadística la distribución uniforme es una distribución de probabilidad continua con dos parámetros a y b , que pueden estar representados en caso discreto o en caso continuo.

2.11. Distribución lognormal

En probabilidad y estadística, la distribución lognormal es una distribución de probabilidad de cualquier variable aleatoria con un logaritmo normalmente distribuido (la base de una función logarítmica no es importante ya que $\log_a(X)$ está distribuida normalmente si y solo si $\log_b(X)$ está distribuida normalmente). Si X es una variable aleatoria con una distribución normal, entonces $\exp(X)$ es una distribución lognormal. Una variable puede ser modelada como lognormal si puede ser considerada como un producto multiplicativo de muchos pequeños factores independientes

2.12. Distribución triangular

Se denomina así por el hecho de que la función de densidad tiene una forma triangular y es definida por dos parámetros, que representan el valor mínimo y el valor máximo de la variable. En este caso el triángulo es equilátero. Se denomina triangular G (triangular general), cuando viene dada por tres parámetros, que representan el valor mínimo y el valor máximo de la variable, y el valor del punto en el que el triángulo toma su altura máxima. En este caso el triángulo no es necesariamente equilátero.

2.13. Bondad de ajuste

Las pruebas de bondad de ajuste se utilizan para determinar si un conjunto de datos se ajustan a una distribución de probabilidades y con cual nivel de confiabilidad. En esta investigación se usaron la prueba de chi-cuadrado y la prueba de Komogorov-Smirnov

Para investigar si las frecuencias con las cuales ocurren los valores de una variable (frecuencias observadas) son parecidas a las que debieran tener de acuerdo con un determinado modelo de probabilidades (frecuencias esperadas), se hace una comparación entre ambas. Los valores de la variable pueden ser continuos y en este caso se

investiga la frecuencia o número de veces que ocurren aquéllos dentro de determinados intervalos o bien puede tratarse de valores discretos incluso nominales u ordinales.

Para ello necesitamos un método que nos permita decidir cuándo la discrepancia entre un conjunto de frecuencias observadas y su correspondiente conjunto de frecuencias esperadas de acuerdo con alguna hipótesis, pueden presentarse por la aleatoriedad del fenómeno, siendo cierta la hipótesis; o bien si dicha discrepancia es tan grande que es improbable que sea debida a la aleatoriedad y por lo tanto creemos que se debe a que la hipótesis no es cierta.

2.14. Chi-cuadrado

Alrededor de 1900 el matemático inglés K. Pearson propuso como medida de discrepancias entre frecuencias observadas y esperadas, el siguiente estadístico D (resulta una variable aleatoria al considerar muchas veces el mismo proceso de muestreo):

$$D = \sum \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (1)$$

Donde llamaremos O_i a la frecuencia observada en la clase, esto es, la categoría i ($i = 1, 2, \dots, 9$) y para cada clase o categoría, la hipótesis permite encontrar cuál es la frecuencia que se espera, que llamaremos E_i .

Pearson consideró teóricamente muchas repeticiones del proceso de muestreo y que en cada repetición se generaría un conjunto distinto de frecuencias observadas $\{O_i, \dots, O_h\}$, dando origen, para esa repetición, a un valor de D particular. De este modo se considera entonces un conjunto teórico infinito de valores de D, obtenidos de muchas muestras independientes, al considerar cierta hipótesis planteada. Este conjunto de D o población teórica de D presenta variación aleatoria. Los valores de las D no coinciden; sin embargo, si presentan regularidades estadísticas que se pueden resumir con su función de distribución a la que Pearson llamó distribución de χ^2 (Chi-Cuadrado).

2.15. Kolmogorov-Smirnov

La prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra se considera un procedimiento de “bondad de ajuste”, es decir, permite medir el grado de concordancia existente entre la distribución de un conjunto de datos y una distribución teórica específica. Su objetivo es señalar si los datos provienen de una población que tiene la distribución teórica especificada.

Mediante la prueba se compara la distribución acumulada de las frecuencias teóricas (f_t) con la distribución acumulada de las frecuencias observadas (f_{obs}), se encuentra el punto de divergencia máxima y se determina qué probabilidad existe de que una diferencia de esa magnitud se deba al azar. Al número de términos independientes del tipo $(O_i - E_i)^2 / E_i$ se le conoce como grados de libertad de la χ^2 . En general estos grados de libertad son el número de parámetros (p) que tenga la distribución de probabilidad a evaluar menos uno menos el número de categorías o número de intervalos obtenidos en la muestra (h) agrupados para que la frecuencia esperada sea mayor que 5.

A continuación se presentan los pasos a seguir para aprobar o rechazar la hipótesis planteada:

- Paso 1: Al efectuar nuestro experimento u observación obtenemos ciertas frecuencias observadas $\{O_i, \dots, O_h\}$.
- Paso 2: Considerando la hipótesis obtenemos las frecuencias esperadas E_i, \dots, E_h .
- Paso 3: La discrepancia entre estos dos conjuntos la medimos con la ecuación (1), esto será un valor único.
- Paso 4: Comparamos este valor único de D con la distribución teórica de los valores de D cuando la hipótesis es cierta. Esta comparación consiste en observar si nuestro valor de D del paso 3, es un valor “grande” indicando una discrepancia grande entre las frecuencias esperadas y las observadas, lo que nos conduciría a rechazar la hipótesis planteada. Sin embargo, para decidir cuándo un valor de D es grande, determinamos si

ese valor de D está entre los valores de D improbables en la distribución de χ^2 . De modo que la magnitud relativa de D la evaluamos en términos de la probabilidad de ocurrencia de una D como esa o mayor en la distribución de χ^2 (distribución teórica de valores de D).

Para dar una idea de la apariencia de la distribución de χ^2 y de los valores improbables de D en ella ($p < 0.05$ o $p < 0.01$) se presentan las distribuciones de χ^2 con 2 y con 10 gl. señalando en ambos casos las zonas de valores de D improbables, también llamada zona de rechazo de la hipótesis. Esto se debe a que, si el valor único de D que tenemos es grande y con pocas probabilidades ($p < 0,05$ o $p < 0.01$) de ocurrir si la hipótesis es cierta, automáticamente pasamos al Paso 5 y rechazamos la hipótesis.

- Paso 5: Rechazar la hipótesis si D es “grande”, con pocas probabilidades de ocurrir si la hipótesis es cierta. Se dice que hay diferencias significativas o bien no rechazar la hipótesis si D es “pequeño” con muchas ($p > 0.05$) probabilidades de ocurrir si la hipótesis es cierta. Se dice que no hay diferencias significativas.

La manera más sencilla de investigar si un valor de D está o no en la zona de rechazo de la hipótesis, es comparándolo con el valor de χ^2 de las tablas (con los grados de libertad correspondientes) que deja a la derecha un área de 0.05 (o 0.01). Así las reglas de decisión en el paso 5 del procedimiento son:

- Si $D \geq \chi_{h-r}^2, 0,05$ la hipótesis se rechaza, $p < 0.05$. Las discrepancias son significativas.

Donde $\chi_{h-r}^2, 0,05$ es el valor en las tablas de χ^2 que deja a la derecha valores de D con una probabilidad de 0,05, cuando se tienen $h - r$ grados de libertad.

- Si $D \leq \chi_{h-r}^2, 0,05$ la hipótesis no se rechaza, $p > 0.05$. Las discrepancias no son significativas.

3. Metodología de la investigación

La investigación se desarrolló en una obra en construcción en la etapa de estructura, en la que se identificaron diversas operaciones de construcción como son: excavación, encofrado, preparación de acero de refuerzo, colocación del concreto, desencofrado y curado de los elementos vaciados. De todas estas operaciones se determinó que la que presentaba la mayor uniformidad de ejecución era la actividad *preparar refuerzo de acero longitudinal para armado de vigas* formada por tareas que van desde la selección de las barras, su corte a medida, preparación, hasta el doblado y armado en elementos que al colocarse en sitio formarían parte de columnas, vigas y losas de la estructura.

Esta uniformidad en la ejecución en campo permite controlar la medición de tiempos de ejecución de cada tarea, desde la toma de la barra de la pila, su colocación en la máquina de corte, traslado al sitio de doblado y ensamblaje de la pieza final.

Una vez realizada la toma en sitio de los tiempos de ejecución de las actividades seleccionadas se procederá a ordenarlos de menor a mayor para luego agruparlos en rangos de intervalos de clase en forma de histograma. A continuación se enumeran los pasos a seguir para de la metodología planteada [3]:

1. Determinar el Rango (R) de los datos el cual es igual a:

$$R = D_M - D_m \quad (2)$$

Donde:

D_M : Dato Mayor

D_m ; Dato menor

2. Obtener el número de clases (N_c).

$$N_c = 1 + 3,322 \log(n) \quad (3)$$

Donde n : tamaño de la muestra

3. Determinar la Amplitud (A_s) o longitud del intervalo como el cociente del rango entre el número de clases.

$$A_s = \frac{R}{N_c} \quad (4)$$

4. Calcular los parámetros estadísticos tales como la media, desviación estándar, moda y la varianza.
5. Definir los intervalos de clases y registrar tanto las frecuencias observadas como las relativas.
6. Graficar el histograma y someter a estudios estadísticos, para analizar a partir de las diferentes distribuciones de frecuencia cuál de las funciones probabilísticas definen la población. Las distribuciones son: Distribución Normal, Lognormal, Exponencial, Beta, Triangular y Uniforme debido a que estas son curvas con las que mejores se adaptan a actividades de procesos constructivos [4, 5, 3].

Para decidir cualitativamente si las frecuencias observadas están o no en concordancia con las frecuencias esperadas realizar el uso de un contraste de hipótesis usando la distribución Chi-cuadrado. Para esto se requiere que todos los valores de la frecuencia esperada sean mayores a 5 por lo que se deben de sumar entre si todos los valores menores a 5 y de esta manera disminuir el número de clases.

7. Comparar el valor del estadístico de contraste “D” con el valor de X^2 de la tabla de la prueba de bondad de ajuste de Chi-cuadrado con los grados de libertad correspondientes y su probabilidad de ocurrencia. Para calcular los Grados de Libertad (GL) de cada distribución se utiliza la siguiente expresión:

$$G_L = N_c - N_p - 1 \quad (5)$$

Donde N_p : número de parámetros

Si el estadístico X^2 es mayor que el estadístico de contraste “D” calculado se dice que se distribuye de acuerdo a dicha distribución y se acepta la hipótesis.

Si los grados de libertad son menores o iguales a cero entonces no se puede aplicar la prueba de Ji-Cuadrado como prueba de bondad de ajuste, por lo tanto se aplicará la prueba de Kolmogorov-Smirnov [4, 3].

Una vez que se obtiene la distribución de probabilidades a la que mejor se ajustan los tiem-

pos de las tareas, se generan números aleatorios según esas distribuciones y así poder realizar la simulación. Para la Distribución Normal se utiliza el método directo, para la exponencial y triangular se utiliza el método de la transformada inversa y para la distribución Beta y Lognormal la función del programa EXCEL que contiene la acumulada inversa de estas distribuciones [2].

Luego de haber obtenidos los números aleatorios ajustados a una distribución específica, estos se usaran como la duración de cada una de las tareas. Por lo que se puede proceder a realizar la simulación manual de la actividad deseada, tomando en cuenta lo siguiente:

- a) Realizar una inspección del modelos y analizarlo para entender la secuencia de las tareas
- b) Iniciar la simulación con las tareas que tengan todas las condiciones necesarias para empezar
- c) Asignarle una duración a la tarea que haya empezado
- d) Registrar el tiempo en que se terminó la tarea
- e) Observar que tarea prosigue, siguiendo un orden lógico
- f) Si existen varios recursos hay que estar pendiente con los tiempos de terminación del evento

Una vez realizada la simulación manual, se obtienen para cada tarea el tiempo en que inicia la duración y el tiempo de terminación del evento para luego usar la duración para calcular el tiempo en que estuvo activa la tarea, valor medio, desviación estándar, valor máximo, valor mínimo y de esta manera obtener los rendimientos [6].

4. Análisis y discusión de los resultados

4.1. Definición de las actividades de construcción a ser evaluadas en el Edificio

Actividad 1. Preparar acero de refuerzo longitudinal para armado de vigas.

La finalidad de esta actividad es procesar las barras de acero de manera que obtengan las dimensiones de corte y doblado estipuladas en los planos para cada viga, de manera que se pueda disponer del refuerzo para armarlas.

Tarea 1 Cortar cabilla.

En el taller provisional de los cabilleros en la obra, ubicado al lado de la zona de depósito de cabillas, se construye una mesa soporte con una tabla de doce (12 metros) donde se marca con una tiza la longitud de la cabilla estipuladas en el plano.

El tiempo de la tarea empieza al levantar la cabilla del lugar donde está depositada, se coloca en la tabla de soporte para marcarla en la longitud previamente especificada, se levanta para colocar el punto marcado encima de la maquina cortadora, para luego la cortar la cabilla con la máquina de diente eléctrica. Por último el tiempo termina cuando la cabilla es depositada en el suelo.

Las cabillas de una misma viga se depositan juntas para ser atadas y etiquetadas antes de ser trasladadas a la losa donde serán armadas.

Tarea 2 Doblar gancho.

En el taller provisional de los cabilleros en la obra, se instala la máquina de doblar barras de acero en una mesa donde se marca la longitud del gancho y se programa la máquina para el ángulo de doblado requerido.

El tiempo de la tarea comienza cuando con la acción de levantar la cabilla de donde está depositada, colocarla en mesa de soporte, se marca la longitud a la que será doblada y se levanta para colocarla en la máquina eléctrica. Por último la depositan en el suelo.

Actividad 2. Doblar estribos para vigas.

La finalidad de esta actividades transformar la cabilla ya cortada en un estribo con las dimensiones especificadas en plano.

Tarea 1 Colocar cabilla.

Se toma a cabilla depositada en el suelo y se introduce en un tubo de acero, luego se posiciona el extremo de la cabilla en el mandril, que está marcado con la medida necesaria del gancho y de los lados del estribo y posee un clavo de referencia para obtener el ángulo deseado para el gancho y los vértices.

Tarea 2 Doblar estribo.

Haciendo uso de la fuerza se dobla la cabilla empujando en tubo en dirección al mandril, utilizando las referencias se obtienen los cuatro vértices de estribo y los ganchos normativos.

Actividad 3. Armar acero de refuerzo de vigas.

La finalidad de esta actividad consiste en montar el refuerzo de acero de la viga que será encofrado para vaciar el concreto.

Tarea 1 Colocar acero de refuerzo longitudinal.

El atado de las barras de acero ya listas para su colocación es colocado en la proximidad del lugar donde será armado mediante una grúa. El tiempo de la tarea comienza al levantar la cabilla y colocarla entre los nodos o puntos de referencia que especifique el plano para luego amarrarla con alambres de acero.

Tarea 2 Colocar estribos.

El acero cortado y doblado para utilizar como estribo es colocado en la proximidad de la viga que será armada. El tiempo se toma desde que levantan del suelo al estribo, para luego introducirlo en el acero longitudinal previamente colocado.

Tarea 3 Amarrar estribos.

El tiempo evaluado transcurre al cortar un trozo doble de alambre de entre 20 y 25cm aproximadamente y amarrar con esto una esquina del estribo al acero longitudinal en la marca de tiza dibujada previamente.

4.2. Procedimiento de Generación de tiempos aleatorios aplicados a una Tarea

Para mostrar el procedimiento utilizado se presentan los resultados de la tarea 1 de corte de cabillas que pertenece a la actividad 1 de preparación de acero longitudinal desde la fase de toma de tiempos en campo hasta la generación de los tiempos aleatorios necesarios para realizar una simulación.

Tal como quedó establecido en la Metodología, primero se tomaron los tiempos de ejecución de la

tarea según su definición. Este proceso se realizó en la obra.

Actividad 1. Preparar refuerzo de acero longitudinal para armado de vigas.

Tarea 1 Cortar cabilla.

Tabla 1: Tiempos tomados en obra.

Tiempos Observados							Sumatorias
6	8	11	15	19	24	42	125.00
6	8	12	16	19	27	47	135.00
7	8	12	16	19	27	64	153.00
7	9	13	16	20	28	81	174.00
7	9	13	18	20	29		96.00
7	9	14	18	22	29		99.00
7	9	14	18	22	32		102.00
8	10	15	18	23	32		106.00
8	10	15	19	23	34		109.00
8	11	15	19	24	36		113.00
Total							1212.00
Promedio							18.94

Se calculan entonces los parámetros estadísticos: media, Desviación estándar, moda y la varianza.

Tabla 2: Parámetros estadísticos calculados a partir de los tiempos tomados en obra.

Media	DS (σ)	TM	NIC	NIC Equivalente
18.94	13.41	64	7.0	7
Rango	Amplitud	σ^2	FP	Moda
75.00	10.71	179.900794	9.14285714	8

DS: desviación estándar
 TM: tamaño de la muestra
 FP: frecuencia promedio

La determinación de los Intervalos se realiza a partir de la metodología planteada, primero con la definición del Rango según la ecuación (2), el número de clases de la ecuación (3) y la amplitud según la ecuación (4), y se establecen las frecuencias observadas y las relativas.

Se calculan entonces los parámetros estadísticos: media, Desviación estándar, moda y la varianza.

De la misma manera fue realizada la prueba de bondad de ajuste para las demás actividades,

Tabla 3: Determinación de los intervalos.

LI	LS	Punto Medio	FO	FOR	FORA
6.00	16.71	11.36	34	0.53125	0.53125
16.71	27.43	22.07	19	0.296875	0.828125
27.43	38.14	32.79	7	0.109375	0.9375
38.14	48.86	43.50	2	0.03125	0.96875
48.86	59.57	54.21	0	0	0.96875
59.57	70.29	64.93	1	0.015625	0.984375
70.29	81.00	75.64	1	0.015625	1

FO: Frecuencia Observada
 FOR: Frecuencia observada Relativa
 FORA: Frecuencia observada Relativa Acumulada

Tabla 4: Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov a la distribución normal.

FORA	PS	FORA- PS
0.53125	0.43	0.0971
0.828125	0.74	0.0915
0.9375	0.92	0.0136
0.96875	0.99	0.0184
0.96875	1.00	0.0300
0.984375	1.00	0.0156
1	1.00	0.0000
Estadístico SK	0.0971	Si cumple
D64,0.95	0.17	

PS: Probabilidad Superior
 Esta tarea se ajusta a una Distribución Normal por Kolmogorov-Smirnov con un nivel de confianza del 95 %

Tabla 5: prueba de bondad de ajuste χ^2 a la distribución exponencial.

PS	PI	FE	FEC	FO	FOC	$\frac{(FO-FE)^2}{FE}$
0.59	0.59	37.5228913	37.5228913	34	34	0.33
0.77	0.18	11.4401712	11.4401712	19	19	5.00
0.87	0.10	6.49712706	6.49712706	7	7	0.04
0.92	0.06	3.68986261	7.65142062	2	4	1.74
0.96	0.03	2.09555485		0		
0.98	0.02	1.19011209		1		
0.99	0.01	0.67589106		1		

$\chi^2 = 7,10785237$
 $\chi^2_{0,95} = 5,99146455$ No cumple

PI: Probabilidad del Intervalo
 FE: Frecuencia Esperada
 FEC: Frecuencia Esperada Corregida
 FO: Frecuencia Observada
 FOC: Frecuencia Observada Corregida

resultando estas ajustadas a las distribuciones ver Tabla 10.

En el desarrollo del análisis de resultados se pudo notar que existieron tareas que se ajustaron

Tabla 6: Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov a la distribución lognormal.

FORA	PS	FORA- PS	
0.53125	$1,1 \times 10^{-1}$	0.4166	
0.828125	$1,2 \times 10^{-1}$	0.7061	
0.9375	$1,3 \times 10^{-1}$	0.8104	
0.96875	$1,3 \times 10^{-1}$	0.8378	
0.96875	$1,3 \times 10^{-1}$	0.8346	
0.984375	$1,4 \times 10^{-1}$	0.8476	
1	$1,4 \times 10^{-1}$	0.8609	
Estadístico SK		0.8609	No cumple
D64,0.95		0.17	

Tabla 7: Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov a la distribución beta.

FORA	PS	FORA- PS	
0.53125	0.57	0.0384	
0.828125	0.78	0.2584	
0.9375	0.89	0.0440	
0.96875	0.96	0.0121	
0.96875	0.99	0.0185	
0.984375	1.00	0.0140	
1	1.00	0.0000	
Estadístico SK		0.2584	No cumple
D64,0.95		0.17	

Tabla 8: Prueba de bondad de ajuste χ^2 a la distribución triangular.

PS	PI	FE	FEC	FO	FOC	$\frac{(FO-FE)^2}{FE}$
0.00000	0.00000	0.0000	0.0000	34	34	0
0.24518	0.24518	15.6914	15.6914	19	19	0.69765067
0.66452	0.41935	26.8381	26.8381	7	7	14.6638929
0.81129	0.14677	9.3933	9.3933	2	2	5.81917971
0.91613	0.10484	6.7095	6.7095	0	0	6.70953313
0.97903	0.06290	4.0257	5.3676	1	2	2.11283484
1.00000	0.02097	1.3419		1		
				$\chi^2 = 30,00$		No cumple
				$\chi'_{0,99} = 9,21034037$		

a distintas distribuciones de frecuencia al mismo tiempo (Normal, Exponencial y Beta), por lo que se seleccionó la distribución normal para generar los números aleatorios en base al teorema del límite central que explica que si se obtienen muestras considerablemente grandes para cada tarea se encontrará que los tiempos siempre se ajustaran a una distribución normal [7]. De esta manera se concluyó que seis de las siete tareas estudiadas se ajustaron a una distribución

Tabla 9: Prueba de bondad de ajuste χ^2 a la distribución uniforme.

PS	PI	FE	FEC	FO	FOC	$\frac{(FO-FE)^2}{FE}$
0.00	0.00	0.000	0.000	34	34	0
0.14	0.14	9.143	9.143	19	19	10.62723214
0.29	0.14	9.143	9.143	7	7	0.502232143
0.43	0.14	9.143	9.143	2	2	5.580357143
0.57	0.14	9.143	9.143	0	0	9.142857143
0.71	0.14	9.143	9.143	1	1	7.252232143
0.86	0.14	9.143	9.143	1	1	7.252232143
				$\chi^2 = 40,35714286$		No cumple
				$\chi'_{0,99} = 16,81189383$		

Tabla 10: Prueba de bondad de ajuste χ^2 a la distribución uniforme.

Actividad	Tarea	Distribución					
		N	L	E	B	T	U
2	1	X					
	2	X			X		
3	1	X			X		
	2	X					
4	1	X		X	X		
	2				X		
	3	X			X		

N: Normal
 L: Lognormal
 E: Exponencial
 B: Beta
 T: Triangular
 U: Uniforme

normal y la tarea restante se ajustó solo a una distribución beta, confirmando el estudio de Daniel Halpin donde concluye que el mayor porcentaje de actividades de operaciones que analizó se ajustan a estas distribuciones.

5. Conclusiones

Delimitar las tareas de cada una de las actividades debe ser una decisión que tome en cuenta las características del sistema constructivo, el personal, máquinas y los factores de demora en los tiempos de ejecución.

Mediante este estudio se obtuvieron los tiempos de tareas constructivas ajustados a distribuciones probabilísticas por medio de pruebas de bondad de ajuste, debido a que para la aplicación de la prueba de chi cuadrado la frecuencia esperada de la distribución debe ser siempre mayor a 5 [7, 8]

en algunos casos se agruparon varios intervalos, lo que produjo que el número de los grados de libertad resultase cero o menor que cero, por lo tanto no puede ser utilizada la prueba antes mencionada y se procedió a utilizar la prueba de Kolmogorof-Smirnov ya que esta es una prueba no paramétrica [9].

Se determinaron los números aleatorios dependiendo de la distribución que más se ajusta a las tareas estudiadas en esta investigación. Con estos datos se puede generar los ciclos de cada actividad con los nodos Q, combi, normal, consolidar y contador, y finalmente con la simulación manual o por medio del programa Cyclone estimar el tiempo de finalización de la actividad, porcentaje de tiempo ocupado y desocupado del nodo, perfil de uso del recurso, perfil de realización de la actividad, productividad y finalmente los rendimientos para los interesados en conocer plazos de tiempo fiables para la planificación de las actividades estudiadas, debido a esto el ingeniero de obra podrá programar adecuadamente cada una de las actividades relacionándolas con una secuencia lógica de ejecución con la finalidad de evitar demoras e inconvenientes que afecten el rendimiento de la obra.

6. Recomendaciones

Se recomienda que el ajuste de los tiempos tomados en campo a distribuciones probabilísticas mediante pruebas de ajustes e incluso la generación de números aleatorios sea realizado mediante el uso de programas estadísticos, los cuales pueden simplificar el proceso.

Para finalizar es indispensable elaborar trabajos de grado que utilicen la metodología anteriormente planteada para otro tipo de actividades constructivas.

Reconocimiento

Este artículo fue seleccionado por la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, como uno de los mejores Trabajos Especiales de Grado del año 2016.

Referencias

- [1] Daniel W. Halpin and Ronald W. Woodhead. *Design of construction and process operations*. John Wiley & Sons, Inc., 1976.
- [2] Miguel Dakak y Dayana Abreu. Metodología para la simulación de operaciones de construcción. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2007.
- [3] Mariangel Romero C. Evaluación estadística de los rendimientos de actividades de construcción del urbanismo. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2006.
- [4] José Hugo Chourio. *Estadística II*. Editorial Biosfera, Caracas, Venezuela, 1987.
- [5] Mariangel Escalona. Determinación de las distribuciones de los tiempos de ejecución de las tareas de construcción en instalaciones sanitarias. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Carabobo, Venezuela, 1997.
- [6] Rhaiza Álvarez. Simulación manual de operaciones de construcción usando la metodología cyclon. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2009.
- [7] José Hugo Chourio. *Estadística I*. Editorial Biosfera, Caracas, Venezuela, 1987.
- [8] Ninoska Maneiro. Algunos conceptos básicos y ejercicios de inferencia estadística. Valencia, Venezuela, 1996.
- [9] Ninoska Maneiro y Agustín Mejías. Estadística para ingeniería: una herramienta para la gestión de la calidad. Valencia, Venezuela, 2010.

Inference for stochastic differential equations models using filtering algorithms

Saba Infante^a, Aracelis Hernández^b, Joan Ordoñez^{*c}, Luis Sánchez^c

^a*School of Mathematical Sciences and Information Technology, Yachay Tech University, Ecuador*

^b*Departamento de Matemáticas, Facultad de Ciencia y Tecnología*

^c*Instituto de Matemáticas y Cálculo Aplicado (IMYCA), Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela*

Abstract.-

The practical use of stochastic models in areas of applied research such as: finance, infectious diseases dispersal, telecommunications, audio signal processing, optimum process control, machines of learning, global position systems, and physical systems, among other applications. Five filtering algorithms were implemented: extended Kalman filter (EKF), generic particle filter (GPF), particle filter with resampling (RPF), ensemble Kalman Filter (EnKF), and sigma-point Kalman filter (SPKF). The proposed algorithms allow the approximate reconstruction of the marginal distributions a posteriori of the unknown states of the system. The methodology is illustrated using two stochastic models that come from the world of finance. In the empirical study, it is shown that the filters have good performance in the estimation of the states. No significant differences were observed between the estimated values and the true values. The quality of estimation of the algorithms is evaluated by the goodness of fit measure through the calculation of the root of the mean square error obtaining small estimation errors, in addition we estimated the execution times of the algorithms obtaining satisfactory results.

Keywords: filtering algorithms; models space states; equations stochastic differential.

Inferencia para modelos de ecuaciones diferenciales estocásticas usando algoritmos de filtrado

Resumen.-

El uso práctico de modelos estocásticos en áreas de investigación aplicada tales como: las finanzas, dispersión de enfermedades infecciosas, telecomunicaciones, procesamiento de señales de audios, control óptimo de procesos, máquinas de aprendizaje, sistemas de posición global, y sistemas físicos, entre otras aplicaciones. Se implementaron cinco algoritmos de filtrado: filtro de Kalman extendido (FKE), filtro de partículas genérico (FPG), filtro de partículas con remuestreo (FPR), filtro Kalman de ensamblajes (FKEN), y el filtro de punto sigmas (FPS). Los algoritmos propuestos permiten la reconstrucción aproximada de las distribuciones marginales a posteriori de los estados desconocidos del sistema. La metodología es ilustrada usando dos modelos estocásticos que provienen del mundo de las finanzas. En el estudio empírico, se demuestra que los filtros tienen buena performance en la estimación de los estados y no se observó diferencias significativas entre los valores estimados y los valores verdaderos. La calidad de estimación de los algoritmos es evaluada por la medida de bondad de ajuste a través del cálculo de la raíz del error cuadrático medio obteniéndose errores de estimación pequeños, además se estimaron los tiempos de ejecución de los algoritmos obteniéndose resultados satisfactorios.

Palabras clave: algoritmos de filtrado; modelos espacio estados; ecuaciones diferenciales estocásticas.

*Autor para correspondencia

Correo-e: joanmanuel575@gmail.com (Joan Ordoñez)

Recibido: noviembre 2017

Aceptado: diciembre 2017

1. Introducción

Los fenómenos que ocurren en el mundo real por lo general son modelados por proceso de Markov, estos son modelos probabilísticos adecuados para tratar datos que tienen una estructura secuencial. Un proceso de Markov es un proceso de tiempo continuo con trayectorias continuas, pero no diferenciables. El ejemplo más evidente es un sistema dinámico donde los estados evolucionan en el tiempo. En un sistema dinámico los estados son parcialmente observados, solo se tienen mediciones aproximadas del sistema subyacente, las muestras observadas son incompletas, tienen errores y un comportamiento no lineal en la mayoría de los casos. Uno de los objetivos del análisis de estos procesos de difusión es comprender mejor el funcionamiento de los sistemas ocultos para hacer predicción. Por ejemplo en el estudio de un sistema de valoración de activos financieros, un análisis adecuado puede ayudar a mejorar la toma de decisiones, en el estudio de una enfermedad endémica comprender su naturaleza puede contribuir a minimizar el impacto en la sociedad y desarrollar estrategias que permitan erradicarla, o en la elaboración de modelos complejos espacio temporales que permitan comprender la dinámica del sistema del tiempo, pueden ayudar a tomar medidas sobre el cambio climático, lo cual puede tener fuerte impacto sobre el desarrollo de la agricultura y en la contaminación del medio ambiente en las grandes ciudades.

En la inferencia estadística para modelos de ecuaciones diferenciales estocásticas se está interesado en estimar el proceso de Markov (solución de la ecuación) usando toda la trayectoria o el valor esperado de algún funcional del proceso estocástico tales como: los momentos, las distribuciones marginales a posteriori, o las distribuciones a posteriori predictivas, etc.; las cuales generalmente no están disponibles en forma cerrada (analítica), también interesa reducir la varianza de la solución; es decir, se desea determinar soluciones aproximadas a partir de los datos observados con el mínimo costo computacional y que los estimadores tengan

propiedades óptimas. Hay una extensa literatura para tratar estos problemas, ver por ejemplo [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7], entre otros.

Las técnicas Bayesianas son señaladas como métodos de estudio para estos sistemas dinámicos. La formulación espacio estado introduce los algoritmos de filtrado que permiten calcular la densidad de probabilidad a posteriori de los estados ocultos del sistema. Los modelos espacio estados, son procesos de Markov, que describen la dependencia probabilista entre dos procesos estocásticos, uno basado en una ecuación de estado y otro basado en una ecuación de observación. Las estructuras de estos modelos son ampliamente utilizadas en muchas aplicaciones tales como: economía y finanzas [8, 9, 10, 11, 12, 13] entre otros, en robótica [14], en biomedicina para caracterización de moléculas de enfermedades [15], para encontrar conexiones en ADN [16, 17], sistemas biológicos [18], epidemiología [19, 20, 21], para datos del servidor de la web [22], para datos de control del tráfico [23], y para modelos de precipitaciones [24, 25, 26, 27, 28], entre otros.

El resto del artículo se como sigue: en la Sección 2 se definen los modelos espacio estado y los sistemas dinámicos, en la Sección 3 se definen los algoritmos a implementar, en la Sección 4 se muestra una aplicación, y en la Sección 5 se establece una discusión y las conclusiones.

2. Modelos espacio estado y los sistemas dinámicos

Estamos interesados en dos problemas de inferencia estadística relacionado con los modelos espacio estado (MEE), el primer problema es la inferencia de los estados y el segundo problema esta relacionado con la inferencia de los parámetros. En general los modelos espacio estados se representan por:

$$\begin{aligned} x_0 &\sim p(x_0) \\ x_k &\sim p(x_k|x_{k-1}, \theta) \\ y_k &\sim p(y_k|x_k, \theta) \quad ; \quad k = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (1)$$

donde:

- x_0 es un estado inicial conocido.

- $x_k \in \mathbb{R}^n$ es un vector de estados en un tiempo k , que puede ser continuo o discreto.
- $\theta \in \Theta \subseteq \mathbb{R}^d$ es un vector de parámetros.
- $y_k \in \mathbb{R}^m$ es un vector de observaciones en un tiempo k .
- $p(x_k|x_{k-1}, \theta)$ es un modelo dinámico el cual describe las dinámicas estocásticas del sistema. El modelo dinámico puede ser una densidad de probabilidad.
- $p(y_k|x_k, \theta)$ es el modelo de medición, que es la distribución de las mediciones dado los estado y parámetros.

En la Figura (1) se muestra una representación gráfica de los modelos espacio estado compuesto por un proceso latente denotado por x_t , y un proceso observado denotado por y_t .

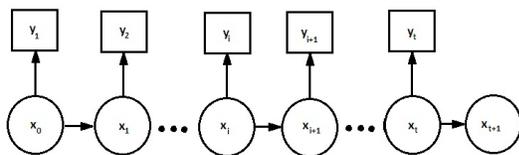


Figura 1: Representación de una cadena de Markov.

Se supone que el modelo dado en (1) es un proceso de Markov, lo que significa que tiene el siguientes dos propiedades:

1. Los estados $\{x_k : k = 0, 1, \dots\}$ forman una secuencia de Markov de primer orden, esto es:

$$p(x_k|x_{1:k-1}, y_{1:k-1}) = p(x_k|x_{k-1})$$

2. La observación y_k dado el estado x_k es condicionalmente independiente de las observaciones y los estados, esto es:

$$p(y_k|x_{1:k-1}, y_{1:k-1}) = p(y_k|x_k)$$

Los MEE discretos implican que los procesos dinámicos y de medición son procesos discretos en el tiempo, mientras que los MEE discretos-continuos implican que el proceso dinámico es un proceso continuo en el tiempo, y el proceso

de medición es un proceso discreto en el tiempo. Los MEE se agrupan en MEE lineales y MEE no lineales, dependiendo de la estructura de los procesos dinámicos y de medición.

Definición 1. (*Modelo espacio estado lineal discreto*). En este caso se tiene que la ecuación de observación, y la ecuación de estado son ambas discretas; entonces el modelo definido en (1) se define como:

$$x_0 \sim N(m_0, P_0)$$

$$x_k = M_{k-1}x_{k-1} + u_{k-1} \tag{2}$$

$$y_k = H_k x_k + v_k \tag{3}$$

donde M_{k-1} es la matriz de transición de la ecuación de estado, $u_{k-1} \sim N(0, Q_{k-1})$ es un vector de ruidos aleatorios de la ecuación de estado, H_k es una matriz de la ecuación de observación, $v_k \sim N(0, R_k)$ es un vector de ruidos aleatorios de la ecuación de observación, y x_0 es un estado inicial.

Definición 2. (*Modelo espacio estado lineal continuo-discreto*). En este caso se tiene que la ecuación de observación es discreta, mientras que la ecuación de estado es continua, el modelo definido en (1) se define como:

$$dx_t = M_t x_t dt + L_t dB_t$$

$$y_k = H_k x_k + v_k \tag{4}$$

donde $M : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}^{n \times n}$, y $L : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}^{n \times s}$ son funciones de matrices, B_t es un movimiento Browniano s -dimensional con densidad espectral $Q_c \in \mathbb{R}^{s \times s}$, H_k es una matriz que mapea la ecuación de observación, y $v_k \sim N(0, R_k)$ es un vector de ruidos aleatorios de la ecuación de observación.

En la vida real existen pocos fenómenos con comportamientos lineales y con distribuciones Gaussianas, la mayoría de estos sistemas son no lineales y con errores que tienen comportamiento no Gaussianas. En el caso lineal y distribución Gaussianas se pueden estimar las distribuciones filtradas analíticamente utilizando el algoritmo del filtro de Kalman.

Definición 3. (*Modelo espacio estado no lineal discreto*). En este caso se tiene que la ecuación de observación, y la ecuación de estado son ambas discretas, el modelo definido en (1) se define como:

$$x_0 \sim N(m_0, P_0)$$

$$x_k = \mathcal{M}_{k-1}(x_{k-1}) + u_{k-1} \quad (5)$$

$$y_k = \mathcal{H}_k(x_k) + v_k \quad (6)$$

donde: $\mathcal{M} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ es una función no lineal de las dinámicas de los estados, $\mathcal{H} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ es una función no lineal de la ecuación de observación, u_{k-1} y v_k son errores que pueden ser Gaussianas o no Gaussianas.

Definición 4. (*Modelo espacio estado no lineal continuo-discreto*). En este caso se tiene que la ecuación de observación es discreta, mientras que la ecuación de estado es continua, el modelo definido en (1) se define como: El modelo espacio estado no lineal discreto-continuo se puede escribir como:

$$dx_t = \mathcal{M}(x_t, t)dt + L(x_t, t)dB_t \quad (7)$$

$$y_k = \mathcal{H}(x_{t_k}) + v_k \quad (8)$$

donde $\mathcal{M} : \mathbb{R}^n \times [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}^n$ es una función no lineal de la ecuación de estado, $L : \mathbb{R}^n \times [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}^{n \times s}$ es una función de matrices valoradas, B_t es un movimiento Browniano, $\mathcal{H} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ es una función de la ecuación de observación, y v_k es un vector de ruidos aleatorios de la ecuación de observación que puede o no ser Gaussiana.

Cuando se integra el proceso dinámico discreto-continuo dado en la ecuación (7) desde un estado inicial t_0 hasta t donde ($t_0 < t$), se obtiene:

$$x_i(t) = x_i(t_0) + \int_{t_0}^t \mathcal{M}_i(x_s, s)ds + \int_{t_0}^t \sum_{j=1}^m L_{ij}(x_s, s)dB_j(s) \quad ; \quad i = 1, \dots, n. \quad (9)$$

donde la primera integral del lado derecho de la ecuación dada en (9) es una integral de Lebesgue, mientras que la segunda integral es una integral estocástica de tipo Ito, (ver Øksendal, (2003) [4],

y Jazwinski, (1970) [3], entre otros). Este proceso puede interpretarse como un sistema determinista gobernado por la parte no aleatoria de la ecuación pero perturbado por un ruido aditivo dado por la integral estocástica. A un proceso estocástico de la forma (9) se le llama proceso de Itô y para que esta ecuación tenga alguna solución se deben imponer condiciones en los coeficientes. De manera análoga al caso determinístico, los teoremas básicos de existencia y unicidad para ecuaciones diferenciales estocásticas establecen que bajo ciertas condiciones de regularidad para los coeficientes $\mathcal{M}(x_t, t)$ y $L(x_t, t)$, la ecuación dada (7) tiene una solución única, por ejemplo, si \mathcal{M} y L satisfacen las siguientes condiciones:

- Condición de Lipschitz en la variable x :

$$|\mathcal{M}(x, t) - \mathcal{M}(y, t)|^2 + |L(x, t) - L(y, t)|^2 \leq K|x - y|^2 \quad (10)$$

- Condición de crecimiento en x , es dada por:

$$|\mathcal{M}(x, t)|^2 + |L(x, t)|^2 \leq K(1 + |x|^2) \quad (11)$$

- $x(0)$ es independiente de $(B(t), 0 \leq t \leq T)$, y $\mathbb{E}x^2(0) < \infty$, entonces existe una única solución fuerte de x_t de la ecuación (7), que tiene trayectorias continuas, más aun:

$$\mathbb{E} \left(\sup_{0 \leq t \leq T} \mathbb{E}x_t^2 \leq C(1 + \mathbb{E}x^2(0)) \right) \quad (12)$$

donde C es una constante y depende solamente de K y T .

Además, la función de densidad de probabilidad de transición de la solución x_t obedece a la ecuación de Fokker-Planck-Kolmogorov. En este caso a tal solución se le llama solución fuerte. Los teoremas básicos no establecen la forma de encontrar la solución a una ecuación estocástica dada.

La forma clásica de aproximar (7) es suponer una partición de puntos en un intervalo $[c, d]$, como sigue: $c = t_0 < t_1 < \dots < t_n = d$. La integral de Riemann se aproxima por:

$$\int_c^d f(x)dx = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n f(t'_i)\Delta t_i \quad (13)$$

donde $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$, y $t_{i-1} < t'_i < t_i$. En forma similar, la integral de Itô se aproxima por:

$$\int_c^d f(t)dB_t = \sum_{j=1}^m f(t_{i-1})\Delta B_i \quad (14)$$

donde $\Delta B_i = B_{t_i} - B_{t_{i-1}}$ es un paso del movimiento Browniano en $[c, d]$. Para resolver analíticamente la ecuación dada en (9), se necesita introducir la regla de la cadena para diferenciales estocásticas, llamada la fórmula de Itô, que se define como sigue, supóngase que $Y = u(x(t), t)$, $u : \mathbb{R} \times [0, T] \rightarrow \mathbb{R}$, es continua, y $\frac{\partial u}{\partial t}$, $\frac{\partial u}{\partial x}$, $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$, existen y son continuas entonces:

$$dY = \frac{\partial u}{\partial t}(x(t), t)dt + \frac{\partial u}{\partial x}(x(t), t)dx + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x(t), t)(dx)^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} \mathcal{M} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} L^2 \right) dt + \frac{\partial u}{\partial x} L dB \quad (15)$$

El término $(dx)^2$ se interpreta utilizando las siguientes identidades:

- $dt dt = 0$.
- $dt dB_t = dB_t dt = 0$.
- $dB_t dB_t = dt$

Una forma muy utilizada en aplicaciones es que en vez de utilizar un método numérico para resolver la ecuación dada en (7), se considera que la solución x_t es una variable aleatoria que surge cuando se toma el límite y se hace tender a cero el tamaño del paso del método numérico; esto es, para una colección finita de tiempos $t_0 = \tau_0 < \tau_1 < \dots < \tau_n < \dots < \tau_n = t_j$ denota una discretización de un intervalo $[t_0, t_j]$. Supóngase que para $j = 1, \dots, J$, existe un entero n_j que verifica $t_j = t_{n_j}$, con $n_0 = 0$. Sea $(\Delta)_{1 \leq n \leq N}$ una secuencia de los tamaños de los pasos definida por $\Delta_n = \tau_n - \tau_{n-1}$, y $\Delta = \max_{1 \leq n \leq N} \Delta_n$ es el tamaño maximal. Entonces la aproximación de Euler-Maruyama de la ecuación (7) define un modelo de series de tiempo de Markov no lineal con dinámicas dadas por:

$$x_n = x_{n-1} + \Delta_n \mathcal{M}(x_{n-1}, \tau_{n-1}) + L(x_{n-1}, \tau_{n-1}) \sqrt{\Delta_n} \zeta_n; \quad \zeta_n \sim N(0, \sigma_\zeta^2) \quad (16)$$

Teóricamente el sistema continuo dado en (7), es observado imperfectamente a través de un proceso de observación $y_j \in \mathbb{R}$ que está relacionado con el proceso x_j mediante el siguiente modelo estadístico:

$$y_j = \mathcal{H}(x_{n_j}) + \epsilon_j; \quad \epsilon_j \sim N(0, \sigma_\epsilon^2); \quad 0 \leq j \leq J \quad (17)$$

donde: $y_{1:T} = (y_1, \dots, y_T)$ es un vector de medidas de observaciones, $\epsilon = (\epsilon_1, \dots, \epsilon_J)$ representan los errores de medición, el término de la regresión es la realización de un proceso de difusión $\mathcal{H} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, donde \mathcal{H} es una función que puede ser lineal o no lineal. El caso más sencillo es la regresión lineal $\mathcal{H}(x_{n_j}) = x_{n_j}$.

Usando la aproximación del proceso de difusión por el esquema de Euler-Maruyama, se aproxima el modelo estadístico en la forma espacio estado, como sigue:

$$x_n = x_{n-1} + \Delta_n \mathcal{M}(x_{n-1}, \tau_{n-1}) + L(x_{n-1}, \tau_{n-1}) \sqrt{\Delta_n} \zeta_n; \quad \zeta_n \sim N(0, \sigma_\zeta^2) \quad (18)$$

$$y_n = x_n + \epsilon_n; \quad \epsilon_n \sim N(0, \sigma_\epsilon^2) \quad (19)$$

En lo que sigue nos centraremos en el problema de filtrado, y la predicción de procesos que tienen dinámicas continuas, y que son observados en tiempos discretos. Por ejemplo, las dinámicas de las trayectorias que recorren los vehículos en el espacio son continuas, pero las observaciones son tomadas en instantes de tiempos discreto. El objetivo es obtener aproximaciones por filtros lineales y no lineales la solución de una ecuación diferencial estocástica (EDE) tipo Itô dada en (7).

Dada las observaciones $y_{1:T} = (y_1, \dots, y_T)$, la estimación de x_k es llamada filtrada si $k = T$, suavizada si $k < T$, y predicción si $k > T$. En este trabajo se trata el problema del filtrado, donde la solución de la ecuación (7) es una función de densidad de probabilidad condicional de x_k dada todas las observaciones $y_{1:k}$.

La motivación principal es hacer inferencia bayesiana usando una estructura de un modelo de espacio estado. Se asume una distribución a priori para los parámetros $p(\theta)$, y se quiere estimar la distribución a posteriori de las siguientes cantidades:

- $p(\theta|y_{1:k})$.
- $p(x_{0:k}|y_{1:k})$.
- $p(\theta, x_{0:k}|y_{1:k})$.

Cuando θ es conocido, y $x_{0:k}$ es desconocido, la distribución conjunta de los estados es dada por:

$$\begin{aligned} p(x_{0:t}) &= p(x_t|x_{t-1})p(x_{t-1}|x_{t-2}) \dots p(x_1|x_0)p(x_0) \\ &= p(x_0) \prod_{i=1}^t p(x_i|x_{i-1}) \end{aligned} \quad (20)$$

donde $p(x_0)$ es una densidad inicial a priori. La verosimilitud de los datos viene dada por:

$$\begin{aligned} p(y_{1:t}|x_{0:t}) &= p(y_1|x_1)p(y_2|x_2) \dots p(y_t|x_t) \\ &= \prod_{i=1}^t p(y_i|x_i) \end{aligned} \quad (21)$$

La distribución a posteriori viene dada por:

$$p(x_{0:t}|y_{1:t}) = \frac{p(y_{1:t}|x_{0:t})p(x_{0:t})}{\int p(y_{1:t}|x_{0:t})p(x_{0:t})dx_{0:t}} \quad (22)$$

Cuando θ , y $x_{0:t}$ son desconocidos, se puede diseñar un algoritmo Monte Carlo que permite muestrear de las distribuciones a posteriori marginales $p(\theta|x_{0:k}, y_{1:k})$, y $p(x_{0:k}|y_{1:k}, \theta)$. Entonces, se puede construir una cadena de Markov sobre los estados $(\theta, x_{1:k})$, con distribución estacionaria dada por $p(\theta, x_{1:k}|y_{1:k})$. La razón de diseñar un algoritmo sobre estos modelos espacio estado es la forma como están definidos (1), lo cual permite escribir la distribución estacionaria del algoritmo hasta una constante de proporcionalidad:

$$\begin{aligned} A &= \left(\prod_{i=1}^k p(x_i|x_{i-1}, \theta) \right) \\ B &= \left(\prod_{i=1}^k p(y_i|x_i, \theta) \right) \end{aligned}$$

$$p(\theta, x_{1:k}|y_{1:k}) \propto p(\theta)p(x_0|\theta) (A) (B) \quad (23)$$

Por lo tanto, es claro como utilizar los pasos de actualización dentro del algoritmo. En la mayoría de las aplicaciones no es complicado implementar el algoritmo (23) dado que su distribución es estacionaria. Una forma natural de implementar el algoritmo es:

- Se muestrea $x_{0:k}$ dado θ y $y_{1:k}$.
- Se muestrea θ dado $x_{0:k}$ y $y_{1:k}$.

3. Algoritmos

Si se considera que θ es conocido entonces la tarea se reduce a estimar la distribución marginal $p(x_k|y_{1:k})$. El cálculo de $p(x_k|y_{1:k})$ se realiza recursivamente debido a que las mediciones son recibidas secuencialmente. Este procedimiento recursivo conduce a un algoritmo de filtrado Bayesiano. El proceso recursivo es inicializado usando una densidad de probabilidad asociada con la información a priori de los estados para algunas observaciones dadas. El algoritmo se resume en tres pasos: primero se genera una semilla inicial $x_0 \sim p(x_0)$; luego se predice $x_k \sim p(x_k|x_{k-1})$; y finalmente se actualiza $y_k \sim p(y_k|x_k)$. El objetivo general que se persigue es estimar los estados desconocidos $x_{0:k}$, basándose en las medidas obtenidas a partir del proceso de observación $y_{1:k}$; en particular interesa estimar la distribución filtrada $p(x_k|y_{1:k})$, la distribución predictiva $p(x_{k+1}|y_{1:k})$, la esperanza y covarianza a posteriori, las cuales se calculan como sigue:

1. distribución filtrada:

$$p(x_k|y_{1:k}) = \int p(x_k|x_{k-1})p(x_{k-1}|y_{1:k-1})dx_{k-1} \quad (24)$$

2. distribución predictiva:

$$p(x_{k+1}|y_{1:k}) = \int p(x_{k+1}|x_k)p(x_k|y_{1:k-1})dx_k \quad (25)$$

3. esperanza a posteriori predicha:

$$m_{k|k} = \mathbb{E}(x_k|y_{1:k}) = \int x_k p(x_k|y_{1:k})dx_k \quad (26)$$

4. covarianza a posteriori predicha:

$$P_{k|k} = \mathbb{E} \left[(x_k - m_{k|k})(x_k - m_{k|k})^T \right] = \int (x_k - m_{k|k})(x_k - m_{k|k})^T p(x_k|y_{1:k})dx_k \quad (27)$$

Si se supone que v_k se distribuye de acuerdo a una función de densidad de probabilidad conocida $v_k \sim N(0, R_k)$ con parámetros fijos pero desconocidos, R_k se tiene que estimar; además se consideran que los errores $u_k \sim N(0, Q_k)$. Entonces la estimación recursiva de $p(x_k|y_{1:k})$ en el tiempo k , se realiza mediante el siguiente procedimiento:

Algoritmo filtro bayesiano óptimo.

1. Se inicializa con una distribución a priori $p(x_0)$.
2. Para $k = 1, \dots, \dots$ se ejecuta lo siguiente:
 - predicción: se predice el estado x_k , que puede ser calculado:
 - en el caso discreto por la ecuación de Chapman-Kolmogorov:

$$p(x_k|y_{1:k-1}) = \int p(x_k|x_{k-1})p(x_{k-1}|y_{1:k-1})dx_{k-1} \tag{28}$$

- en el caso continuo: se integra la ecuación de Fokker-Planck-Kolmogorov:

$$\frac{\partial p(x, k)}{\partial k} = - \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial x_i} [M_i p(x, k)] + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \{ [LQL^T]_{ij} p(x, k) \} \tag{29}$$

donde: $p(x, k) = p(x_k|y_{1:k-1})$, $M_i = M_i(x, k)$, y $L = L(x, k)$.

- actualización: dada la observación y_k , la distribución predictiva, es actualizada mediante:

$$p(x_k|y_{1:k}) = \frac{p(y_k|x_k)p(x_k|y_{1:k-1})}{\int p(y_k|x_k)p(x_k|y_{1:k-1})dx_k} \tag{30}$$

En general no hay solución analítica para calcular las integrales involucradas en (28), y (30), en particular:

1. Si $\mathcal{M}(\cdot)$ y $\mathcal{H}(\cdot)$ son lineales, u_t , y v_t tienen distribución Gaussiana entonces $p(x_k|y_{1:k})$ tiene una solución óptima aproximada por el filtro de Kalman.
2. Si $\mathcal{M}(\cdot)$ y $\mathcal{H}(\cdot)$ son no lineales, u_t , y v_t tienen distribución Gaussiana entonces $p(x_k|y_{1:k})$ se puede aproximar por:
 - Filtro de Kalman extendido.
 - Filtro de Kalman sin esencia.
 - Filtro Monte Carlo.
 - Filtro de mezclas de Gaussianas.
 - Filtro de la cuadratura Gauss-Hermite.
 - Filtro de los puntos sigmas.
 - Filtro de Kalman de los ensamblés.
3. Si $\mathcal{M}(\cdot)$ y $\mathcal{H}(\cdot)$ son no lineales, u_t , y v_t tienen distribución no Gaussiana entonces $p(x_k|y_{1:k})$ se puede aproximar por:
 - Filtro de partículas y todas sus variantes.
 - Filtro de partículas independiente Metropolis-Hastings.
 - Filtro de partículas Gibbs.
 - Filtro de partículas Gibbs con muestreo de sus descendientes.

En este trabajo mostraremos la estimación de estados a través de los algoritmos filtro de Kalman extendido (FKE), filtro de partículas (FP), filtro de Kalman de ensamblés (FKEN), y filtro de Kalman punto sigmas (FKPS), en modelos generados por ecuaciones diferenciales estocásticas aplicadas a las finanzas.

3.1. Filtro de Kalman extendido (FKE)

Si en el modelo general dado en las ecuaciones (5) y (6) las funciones $\mathcal{M}_t(x_{t-1}) = f(x_{t-1})$ y $\mathcal{H}_t(x_t) = h(x_t)$ son no lineales, entonces se puede hacer una linealización local expandiendo en serie de Taylor de primer orden alrededor de los puntos estimados. El inconveniente con los filtros no lineales es que pueden ser menos precisos que los filtros lineales y pueden implicar más trabajo en la implementación computacional. Igual que en el caso del filtro de Kalman, se puede obtener un algoritmo recursivo para el filtro de Kalman extendido de la siguiente manera:

Algoritmo filtro de Kalman extendido.

1. Se inicializa el algoritmo con la media $m_{0|0}$ y la covarianza $P_{0|0}$.
2. Para $t = 1, 2, \dots$, se ejecuta lo siguiente:

Paso de predicción.

- Caso discreto: se hace:

$$m_{t|t-1} = f(m_{t-1|t-1}) \quad (31)$$

y

$$P_{t|t-1} = Q_t + G_x(m_{t-1|t-1})P_{t-1|t-1}G_x(m_{t-1|t-1})^T \quad (32)$$

- Caso discreto continuo, se resuelve:

$$\frac{dm_{t|t-1}(t)}{dt} = f(m_{t|t-1}, t) \quad (33)$$

y

$$\begin{aligned} \frac{dP_{t|t-1}(t)}{dt} = & G_x(m_{t-1|t-1}, t)P_{t-1|t-1} + \\ & + P_{t-1|t-1}G_x(m_{t-1|t-1}, t)^T \\ & + L(m_{t-1|t-1}, t)Q_tL^T(m_{t-1|t-1}, t) \end{aligned} \quad (34)$$

Paso de actualización.

$$m_{t|t} = m_{t|t-1} + p_{t|t-1}W_x^T(W_x p_{t|t-1}W_x^T + R_t)^{-1}[y_t - h_t(m_{t|t-1})], \quad (35)$$

$$p_{t|t} = p_{t|t-1} - p_{t|t-1}W_x^T(W_x p_{t|t-1}W_x^T + R_t)^{-1}(p_{t|t-1}W_x^T)^T \quad (36)$$

donde: $f(\cdot)$ y $h(\cdot)$ son funciones no lineales y G_x y W_x son linealizaciones de estas funciones, que se estiman por:

$$G_x = \left. \frac{df(x_{t-1})}{dx_{t-1}} \right|_{x_{t-1}=m_{t-1|t-1}} \quad (37)$$

y

$$W_x = \left. \frac{dh(x_t)}{dx_t} \right|_{x_t=m_{t|t-1}} \quad (38)$$

El filtro de Kalman extendido utiliza el primer término de la expansión de Taylor de la función no lineal alrededor las medias condicionales.

3.2. Filtro de partículas (FP)

Otra estrategia de estimación de los estados desconocidos en el modelo general dado en las ecuaciones (5) y (6), es utilizar el método de Monte Carlo por muestreo secuencial conocido como filtro de partículas. Para desarrollar en detalle el algoritmo del filtro de partículas considérese $\{x_{1:t}^{(i)}, w_t^{*(i)}\}_{i=1}^N$ una muestra aleatoria que caracteriza a la función de densidad de probabilidad a posteriori conjunta $p(x_{1:t}|y_{1:t})$, donde $\{x_{1:t}^{(i)}, i = 1, \dots, N\}$ es un conjunto de puntos obtenidos con pesos asociados $w_t^{*(i)}, i = 1, \dots, N$ y $x_{1:t} = \{x_1, \dots, x_t\}$ es el conjunto de todos los estados hasta el tiempo t . Los pesos son normalizados de tal manera que $\sum_{i=1}^N w_t^{*(i)} = 1$. Entonces la distribución a posteriori llamada también distribución filtrada en el tiempo t puede ser aproximada por una distribución empírica formada por los puntos de masa o partículas:

$$p_N(x_{1:t}|y_{1:t}) \approx \sum_{i=1}^N w_t^{*(i)} \delta(x_{1:t} - x_{1:t}^{(i)}) \quad (39)$$

donde $\delta(\cdot)$ es la función delta de Dirac. Dada la aproximación de la distribución a posteriori, se pueden estimar valores esperados de alguna función $g_n(x_{1:t})$ asociada a la distribución filtrada $p(x_{1:t}|y_{1:t})$, esto es:

$$\mathbb{E}[g_n(x_{1:t})] = \int g_n(x_{1:t})p(x_{1:t}|y_{1:t})dx_{1:t}$$

Los pesos $w_t^{*(i)}$ son elegidos usando el principio de muestreo de importancia. El principio de muestreo de importancia se basa en el siguiente argumento: supóngase que $p(x) \propto \gamma(x)$ es una densidad de probabilidad de la cual es difícil muestrear, pero $\gamma(x)$ puede ser evaluada y en consecuencia $p(x)$ también puede ser evaluada hasta una constante de proporcionalidad. Entonces se procede de la siguiente manera: sea $x^{(i)} \sim q(x), i = 1, \dots, N$ una muestra generada de una distribución propuesta $q(\cdot)$, llamada densidad de importancia. Entonces una aproximación pesada de la densidad $p(\cdot)$ es dada por:

$$p(x) \approx \sum_{i=1}^N w^{*(i)} \delta(x - x^{(i)}) \quad (40)$$

donde:

$$w^{*(i)} \propto \frac{\gamma(x^{(i)})}{q(x^{(i)})} \quad (41)$$

es el peso normalizado de la i -ésima partícula. Si las muestras $\{x_{1:t}^{(i)}\}$ son tomadas usando una densidad de importancia $q(x_{1:t}|y_{1:t})$ entonces los pesos utilizados para aproximar la ecuación (39) se obtienen utilizando la ecuación (41), esto es:

$$w_t^{*(i)} \propto \frac{p(x_{1:t}^{(i)}|y_{1:t})}{q(x_{1:t}^{(i)}|y_{1:t})} \quad (42)$$

Si la densidad de importancia se puede factorizar de tal manera que:

$$q(x_{1:t}|y_{1:t}) = q(x_t|x_{1:t-1}, y_{1:t})q(x_{1:t-1}|y_{1:t-1}) \quad (43)$$

entonces se pueden obtener las muestras $x_{1:t}^{(i)}$ a partir de $q(x_{1:t}|y_{1:t})$ aumentando cada una de las muestras que ya existen $x_{1:t-1}^{(i)}$ obtenidas de $q(x_{1:t-1}|y_{1:t-1})$, generando el nuevo estado $x_t^{(i)}$ de $q(x_t|x_{1:t-1}, y_{1:t})$. Para obtener los pesos actualizados, la distribución filtrada $p(x_{1:t}|y_{1:t})$ es expresada en términos de $p(x_{1:t-1}|y_{1:t-1})$, $p(y_t|x_t)$ y $p(x_t|x_{t-1})$, es decir:

$$p(x_{1:t}|y_{1:t}) \propto p(y_t|x_t)p(x_t|x_{t-1})p(x_{1:t-1}|y_{1:t-1}) \quad (44)$$

Por otra parte, sustituyendo la ecuación (43) y (44) en la ecuación (42), se encuentra la ecuación para los pesos actualizados:

$$\begin{aligned} w_t^{*(i)} &\propto \frac{p(y_t|x_t^{(i)})p(x_t^{(i)}|x_{t-1}^{(i)})p(x_{1:t-1}^{(i)}|y_{1:t-1})}{q(x_t^{(i)}|x_{1:t-1}^{(i)}, y_{1:t})q(x_{1:t-1}^{(i)}|y_{1:t-1})} \\ &= \frac{p(y_t|x_t^{(i)})p(x_t^{(i)}|x_{t-1}^{(i)})}{q(x_t^{(i)}|x_{1:t-1}^{(i)}, y_{1:t})} w_{t-1}^{*(i)} \end{aligned}$$

donde:

$$w_{t-1}^{*(i)} = \frac{p(x_{1:t-1}^{(i)}|y_{1:t-1})}{q(x_{1:t-1}^{(i)}|y_{1:t-1})}$$

En particular, si se considera que $q(x_t|x_{1:t-1}, y_{1:t}) = q(x_t|x_{t-1}, y_t)$, entonces la densidad de importancia depende solamente de x_{t-1} y y_t . Esta situación es adecuada cuando se requiere obtener el estimador

filtrado $p(x_t|y_{1:t})$ en un tiempo real t . Entonces los pesos modificados quedan de la siguiente manera:

$$w_t^{*(i)} = \frac{p(y_t|x_t^{(i)})p(x_t^{(i)}|x_{t-1}^{(i)})}{q(x_t^{(i)}|x_{t-1}^{(i)}, y_t)} w_{t-1}^{*(i)} \quad (45)$$

y la densidad filtrada a posteriori $p_N(x_t|y_{1:t})$ puede ser aproximada por:

$$p_N(x_t|y_{1:t}) \approx \sum_{i=1}^N w_t^{*(i)} \delta(x_t - x_t^{(i)}) \quad (46)$$

Crisan y Doucet (2002) [29] probaron que cuando $N \rightarrow \infty$ la ecuación dada en (46) se aproxima a la verdadera distribución a posteriori $p(x_t|y_{1:t})$. Para implementar el algoritmo, supóngase que se tienen un conjunto de muestras aleatorias $\{x_{1:t-1}^{(i)}, i = 1, 2, \dots, N\}$ generadas de la función conocida $p(x_{1:t-1}|y_{1:t-1})$. El algoritmo de filtro de partículas es un método utilizado para predecir (ecuación (28)) y para actualizar (ecuación (30)) con base a las muestras conocidas, y obtener un conjunto de nuevos valores $\{x_{1:t}^{(i)}, i = 1, 2, \dots, N\}$, los cuales se distribuyen aproximadamente como $p(x_t|y_{1:t})$. El algoritmo de filtro de partículas genérico se resume como sigue:

Algoritmo filtro de partículas genérico (FPG).

1. Se inicializa el estado inicial $x_0 \sim p(.,.)$, donde $p(.,.)$ es una distribución a priori conocida, y las muestras $\{x_{1:t-1}^{(i)}, i = 1, 2, \dots, N\}$ de la distribución a posteriori $p(x_{t-1}|y_{1:t-1})$ en $t - 1$, con $t = 1, \dots, T$.
2. Se hace $i = 1, \dots, N$, y se genera una muestra de la distribución propuesta:

$$x_t^{(i)} \sim q(x_t|x_{1:t-1}^{(i)}, y_{1:t}) \quad (47)$$

y se construye el conjunto $x_{1:t}^{(i)} = \{x_{1:t-1}^{(i)}, x_t^{(i)}\}$.

3. Para $i = 1, \dots, N$, se evalúan los pesos de importancia hasta una constante normalizada:

$$w_t^{*(i)} = \frac{p(y_t|x_t^{(i)})p(x_t^{(i)}|x_{t-1}^{(i)})}{q(x_t^{(i)}|x_{1:t-1}^{(i)}, y_{1:t})} w_{t-1}^{*(i)}$$

4. Para $i = 1, \dots, N$, se normalizan los pesos de importancia:

$$\tilde{w}_t^{(i)} = \frac{w_t^{*(i)}}{\sum_{j=1}^N w_t^{*(j)}}, \quad \sum_{i=1}^N \tilde{w}_t^{(i)} = 1$$

El problema que se presenta con el algoritmo de filtro de partículas genérico es el fenómeno de la degeneración. Es conocido que después de unas pocas iteraciones las partículas pueden tener pesos despreciables lo que implica según la Proposición 1 definida en Doucet et al. (2000), que la varianza de los pesos de importancia pueden incrementarse en el tiempo. Para evitar la degeneración del algoritmo, Doucet et al. [30] establecieron la Proposición 2, que permite seleccionar una función de importancia que minimiza la varianza de los pesos sobre las trayectorias de los estados simulados $\{x_{1:t-1}^{(i)}, i = 1, 2, \dots, N\}$ y las observaciones $y_{1:t}$; en el Apéndice E se definen las proposiciones 1 y 2. La función de importancia sugerida por ellos es $q_t(x_t|x_{1:t-1}^{(i)}, y_{1:t})$, con:

$$q(x_t|x_{1:t-1}^{(i)}, y_{1:t})_{optimo} = p(x_t|x_{t-1}^{(i)}, y_t) = \frac{p(y_t|x_t, x_{t-1}^{(i)})p(x_t|x_{t-1}^{(i)})}{p(y_t|x_{t-1}^{(i)})} \quad (48)$$

es decir, $q(x_t|x_{1:t-1}^{(i)}, y_{1:t})_{optimo}$ es la función de importancia que minimiza a la varianza de los pesos de importancia $w_t^{*(i)}$ condicionada sobre los estados $\{x_{1:t-1}^{(i)}, i = 1, 2, \dots, N\}$ y los datos observados $y_{1:t}$. Sustituyendo (48) en (45), se obtiene:

$$w_t^{*(i)} \propto p(y_t|x_{t-1}^{(i)})w_{t-1}^{*(i)} \quad (49)$$

Como la degeneración del algoritmo de filtro de partícula es inevitable, entonces se introduce la idea del remuestreo que consiste en eliminar las trayectorias que tienen pesos de importancias pequeños y concentrarse sobre trayectorias con pesos grandes. Una medida adecuada para solventar el problema es calcular el tamaño de muestra efectiva (N_{TME}) introducido en Kong et al. (1994) [31], y Liu (1996) [32], y que se define como:

$$N_{TME} = \frac{N}{1 + Var(w_t^{*(i)})} \quad (50)$$

en la práctica es complicado calcular N_{TME} exactamente, pero se estima por:

$$\hat{N}_{TME} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N [\tilde{w}_t^{(i)}]^2} \quad (51)$$

entonces se compara \hat{N}_{TME} con un umbral prefijado N_U . Este procedimiento de filtro de partículas con remuestreo es usado por Rubin (1988) [33]. El algoritmo modificado se resume como sigue:

Algoritmo filtro de partículas con remuestreo.

1. Muestreo de Importancia

- Se inicializan el estado inicial $x_0 \sim p(.,.)$, donde $p(.,.)$ es una distribución a priori conocida, y las muestras $\{x_{1:t-1}^{(i)}, i = 1, 2, \dots, N\}$ de la distribución a posteriori $p(x_{t-1}|y_{1:t-1})$ en $t - 1$, con $t = 1, \dots, T$.

- Para $i = 1, \dots, N$, se muestrea

$$\tilde{x}_t^{(i)} \sim q(x_t|x_{1:t-1}^{(i)}, y_{1:t})$$

y se construye el conjunto $\tilde{x}_{1:t}^{(i)} = \{x_{1:t-1}^{(i)}, \tilde{x}_t^{(i)}\}$.

- Para $i = 1, \dots, N$, se evalúan los pesos de importancia:

$$w_t^{*(i)} \propto w_{t-1}^{*(i)} \frac{p(y_t|\tilde{x}_t^{(i)})p(\tilde{x}_t^{(i)}|\tilde{x}_{t-1}^{(i)})}{q(\tilde{x}_t^{(i)}|\tilde{x}_{1:t-1}^{(i)}, y_{1:t})}$$

- Para $i = 1, \dots, N$, los pesos de importancia se normalizan:

$$\tilde{w}_t^{(i)} = \frac{w_t^{*(i)}}{\sum_{j=1}^N w_t^{*(j)}}, \quad \sum_{i=1}^N \tilde{w}_t^{(i)} = 1$$

- Se evalúa \hat{N}_{TME} usando la ecuación (51).

2. Remuestreo

- Si $\hat{N}_{TME} \geq N_U$, se hace $x_{1:t}^{(i)} = \tilde{x}_{1:t}^{(i)}$, para $i = 1, \dots, N$.
- Si $\hat{N}_{TME} < N_U$, para $i = 1, \dots, N$, se muestrea un índice $j(i)$ distribuido de acuerdo a la distribución discreta con N elementos que satisfacen $P_r\{j(i) = l\} = \tilde{w}_t^{(l)}$ para $l = 1, \dots, N$.
- Para $i = 1, \dots, N$, se hace $x_{1:t}^{(i)} = \tilde{x}_{1:t}^{j(i)}$ y $w_t^{(i)} = \frac{1}{N}$.

Finalmente, se tiene al cabo del tiempo t la aproximación:

$$p_N(x_t|y_{1:t}) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_{x_{1:t}^{(i)}}(x_t) \quad (52)$$

3.3. Filtro de Kalman de ensamble (FKEN)

El FKEN fue desarrollado por Evensen (1994) [34], Evensen y Leeuwen (1996) [35]. Es un algoritmo basado en los métodos de Monte Carlo Secuencial utilizado para aproximar la distribución a posteriori de los estados de sistemas no lineales en altas dimensiones.

- Representa los errores usando un ensamble de los estados del modelo.
- Los errores evolucionan a través de la integración de los ensambles.
- Minimiza la varianza usando un paso de predicción y otro de actualización.
- Usa técnicas de Monte Carlo de bajo rango.
- Converge al filtro de Kalman cuando se incrementa el tamaño del ensamble.
- Background: la estimación de un estado x_t , obtenido a partir de un estado x_{t-1} se llama conocimiento previo en el ciclo de asimilación t , y se denota por x_t^b .
- Análisis: Dado x el procedimiento de actualizar x_t^b por el ajuste lineal de Bayes se llama análisis y se denota por x_t^a .
- La covarianza del E (background): $P^b = E(x^b - x)(x^b - x)^T$.
- La covarianza del E (análisis): $P^a = E(x^a - x)(x^a - x)^T$.

Algoritmo FKEN.

- Creación del ensamble inicial. Dados (\hat{x}_0, \hat{P}_0) , y $\hat{P}_0 = \hat{S}_0 \hat{S}_0^T$.

$$x_{0,i}^a = \hat{x}_0 + \hat{S}_0 n_0^i \quad ; \quad n_0^i \sim N(0, I)$$

$$\hat{x}_0^b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{0,i}^a$$

$$\hat{P}_0^b = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{0,i}^a - \hat{x}_0^b)(x_{0,i}^a - \hat{x}_0^b)^T$$

- Pronóstico del ensamble. Dadas $(\hat{x}_t^b, \hat{P}_t^b)$, y $\hat{P}_t^b = \hat{S}_t \hat{S}_t^T$,

$$x_{t,i}^a = \hat{x}_t^b + \hat{S}_t n_t^i, \quad n_t^i \sim N(0, I)$$

$$x_{t,i}^b = \mathcal{M}_t(x_{t,i}^a) + u_t^i, \quad u_t^i \sim N(0, Q_t).$$

- Media del pronóstico:

$$\hat{x}_t^b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{t,i}^b$$

- Error del pronóstico:

$$e_t^i = x_{t,i}^b - \hat{x}_t^b$$

- Covarianza del pronóstico:

$$\hat{P}_t^b = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{t,i}^b - \hat{x}_t^b)(x_{t,i}^b - \hat{x}_t^b)^T + Q_t$$

En la práctica, no es común aproximar \hat{P}_t^b y en su lugar se estima:

$$\hat{P}_t^{cr} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{t,i}^b - \hat{x}_t^b) [\mathcal{H}_t(x_{t,i}^b) - \mathcal{H}_t(\hat{x}_t^b)]^T$$

$$A = [\mathcal{H}_t(x_{t,i}^b) - \mathcal{H}_t(\hat{x}_t^b)]$$

$$B = [\mathcal{H}_t(x_{t,i}^b) - \mathcal{H}_t(\hat{x}_t^b)]^T$$

$$\hat{P}_t^{pr} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (A)(B)$$

- Análisis del ensamble. Se generan observaciones sintéticas:

$$w_{t+1}^i = \mathcal{H}_{t+1}(x_{t+1,i}^b) + v_{t+1}^i, \quad v_{t+1}^i \sim N(0, R_{t+1})$$

- Media actualizada:

$$\hat{x}_{t+1}^a = \hat{x}_{t+1}^b + K_{t+1}(w_{t+1} - w_{t+1}^i)$$

- Covarianza actualizada:

$$\hat{P}_{t+1}^a = \hat{P}_{t+1}^b - K_{t+1}(\hat{P}_{t+1}^{cr})^T$$

- Matriz de ganancia:

$$K_{t+1} = \hat{P}_{t+1}^{cr} (\hat{P}_{t+1}^{pr} + R_{t+1})^{-1}$$

3.4. Filtro de Kalman de los puntos sigmas (FKPS)

El FKPS utiliza un conjunto de puntos de cuadratura, llamados sigma-puntos, para aproximar la integral de Chapman-Kolmogorov [36]. Estos puntos se generan a partir de una distribución Gaussiana. Se utiliza la parametrización de la media y la covarianza para hacer la aproximación.

La distribución del vector de estados, tiene una distribución Gaussiana multivariada, dada por:

$$p(x_{k-1}|y_{1:k-1}) \sim N(\hat{x}_{k-1}, p_{k-1})$$

donde \hat{x}_{k-1} es un vector de medias, y p_{k-1} es una matriz de varianza covarianza.

La integral de Chapman-Kolmogorov es de la forma:

$$\int_{\mathbb{R}^n} \mu(x)\omega(x)dx$$

donde $\mu(x)$ es una distribución de probabilidad arbitraria, $\omega(x)$ es la distribución de probabilidad a priori del vector de estados. Entonces:

$$\int_{\mathbb{R}^n} \mu(x)\omega(x)dx = \int_{\mathbb{R}^n} \mu(x)N(\hat{x}_{k-1}, p_{k-1})dx$$

Para aproximar numéricamente la integral, se requiere de una representación discreta de $p(x_{k-1}|y_{1:k-1})$, la cual se lleva a cabo generando un conjunto de puntos de una distribución Gaussiana igual que las variables de estados originales [36]:

$$\chi_j = \begin{cases} \sqrt{n + \rho}e_j, & 1 \leq j \leq n \\ -\sqrt{n + \rho}e_{j-n}, & n + 1 \leq j \leq 2n \\ 0, & 2n + 1 \end{cases}$$

y

$$\omega_j = \begin{cases} \frac{\rho}{n+\rho}, & j = 2n + 1 \\ \frac{1}{2(n+\rho)}, & 1 \leq j \leq 2n \end{cases}$$

donde ρ es una constante, y e_j es el j -ésimo vector unitario de \mathbb{R}^n . Julier et al. (1996) [37] propusieron un FKPS basado en una regla de cuadratura para funciones escalares, que es

idéntica a la regla de la cuadratura Gauss-Hermit, propusieron aproximar:

$$\int_{\mathbb{R}^n} \mu(x)\omega(x)dx \approx \sum_{i=1}^{2n+1} \mu(\chi_j)\omega(\chi_j)$$

Se requieren $2n + 1$ puntos como mínimo necesario para preservar los primero y segundo momentos de la distribución Gaussiana multivariada. Se supone que $\omega(\chi_j)$ es un peso de cuadratura constante en el tiempo, mientras que los puntos de cuadratura varían de acuerdo a la covarianza de los estados.

Los puntos sigma se generan de acuerdo al siguiente proceso:

$$\chi_{k,j} = \begin{cases} \hat{x}_{k-1}, & j = 2n + 1 \\ \hat{x}_{k-1} + \psi \sqrt{p_{k-1,j}}, & 1 \leq j \leq n \\ \hat{x}_{k-1} - \psi \sqrt{p_{k-1,j}}, & n + 1 \leq j \leq 2n \end{cases}$$

donde \hat{x}_{k-1} es el valor esperado de los estados, $\sqrt{p_{k-1,j}}$ es la raíz cuadrada de la j -ésima columna asociada a la matriz varianza covarianza de los estados, ψ es un factor de escala que captura los efectos locales de la no linealidad de la función que se utiliza para aproximar.

Algoritmo FKPS.

- se inicializa en un tiempo $t = 0$:

$$\hat{x}_0 = \mathbb{E}(x_0) \quad ; \quad p_0 = \mathbb{E}[(x_0 - \hat{x}_0)(x_0 - \hat{x}_0)^T]$$

- predicción:

- se implementan los puntos sigmas:

$$\chi_{k,j}^- = \begin{cases} \hat{x}_{k-1}, & j = 2n + 1 \\ \hat{x}_{k-1} + \psi \sqrt{p_{k-1,j}}, & 1 \leq j \leq n \\ \hat{x}_{k-1} - \psi \sqrt{p_{k-1,j}}, & n + 1 \leq j \leq 2n \end{cases}$$

- evolución de los puntos sigmas:

$$\chi_{k,j}^+ = f(\chi_{k,j}^-)$$

- estimación de los estadísticos:

$$x_k^- = \sum_{j=1}^{2n+1} \omega_j \chi_{k,j}^+$$

y

$$p_k^- = \sum_{j=1}^{2n+1} \omega^j (\chi_{k,j}^+ - x_k^-)(\chi_{k,j}^+ - x_k^-)^T$$

■ actualización:

- se calcula la ganancia de Kalman:

$$\mathcal{G}_k = p_k^- \mathcal{H}_k^T (\mathcal{H}_k p_k^- \mathcal{H}_k^T + R_k)^{-1}$$

- se actualizan las predicciones:

$$\hat{x}_k = x_k^- + \mathcal{G}_k (y_k - \mathcal{H}_k x_k^-)$$

y

$$\hat{p}_k = p_k^- - \mathcal{G}_k \mathcal{H}_k p_k^-$$

4. Aplicación en el área de las finanzas

Para mostrar eficiencia de los algoritmos para estimar los estados y parámetros se consideraron dos modelos estocásticos del área financiera; el modelo de Cox Ingersell Ross (1985), y el modelo de Heston (1993) [38].

4.1. El modelo de Cox Ingersell Ross (CIR)

El modelo de Cox, Ingersell y Ross [39], describe la evolución de la tasa de interés mediante la siguiente ecuación diferencial estocástica:

$$dr_t = \beta(\mu - r_t)dt + \sigma \sqrt{r_t}dB_t \quad (53)$$

donde: B_t es un movimiento Browniano (que modela el factor de riesgo aleatorio del mercado), $\beta, \mu, y \sigma$ son parámetros. Utilizando la transformación $x_t = \ln(r_t) - \ln(\sigma^2)$, y aplicado el Lemma de Itô se tiene:

$$\begin{aligned} dx_t &= \frac{1}{r_t} \left\{ \beta(\mu - r_t)dt + \sigma \sqrt{r_t}dB_t \right\} - \frac{\sigma^2 r_t}{2r_t^2} dt \\ &= \left\{ \beta \left(\frac{\mu}{r_t} - 1 \right) - \frac{\sigma^2}{2r_t} \right\} dt + \sigma^2 \exp\left(-\frac{x_t}{2}\right) dB_t \end{aligned}$$

Usando la versión reparametrizada discutida en Chib et al. (2006), y Poyiadjs et al. (2011), se obtiene:

$$\begin{aligned} x_{t+1} &= \mu + x_t + \beta \exp(-x_t) + \exp\left(-\frac{x_t}{2}\right) \zeta_{t+1} \\ y_t &= \sigma_\zeta \exp\left(-\frac{x_t}{2}\right) \zeta_t \end{aligned} \quad (54)$$

Por facilidad, en este artículo sólo se estiman los estados $x_{1:t} = (x_1, \dots, x_t)$, suponemos los parámetros $\Theta = (\mu, \beta, \sigma_\zeta)$ conocidos; ellos también pueden ser estimados usando la metodología propuesta. Sea, además $\zeta_{t+1} \sim N(0, \sigma_\zeta^2)$, y $\xi_t \sim N(0, \sigma_\xi^2)$, dada las observaciones $y_{1:t} = (y_1, \dots, y_t)$.

Para implementar los algoritmos, se utilizaron las siguientes distribuciones a priori para inicializar los parámetros en el modelo de CIR:

- FKE se tomó: $\phi = 0.1; \sigma = 0.1, Q = 0.1, y R = 0.0001$.
- FPG se tomó: $\phi = 0.001; \sigma = 0.1, y Q = 0.0001$.
- FPR se tomó: $\phi = 0.1; \sigma = 0.1, y Q = 0.0001$.
- FKEN se tomó: $\phi = 0.1; \sigma = 0.1, y Q = 0.1; y R = 0.0001$.
- FKPS se tomó: $\phi = 0.1; \sigma = 0.1, y Q = 0.3; y R = 0.0001; \beta = 2; y \psi = 1$.

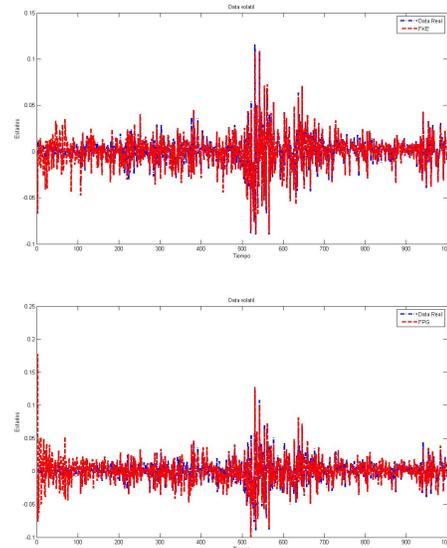


Figura 2: Estimación de los estados usando el FKE y FPG.

En las Figuras (2), (3), y (4), se muestran los estados estimados x_t , conjuntamente con los estados observados y_t , mediante los algoritmos: FKE, FPG, FPR, FKEN, y FKPS, respectivamente

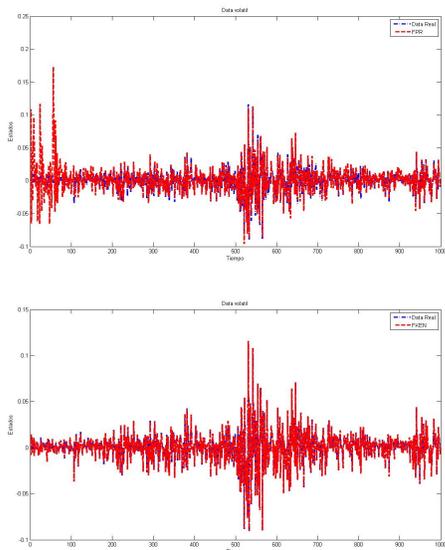


Figura 3: Estimación de los estados usando, el FPR y FKEN.

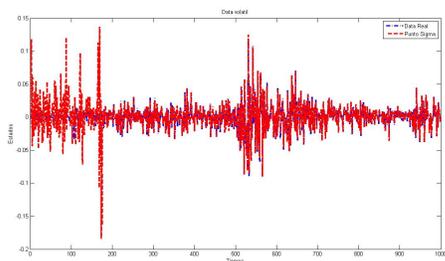


Figura 4: Estimación de los estados usando el FKPS.

Tabla 1: Raíz cuadrada del error cuadrático medio de los algoritmos para el modelo de CIR,

Filtros	FPG	FPR	FKE	FKEN	FKEN
RCECM	0.00016	0.0013	0.0015	0.000934	0.00063
T-CPU (seg)	0.02829	0.04039	0.32471	0.25477	0.10372

en el modelo CIR, observándose pocas diferencias entre los valores estimados y valores verdaderos.

En la Tabla (1) se muestran la raíz cuadrada del error cuadrático medio y los tiempos de ejecución CPU de los filtros implementados en el modelo de CIR, observándose poca variabilidad y tiempos de ejecución rápidos en todos los algoritmos implementados.

4.2. El modelo de Heston

El modelo de Heston es un modelo matemático usado para describir el comportamiento de un proceso estocástico bivariado entre el precio de las acciones s_t y su varianza v_t . Surgió inicialmente como una generalización del modelo de valoración de opciones Black-Scholes, pero suponiendo que la volatilidad es un proceso estocástico.

El modelo está gobernado por el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales estocásticas:

$$ds_t = \mu s_t dt + \sqrt{v_t} s_t dB_{1,t}$$

$$d(\sqrt{v_t}) = -\beta \sqrt{v_t} dt + \delta dB_{2,t}$$

Si se hace $\delta_t = (\sqrt{v_t})^2$, y se aplica el Lemma de Itô se obtiene:

$$d\delta_t = 2\sqrt{v_t}d(\sqrt{v_t}) + \frac{1}{2}[2(d\sqrt{v_t})^2]$$

$$= 2\sqrt{v_t}(-\beta\sqrt{v_t}dt + \delta dB_{2,t}) + \delta^2 dt$$

$$= (\delta^2 - 2\beta v_t)dt + 2\delta\sqrt{v_t}dB_{2,t}$$

$$= 2\beta\left(\frac{\delta^2}{2\beta} - v_t\right)dt + 2\delta\sqrt{v_t}dB_{2,t}$$

haciendo $k = 2\beta$; $\theta = \frac{\delta^2}{2\beta}$, y $\sigma = 2\delta$, se obtiene: $d\delta_t = dv_t = k(\theta - v_t)dt + \sigma\sqrt{v_t}dB_{2,t}$, luego el sistema dado previamente se transforma en:

$$ds_t = \mu s_t dt + \sqrt{v_t} s_t dB_{1,t}$$

$$dv_t = k(\theta - v_t)dt + \sigma\sqrt{v_t}dB_{2,t}$$

$$dB_{1,t}dB_{2,t} = \rho dt$$

donde las variables del sistema son definidas como sigue:

- s_t : es el precio del activo,
- v_t : es la volatilidad del activo,
- μ : es el retorno esperado del activo,
- θ : es la variación de precios a largo plazo,
- k : es la velocidad a la cual la volatilidad tiende hacia su media de largo plazo,
- σ : es la volatilidad de $\sqrt{v_t}$,

- ρ : es la correlación de los movimientos Browniano,
- $dt = t_k - t_{k-1}$: es un pequeño incremento en el tiempo,
- $dB_{1,t}$: es un movimiento Browniano estándar unidimensional,
- $dB_{2,t}$: es un movimiento Browniano estándar unidimensional.

El modelo de Heston versión discretizada es:

$$v_{t+1} = v_t + \kappa(\theta - v_t) + \sqrt{v_t}\sigma(\rho z_1 + \sqrt{1 - \rho^2}z_2) \quad ; \quad (E.E)$$

$$y_{t+1} = y_t + \left(\mu - \frac{1}{2}v_t\right) + \sqrt{v_t}z_1 \quad ; \quad (E.O)$$

donde $y_{t+1} = \ln(s_{t+1})$, y los parámetros del modelo son: $\Theta = (\kappa, \theta, \mu, \sigma, \rho)$.

Para implementar los algoritmos, se utilizaron las siguientes distribuciones a priori para inicializar los parámetros en el modelo de Heston:

- *FKE* se tomó:
- *FPG* se tomó: $\sigma = 100$; $\kappa = 3.3065$; $\theta = 0.0215$; $\rho = -0.9108$; $\phi = 0.05$; $\delta = 0.0001$; y $Q = 0.0001$.
- *FPR* se tomó: $\sigma = 100$; $\kappa = 3.3065$; $\theta = 0.0215$; $\rho = -0.9108$; $\phi = 0.05$; $\delta = 0.0001$; y $Q = 0.0001$.
- *FKEN* se tomó: $\sigma = 100$; $\kappa = 3.3065$; $\theta = 0.0215$; $\rho = -0.9108$; $\phi = 0.05$; $\delta = 0.0001$; y $Q = 0.0001$.
- *FKPS* se tomó: $\sigma = 100$; $\kappa = 3.3065$; $\theta = 0.0215$; $\rho = -0.9108$; $\phi = 0.05$; $\delta = 0.0001$; $Q = 0.0001$; $\beta = 2$; y $\psi = 1$.

En las Figuras (5), (6), y (7), se muestran los estados estimados v_t , conjuntamente con los estados observados y_t , mediante los algoritmos: FKE, FPG, FPR, FKEN, y FKPS, respectivamente generados por el modelo de Heston, observándose pocas diferencias entre los valores estimados y valores verdaderos. En la Tabla (2) se muestran

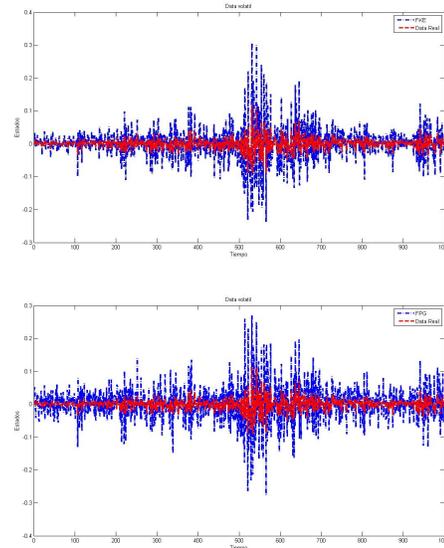


Figura 5: Estimación de los estados usando el FKE y FPG.

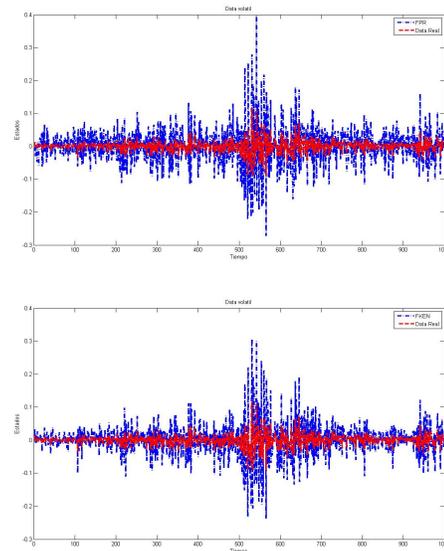


Figura 6: Estimación de los estados usando el FPR y FKEN.

la raíz cuadrada del error cuadrático medio y los tiempos de ejecución CPU de los filtros implementados en el modelo de CIR, observándose poca variabilidad y tiempos de ejecución rápidos para todos los algoritmos probados.

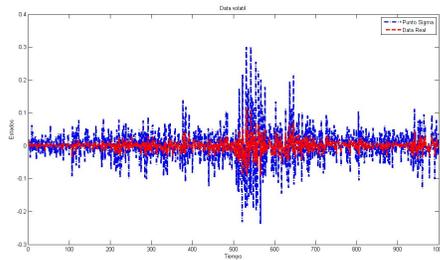


Figura 7: Estimación de los estados usando el FKPS.

Tabla 2: Raíz cuadrada del error cuadrático medio modelo de Heston.

Filtros	FPG	FPR	FKE	FKEN	FKPS
RCECM	0.0019	0.0018	0.0021	0.0012	0.0013
T-CPU (seg)	0.58342	0.23740	0.62397	0.32725	0.49664

5. Discusiones y conclusiones

La inferencia estadística sobre procesos estocásticos de tiempo continuo tales como los sistemas dinámicos es un área de investigación activa desde el punto de vista de la matemática pura así como también de la matemática aplicada. Es conocido que un sistema dinámico puede ser caracterizado por un modelo espacio estado. La formulación en términos de los modelos espacio estado permite: cuantificar el error de las ecuaciones de estado y observación; establecer la relación entre el proceso físico y el modelo estadístico, y estimar los estados ocultos a partir de las medidas obtenidas con errores. En este trabajo se proponen cinco algoritmos recursivos: FKE, FPG, FPR, FKEN y FKPS; que permiten hacer inferencia en procesos de tiempo discretos con observaciones tomadas en tiempo continuo, las cuales pueden tener estructuras lineales, no lineales, errores Gaussianos, y no Gaussianos. La metodología propuesta es ilustrada utilizando dos ecuaciones diferenciales estocásticas que provienen de las finanzas. Los algoritmos utilizados permiten generar muestras para la reconstrucción aproximada de las distribuciones marginales a posteriori de los estados desconocidos. En el estudio empírico, se demuestra que los filtros tienen buena performance

en la estimación de los estados; además, no se observó mucha diferencia entre los valores estimados y los valores verdaderos. La calidad de estimación de los algoritmos es valorada a través del cálculo de la raíz del error cuadrático medio obteniéndose errores de estimación pequeños, además se calcularon los tiempos de ejecución de los algoritmos obteniéndose resultados satisfactorios.

Referencias

- [1] Simo Särkkä and Arno Solin. Lecture notes on applied stochastic differential equations, 2014. Version as of December 4, 2014.
- [2] Simo Särkkä. *Bayesian filtering and smoothing*. Cambridge University Press, Cambridge, 2013.
- [3] Andrew Jazwinski. Stochastic processes and filtering theory. In *Mathematics in Science and Engineering*, volume 64. Elsevier, 1970.
- [4] Bernt Øksendal. *Stochastic Differential Equations. An Introduction with Applications*, chapter 5. Stochastic Differential Equations, pages 65–84. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2003.
- [5] Stefano M. Iacus. *Simulation and inference for stochastic differential equations. With R examples*. Springer-Verlag, New York, 2008.
- [6] Stefano M. Iacus. *Option pricing and estimation of financial models with R*. John Wiley & Sons, 2011.
- [7] Umberto Picchini. Inference for sde models via approximate bayesian computation. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 23(4):1080–1100, 2014.
- [8] Andrew C Harvey. *Forecasting, structural time series models and the Kalman filter*. Cambridge University Press, 1990.
- [9] Jesús Fernández-Villaverde and Juan F Rubio-Ramírez. Estimating dynamic equilibrium economies: linear versus nonlinear likelihood. *Journal of Applied Econometrics*, 20(7):891–910, 2005.
- [10] Neil Shephard and Michael K. Pitt. Likelihood analysis of non-gaussian measurement time series. *Biometrika*, 84(3):653–667, 1997.
- [11] Tsunehiro Ishihara and Yasuhiro Omori. Efficient bayesian estimation of a multivariate stochastic volatility model with cross leverage and heavy-tailed errors. *Computational Statistics & Data Analysis*, 56(11):3674–3689, 2012.
- [12] Seung-Ho Yang and Jaewook Lee. Predicting a distribution of implied volatilities for option pricing. *Expert Systems with Applications*, 38(3):1702–1708, 2011.
- [13] Tatiana Miazhynskaia, Sylvia Frühwirth-Schnatter, and Georg Dorffner. Bayesian testing for non-linearity in

- volatility modeling. *Computational statistics & data analysis*, 51(3):2029–2042, 2006.
- [14] Elena Lazkano, Basilio Sierra, Aitzol Astigarraga, and José María Martínez-Otzeta. On the use of bayesian networks to develop behaviours for mobile robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 55(3):253–265, 2007.
- [15] Mónica Viviana Alvarado Mora, Camila Malta Romano, Michele Soares Gomes-Gouvêa, Maria Fernanda Gutierrez, Livia Botelho, Flair José Carrilho, and João Renato Rebello Pinho. Molecular characterization of the hepatitis b virus genotypes in colombia: A bayesian inference on the genotype f. *Infection, Genetics and Evolution*, 11(1):103–108, 2011.
- [16] David Allen and Adnan Darwiche. RC.Link: Genetic linkage analysis using Bayesian networks. *International journal of approximate reasoning*, 48(2):499–525, 2008.
- [17] A. Biedermann and F. Taroni. Bayesian networks for evaluating forensic DNA profiling evidence: A review and guide to literature. *Forensic Science International: Genetics*, 6(2):147–157, 2012.
- [18] Andrew Golightly and Darren J. Wilkinson. Bayesian parameter inference for stochastic biochemical network models using particle Markov chain Monte Carlo. *Interface Focus*, 1(6):807–820, 2011.
- [19] E. L. Ionides. Inference and filtering for partially observed diffusion processes via sequential Monte Carlo. Technical Report 405, Department of Statistics, The University of Michigan,, Michigan, 2004.
- [20] E. L. Ionides, C. Bretó, and A. A. King. Inference for nonlinear dynamical systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(49):18438–18443, 2006.
- [21] Fredrik Lindsten, Michael I. Jordan, and Thomas B. Schön. Particle gibbs with ancestor sampling. *The Journal of Machine Learning Research*, 15(1):2145–2184, 2014.
- [22] R. Vieira and D. J. Wilkinson. Online state and parameter estimation in dynamic generalised linear models. *ArXiv e-prints*, august 2016.
- [23] Jonathan Law and Darren J. Wilkinson. Composable models for online bayesian analysis of streaming data. *Statistics and Computing*, pages 1–19, Oct 2017.
- [24] Fabio Sigrist, Hans R. Künsch, and Werner A. Stahel. A dynamic nonstationary spatio-temporal model for short term prediction of precipitation. *The Annals of Applied Statistics*, 6(4):1452–1477, 2012.
- [25] Saba Infante, César Luna, Luis Sánchez, and Aracelis Hernández. Approximations of the solutions of a stochastic differential equation using Dirichlet process mixtures and gaussian mixtures. *Statistics, Optimization & Information Computing*, 4(4):289–307, 2016.
- [26] Saba Infante, Luis Sánchez y Fernando Cedeño. Filtros para predecir incertidumbre de lluvia y clima. *Revista de Climatología*, 12:33–48, 2012.
- [27] Luis Sánchez, Saba Infante, Victor Griffin, and Demetrio Rey. Spatio-temporal dynamic model and parallelized ensemble kalman filter for precipitation data. *Brazilian Journal of Probability and Statistics*, 30(4):653–675, 2016.
- [28] Luis Sánchez, Saba Infante, Jose Marcano, and Victor Griffin. Polynomial chaos based on the parallelized ensemble kalman filter to estimate precipitation states. *Statistics, Optimization & Information Computing*, 3(1):79–95, 2015.
- [29] D. Crisan and A. Doucet. A survey of convergence results on particle filtering methods for practitioners. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 50(3):736–746, 2002.
- [30] Arnaud Doucet, Nando de Freitas, and Neil Gordon. *An Introduction to Sequential Monte Carlo Methods*, chapter 1, pages 3–14. Springer New York, New York, NY, 2001.
- [31] Augustine Kong, Jun S. Liu, and Wing Hung Wong. Sequential imputations and bayesian missing data problems. *Journal of the American Statistical Association*, 89(425):278–289, 1994.
- [32] Jun S. Liu. Metropolized independent sampling with comparisons to rejection sampling and importance sampling. *Statistics and Computing*, 6(2):113–119, 1996.
- [33] B.D. Rubin. *Bayesian Statistics 3*, chapter Using the SIR Algorithm to Simulate Posterior Distributions, pages 395–402. Oxford University Press, Oxford, 1988.
- [34] Geir Evensen. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using monte carlo methods to forecast error statistics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99(C5):10143–10162, 1994.
- [35] Geir Evensen and Peter Jan Van Leeuwen. Assimilation of geosat altimeter data for the Agulhas current using the ensemble Kalman filter with a quasigeostrophic model. *Monthly Weather Review*, 124(1):85–96, 1996.
- [36] K. Ito and K. Xiong. Gaussian filters for nonlinear filtering problems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 45(5):910–927, 2000.
- [37] Simon J. Julier and E. L. Uhlman. A general method for approximating nonlinear transformations of probability distributions. Technical Report, Department of Engineering Science, University of Oxford, Oxford, 1996.
- [38] Steven L. Heston. A closed-form solution for options with stochastic volatility with applications to bond and currency options. *The Review of Financial Studies*, 6(2):327–343, 1993.
- [39] John C. Cox, Jonathan E. Ingersoll, and Stephen A. Ross. A theory of the term structure of interest rates. *Econometrica*, 53(2):385–408, 1985.

Depuration of gaseous emissions from the production of pentolite

Ixmit Lopez S., Viky C. Mujica F., María del Carmen Rodríguez de S.*

Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Abstract.-

This work studies the pollutants present in the gaseous emissions of a company producing pentolite, in order to quantify them and develop a proposal to adapt to environmental standards. Among the results, the immediate need to purify the gases due to the high concentration of TNT in the gases generated in the process (14453.1 mg/m^3), that established by the OSHA standards for nitroaromatic compounds (1.5 mg/m^3). To solve this problem, a gas extraction and purification system is designed, consisting of: four extractor hoods, one centrifugal fan and two bubble tanks in series. Its operation is based on the aspiration of the polluting gases through the extractor hoods; These flow forcefully from the fan through pipes to the bubbling tank. Using Fine's method, the degree of danger can be reduced from 1500 to 30 when installing the system, and it can be changed from a high-risk to a non-emergency condition in the working environment. The equipment selected, provide high efficiency, obtaining a concentration of trinitrotoluene in the gases emanating from the process of $1,445 \text{ mg/m}^3$ within the value established by OSHA.

Keywords: pentolite; trinitrotoluene; gas cleaning; occupational health.

Depuración de las emisiones gaseosas procedentes de la producción de pentolita

Resumen.-

Este trabajo, estudia los contaminantes presentes en las emisiones gaseosas de una empresa productora de pentolita, con el fin de cuantificarlos y desarrollar una propuesta para adecuarse a las normas ambientales. Entre los resultados, se destaca la necesidad inmediata de depurar los gases debido a la alta concentración de trinitrotolueno (TNT) en los gases generados en el proceso ($14453,1 \text{ mg/m}^3$), la establecida por las normas de la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) para compuestos nitroaromáticos ($1,5 \text{ mg/m}^3$). Para solucionar esta problemática se diseña un sistema de extracción y depuración de gases, conformado por: cuatro campanas extractoras, un ventilador centrífugo y dos tanques de burbujeo en serie. Su funcionamiento está basado en la aspiración de los gases contaminantes a través de las campanas extractoras; estos fluyen por fuerza del ventilador a través de tuberías hacia el tanque de burbujeo. Empleando el método de Fine se puede reducir el grado de peligrosidad de 1500 a 30 al instalar el sistema, logrando pasar de una condición de alto riesgo a una de no emergencia en el ambiente de trabajo. Los equipos seleccionados, proporcionan gran eficiencia, obteniendo una concentración de TNT en los gases emanados del proceso de $1,445 \text{ mg/m}^3$ dentro del valor establecido por la OSHA.

Palabras clave: pentolita; trinitrotolueno; depuración de gases; salud ocupacional.

Recibido: julio 2017

Aceptado: diciembre 2017

1. Introducción

El calentamiento global y el control de emanaciones tóxicas al ambiente son tópicos de gran interés debido a lo importante que es mantener el

* Autor para correspondencia

Correo-e: mcrc63@yahoo.com (María del Carmen Rodríguez de S.)

entorno de vida sano y limpio. Todos los procesos industriales donde se generan gases o vapor deben controlar sus emisiones antes de descargarlas al ambiente. Durante la producción de explosivos se obtienen residuos considerados como peligrosos por la EPA (Environmental Protection Agency), los riesgos potenciales de estos residuos para los ecosistemas y el hombre han creado la necesidad de buscar métodos efectivos y ambientalmente amigables que permitan la producción con el menor impacto [1, 2, 3].

Los explosivos son compuestos o mezclas de compuestos químicos que bajo la influencia de un choque químico o térmico, se descomponen rápidamente y de forma espontánea con la liberación de grandes cantidades de gas y calor [4].

Para la producción de artificios militares, se requiere pentolita como materia prima. La pentolita está compuesta por trinitrotolueno (TNT) y tetranitrato de pentaeritritol (pentrita); ambos compuestos orgánicos, de los cuales el TNT es el más contaminante de los dos. El TNT es un hidrocarburo aromático, explosivo primario e insoluble en agua [5]. Por otra parte, la pentrita es un detonante que no reacciona por movimiento brusco o la ignición a presión atmosférica normal, sino que es sensible a la fricción, las características recalcitrantes, xenobióticas y el riesgo para la salud del hombre y el ambiente que causa la contaminación por pentrita fue contemplado en el Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP's) [6].

La presente investigación se realizó en una empresa venezolana cuya misión es atender el desarrollo de las industrias militares. La empresa tiene como objetivo la producción de materia prima para explosivos, así como también la fabricación y comercialización de armamentos, municiones, explosivos, químicos y otros materiales o equipos que interesen a los fines de la defensa nacional o que sean afines con su actividad industrial, manteniéndose el compromiso de obtener productos de excelente calidad.

El mezclado de materiales para producir la pentolita se realiza manualmente, por lo que los trabajadores están en contacto directo con los gases que se desprenden del proceso. A su vez,

la fundición del trinitrotolueno se realiza en un tanque cerrado con venteo en la parte superior, pero una vez que se envía a la tina de mezclado y comienza la unión con la pentrita, se generan gases que afectan el ambiente y a los trabajadores, debido a que no son tratados ni controlados en el proceso, y no se dispone de ningún sistema en la planta que extraiga los gases del lugar de trabajo.

Tomando en cuenta esta situación, en esta investigación se plantea la extracción de estos gases, pasando por una depuración previa, para así liberarlos al ambiente, produciendo menor impacto en los trabajadores y al medio ambiente, logrando así disminuir riesgos de contaminación ambiental y evitar enfermedades ocupacionales en los trabajadores.

2. Metodología

2.1. Caracterización de los gases emanados del proceso de pentolita

Se realizó con el fin conocer las sustancias y compuestos que posiblemente se desprenden durante la fabricación. La prueba experimental se realizó recolectando muestras a las condiciones normales de trabajo en la planta, manteniendo las condiciones estándar del proceso. El estudio de caracterización de los gases se llevó a cabo a través de las técnicas de cromatografía de gases y espectroscopia de masa, la primera sirve para obtener y confirmar a través de los espectros los componentes de las muestras analizadas y la segunda se utilizó para conocer los compuestos presentes en las muestras recolectadas.

Para conocer la concentración de las muestras analizadas por cromatografía de gases, se hace uso de la ecuación (1).

$$C_i = \frac{m_i - m_f}{V_s} 1000 \quad (1)$$

Donde:

- C_i : Concentración de la muestra (mg/m^3)
- m_i : Masa inicial de la muestra a fundir (g)
- m_f : Masa final de la muestra fundida (g)
- V_s : Volumen del lugar de trabajo (m^3)

2.2. Análisis de las condiciones de trabajo en planta

Para determinar el nivel permitido para las emanaciones tóxicas provenientes del proceso de pentolita, se emplea la hoja de seguridad de OSHA para el compuesto contaminante [7].

Actualmente, en Venezuela, el organismo encargado de velar por el bienestar de los trabajadores y el cumplimiento de las normativas establecidas por los entes gubernamentales es el Instituto Nacional de Prevención, Salud y Seguridad Laborales (INPSASEL); el cual fue creado según lo establecido en el artículo 12 de la Ley Orgánica de Prevención, Condiciones y Medio Ambiente de Trabajo, LOPCYMAT, publicada el 26 de Julio de 2005, en la Gaceta Oficial N° 38.236. El INPSASEL, es el encargado de realizar las inspecciones para la evaluación de los trabajadores y velar por sus mejores condiciones de trabajo, según lo establecido en la LOPCYMAT. Principalmente, los artículos 10 y 11 de la Ley, establecen las normas principales para prevenir enfermedades ocupacionales y proporcionar un adecuado ambiente de trabajo [8].

Existe una gran gama de métodos para evaluar condiciones de trabajo, pero según el estudio que se desee llevar a cabo, el método Fine es el más indicado porque se enfoca principalmente en las condiciones de trabajo de los operarios y sus posibles peligros a los que están sometidos respecto a emanaciones tóxicas provenientes del proceso donde se encuentren trabajando [9]. Otros toman principalmente riesgos ergonómicos y no es el punto de estudio a abordar en la presente investigación.

El método Fine es un método que se fundamenta en el cálculo del grado de peligrosidad de una actividad y permite establecer prioridades entre las distintas situaciones de riesgo en función del peligro causado. Tal sistema de prioridad está basado en la utilización de una fórmula simple para calcular el peligro en cada situación de riesgo y de este modo llegar a una acción correctora. Se lleva a cabo utilizando la ecuación (2) [10, 11].

$$G = C(E)P \quad (2)$$

Donde:

G: Grado de Peligrosidad

C: Consecuencias

E: Exposición

P: Probabilidad

Las consecuencias son los resultados más probables de un accidente debido al riesgo que se considera, incluyendo desgracias personales y daños materiales. La exposición, por su parte, se considera como la frecuencia con que se presenta la situación de riesgo; mientras que la probabilidad establece cuántas veces se puede presentar. Todos los valores para estos factores, se obtienen en un rango establecido por el método [10, 11].

2.3. Propuesta de alternativas de los sistemas tecnológicos

Se analizaron las variables involucradas en el proceso de extracción y depuración de gases, tales como velocidad de los gases, presión, temperatura, entre otras, en base a esto, se realizó un análisis técnico de la eficiencia evaluando las ventajas y desventajas de cada tecnología para garantizar así la reducción de la contaminación de estas emanaciones.

2.4. Selección de la tecnología para el sistema de extracción y depuración de gases

En primer lugar se emplea una matriz de selección donde se consideran criterios de seguridad y operatividad, para analizar las diferentes propuestas. En la matriz de selección desarrollada, se asignó una ponderación del 0-100 para cada criterio y del 0-5 para cada alternativa. Entre los criterios utilizados para la selección de la tecnología se tiene: eficiencia, costo de los equipos, ahorro energético, mantenimiento, servicios industriales y caída de presión.

La matriz de selección se realizó por separado, para cada equipo del sistema de extracción y depuración de gases. Así finalmente, se obtuvo el sistema más eficaz para la extracción y depuración de los gases emanados del sistema.

2.5. Diseño del sistema de extracción y depuración de los gases

Una vez seleccionada la tecnología para la extracción y depuración de los gases, se determina

la dimensión de los equipos. Este diseño se inició con la elaboración del diagrama de bloques del proceso, de allí se detallan las exigencias y equipos principales que posteriormente constituirían el sistema de extracción y depuración de gases. Luego, se desarrolló el diagrama de flujo del proceso, para determinar la dirección de las corrientes y los diferentes componentes que se tendrán circulando en el sistema a desarrollar. Las variables necesarias para el diseño del sistema, algunas se obtuvieron por análisis experimentales y otras por antecedentes, tales como velocidad del flujo de gas, presión, concentración, entre otras.

Es importante resaltar que fue necesario revisar las normas OSHA para compuestos nitroaromáticos [7], ya que de allí se obtuvo un criterio importante de diseño, tal como fue la concentración permitida de los contaminantes provenientes del proceso de pentolita, y así determinar las mejores condiciones de operación del sistema de extracción y depuración.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización de los gases emanados del proceso de pentolita

Una vez realizados los análisis del espectro de masa, se obtuvo que del proceso se desprende únicamente TNT; esto es posible porque en la producción de pentolita solo se funde el TNT, mientras que la pentrita se mantiene sólida en la mezcla, ya que el baño maría donde se lleva a cabo el proceso no se acerca a su temperatura de fusión. El otro compuesto que se obtiene en el espectro es la acetona, por ser el medio solvente de la muestra.

Al realizar la cromatografía de gases en 4 muestras recolectadas en la planta, se obtienen dos picos tal como se observa en la Figura 1; uno indica la acetona, y otro pico indicó la presencia de TNT empleando una muestra patrón de TNT disuelto en acetona.

Luego de conocer el compuesto contaminante que se desprende en la fabricación de pentolita, se procede a obtener su concentración. Ésta se determinó a partir del espacio físico del lugar de trabajo (120 m^3), ya que se debe obtener en función del volumen de aire donde se desprenden

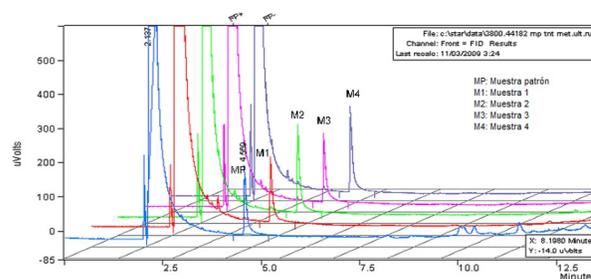


Figura 1: Cromatograma del patrón con las muestras 1, 2, 3 y 4.

los gases, como se establece en las normativas de la OSHA.

En el proceso que se lleva a cabo en planta, se utiliza una masa de 50 kg, mientras que las actividades experimentales se realizaron con una masa de 50 g. Para obtener la concentración de 50 kg de masa de pentolita, se utiliza una relación de 1g de pentolita en la concentración experimental por cada 1000 g de pentolita en la concentración del proceso en planta; se obtiene entonces una concentración promedio de $14453,1 \text{ mg/m}^3$.

3.2. Análisis de las condiciones de trabajo en planta

El nivel permitido para las emanaciones tóxicas provenientes del proceso de pentolita, se obtuvo a través de la hoja de seguridad de OSHA para el compuesto contaminante (TNT). Esta organización estableció que para una jornada de trabajo de 8 horas diarias y 40 horas semanales, debe existir una concentración máxima de $1,5 \text{ mg/m}^3$ [7].

El nivel de emanaciones máxima permitidas es superado por las condiciones actuales de trabajo, por lo que, se procede a realizar la evaluación de riesgos en un ambiente de trabajo a través del método matemático desarrollado por William T. Fine [10, 11].

Las medidas a tomar para mejoras, en caso que se necesiten, viene dado dependiendo del valor que se obtenga del grado de peligrosidad, como se muestra en la Tabla 1.

De acuerdo al cuadro de ponderación para cada criterio, se obtuvo el grado de peligrosidad tanto para la situación actual como para la situación con las condiciones más adecuadas de trabajo.

Tabla 1: Valoración de riesgos del método Fine.

Clasificación	Valoración
1. Consecuencia (C)	
Varias muertes	50
Muerte	25
Lesiones extremadamente graves (amputación, incapacidad permanente)	15
Lesiones con baja	5
Heridas leves, contusiones, golpes, pequeños daños	1
2. Exposición (E)	
Continuamente (o muchas veces al día).	10
Frecuentemente (aproximadamente una vez al día).	6
Ocasionalmente (de una vez por semana a una vez al día).	3
Raramente (se sabe que ocurre).	1
Remotamente posible (no se sabe que haya ocurrido).	0,5
3. Probabilidad (P)	
Es el resultado más probable y esperado si la situación de riesgo tiene lugar.	10
Es completamente posible, nada extraño, tiene una posibilidad del 50 %.	6
Sería una secuencia o coincidencia rara, 10 %.	3
Sería una coincidencia remotamente posible. Se sabe que ha ocurrido: 1 %.	1
Nunca ha sucedido en muchos años de exposición, pero concebible.	0,5
4. Grado de peligrosidad (G) = CEP	
Se requiere corrección inmediata. La actividad debe ser detenida hasta que el riesgo se haya disminuido.	≥ 200
Actuación urgente. Requiere atención lo antes posible.	$200 \geq GP \geq 85$
El riesgo debe ser eliminado sin demora, pero la situación no es una emergencia.	$85 <$

En la planta, existe una exposición continua a gases tóxicos provenientes del proceso de pentolita; la evaluación de la misma se observa en la Tabla 2, donde se muestran los valores obtenidos para cada criterio de evaluación.

Tabla 2: Ponderación utilizada para determinar el grado de peligrosidad en las condiciones actuales de planta.

Criterio	Característica	Ponderación
Consecuencia	Lesión grave	15
Exposición	Continua	10
Probabilidad	Alta	10

Para el criterio de consecuencia, se seleccionó un valor de 15, ya que puede haber una lesión grave, o desarrollar enfermedades ocupacionales como cáncer, con incapacidad permanente de trabajo. Respecto a la exposición, se seleccionó un valor de 10 ya que, como se dijo anteriormente, es continua debido a que ocurre en una jornada

de 8 horas de trabajo por 5 días a la semana. La probabilidad, obtuvo un valor de 10, debido a que es alta, por las condiciones de trabajo que se conocen y están presentes en todo momento.

Finalmente, al obtener el grado de peligrosidad, éste arroja un valor de 1500, lo que indica que se requiere una corrección inmediata del lugar de trabajo; por esto es conveniente y recomendable la instalación de un sistema de extracción y lavado de los gases del proceso.

Luego, para realizar el estudio de las condiciones más adecuadas de trabajo, se procede a evaluar el ambiente de trabajo tomando en cuenta que debería existir el sistema de extracción y lavado de gases. Esto conlleva a seleccionar otros valores para los criterios de evaluación, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3: Ponderación utilizada para determinar el grado de peligrosidad en las condiciones más adecuadas de trabajo en planta.

Criterio	Característica	Ponderación
Consecuencia	Lesión leve	5
Exposición	Frecuentemente	6
Probabilidad	Baja	1

En la consecuencia, por considerarse una lesión leve se ponderó con un valor de 5. La exposición sigue siendo continua de 8 horas diarias por 5 días a la semana a pesar que se reduce la concentración de gases emanados, por lo que se califica con un valor de 6. Finalmente se tiene una probabilidad de ser casi imposible según el método, ya que se asume una concentración mínima de agentes tóxicos en el ambiente de trabajo obteniendo el valor de uno. Así se obtiene un grado de peligrosidad de 30, lo cual indica que la situación no es una emergencia.

De esta manera, se observa entonces, que es necesario instalar un sistema de extracción y depuración de gases, ya que sería un beneficio para el proceso, mejorando las condiciones ambientales y otorgando un medio propicio de trabajo para los operarios del proceso.

3.3. Propuesta de alternativas de los sistemas tecnológicos actuales

Los sistemas tecnológicos que existen en la actualidad, ofrecen una gran cantidad de equipos y sistemas de gran eficiencia según los requerimientos necesarios del proceso que se esté estudiando. Para un sistema de extracción y depuración de gases, no se necesita una gran cantidad de equipos, pero los que se utilicen deben ofrecer gran efectividad para el proceso además de ser de fácil manejo, instalación y mantenimiento. Un sistema de extracción de gases, está formado básicamente por un ventilador extractor, conectado a un lavador de gases, tomando en cuenta las tuberías y accesorios necesarios para su instalación y unión, tal como se muestra en la Tabla 4. Estos equipos se estudian y seleccionan tomando en cuenta principalmente el flujo volumétrico de los gases contaminantes, su temperatura, espacio disponible para la instalación y la presión necesaria para el buen desenvolvimiento de los equipos.

Tabla 4: Propuestas tecnológicas consideradas.

Equipo	Propuesta tecnológica
Ventilador	Extractor centrífugo
Lavador de gases	Venturi
	Torre de relleno
	Tanque de burbujeo

Lavador de gases

1. *Tipo Venturi*: Es un lavador utilizado para limpiar aire, gases y vapores de varios contaminantes y partículas de polvo. Este tipo de lavador utiliza el diferencial entre la alta velocidad de los gases y el flujo libre de agua para crear gotas que atrapan a los contaminantes, los mantienen en suspensión y los liberan como un lecho de alta concentración. Es uno de los lavadores más usados, ya que se pueden usar como dispositivos de alta o baja energía; sin embargo, no son los más eficientes para una determinada potencia de contacto como otros equipos, pero su sencillez y flexibilidad favorecen

su función. El lavador Venturi maximiza la eficiencia de recolección de trazas, mientras que también minimiza costos de operación y mantenimiento por su simplicidad mecánica; sin embargo, presentan un alto consumo de energía, ya que necesita presurizar el gas para forzarlo a través del lavador [12].

2. *Torre de absorción con relleno*: Es una tecnología ampliamente utilizada para la recuperación de sustancias y compuestos presentes en los gases de emisión. También se utiliza para disolver componentes solubles de una mezcla gaseosa en un líquido; son recipientes cilíndricos verticales y en su interior poseen dispositivos como bandejas o lechos de relleno.

Por lo general, las fases líquida y gaseosa fluyen en contracorriente en el interior de la torre, y son los dispositivos internos, platos o rellenos, los que se encargan de promover el contacto entre las fases y así desarrollar la superficie interfacial a través de la cual se logra la transferencia de materia. Las torres de absorción con relleno son utilizadas para sistemas con materiales corrosivos y líquidos que forman espuma. A su vez, el relleno de la torre se escoge sobre la base de la resistencia a la corrosión, resistencia mecánica, capacidad para manejar los caudales requeridos, eficiencia en la transferencia de materia y costo.

El gas que contiene el soluto, o gas rico, entra en el espacio de distribución situado debajo del relleno y asciende a través de los intersticios del relleno en contracorriente con el flujo de líquidos. El relleno proporciona una gran área de contacto entre el líquido y el gas, que favorece un contacto íntimo entre las fases. El soluto contenido en el gas rico es absorbido por el líquido fresco que entra en la torre, y el gas diluido o agotado la abandona. El líquido se enriquece en soluto a medida que desciende y el líquido concentrado sale por el fondo de esta.

1. *Tanque de burbujeo*: Se conoce también como columna de burbujeo. Consiste en una columna parcialmente llena de líquido a través del cual se burbujea el gas. No se

suele utilizar a menos que el soluto tenga una solubilidad muy baja en el disolvente.

El hacer fluir un gas en forma de burbujas, indica que, mientras más pequeñas son las burbujas, habrá más área de transferencia de masa por unidad de volumen. En tanques pequeños, se utiliza un simple tubo para permitir la salida de las burbujas de gas hacia la superficie del líquido del tanque, mientras que en un tanque grande, se coloca un tubo en forma horizontal con pequeños orificios en el fondo de éste. Dichos orificios deben encontrarse a una distancia suficientemente grande, de tal manera, que las burbujas de dos orificios adyacentes no se unan en una sola burbuja.

El fin de burbujear un gas dentro de un líquido es para colocarlos en contacto, de modo que se lleve a cabo la transferencia de masa. Es importante tener presente que a mayor turbulencia, mayor transferencia de masa, lo que da una idea de la relación que guarda la eficiencia con la velocidad de las burbujas. Como es de esperarse, el ascenso de burbujas independientes es distinto al de las burbujas en enjambre o agrupadas, pues éstas se pueden juntar en una sola burbuja, disminuyendo entonces la relación área-volumen.

El tamaño que puedan tener las burbujas, depende directamente de la rapidez de flujo a través de los orificios, el diámetro de éstos, las propiedades del fluido y la extensión de la turbulencia que prevalece en el líquido.

3.4. Selección de la tecnología para el sistema de extracción y depuración de gases

A continuación, se realizó entonces la selección del equipo más adecuado a utilizar en el proceso, haciendo uso de la matriz de selección. Para el criterio de costo, se le otorgó un valor de 25 puntos; para el mantenimiento y caída de presión se le dió un valor de 20 puntos; para el criterio de eficiencia se le dió un puntaje de 15 puntos, y por último un puntaje de 10 al ahorro energético y a los servicios industriales.

Los aspectos más importantes a tomar en cuenta son el costo, mantenimiento y caída de presión. Los demás aspectos a evaluar son menos

importantes, pero son de igual manera necesarios para el estudio de selección. A su vez, se confirió una ponderación de 0 a 5 puntos para la evaluación de las tecnologías en cada criterio. De esta manera, con lo explicado anteriormente, se procede a realizar la matriz de selección, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5: Matriz de selección de la propuesta tecnológica a escoger para el sistema de extracción y depuración de gases.

Criterio	Valor	Ponderación tecnológica					
		(I)		(II)		(III)	
		Valor	Puntos	Valor	Puntos	Valor	Puntos
Costo	25	3	75	2	50	4	100
Mantenimiento	20	2	40	4	80	3	60
Caída de presión	20	2	40	3	60	3	60
Eficiencia	15	2	30	3	45	4	60
Ahorro energético	10	2	20	3	30	3	30
Servicios industriales	10	3	30	4	30	4	40
Total	100	-	235	-	295	-	350

(I): Lavador Venturi
(II): Torre de absorción
(III): Tanque de burbujeo

Al evaluar las tecnologías en la matriz de selección, el tanque de burbujeo resultó ser el equipo más adecuado para colocar y utilizar en el sistema de extracción y depuración de gases del proceso con un puntaje final de 350; la decisión se tomó una vez determinado que este sistema es el que proporciona las mejores condiciones, especificaciones y características requeridas para el proceso, lo que conlleva a un buen desempeño y disminución en el impacto ambiental y bienestar de salud para los trabajadores en un futuro.

Como el gas a extraer es una sustancia explosiva, el ventilador a utilizar es de tipo centrífugo, elaborado con acero inoxidable en la carcasa y fibra de vidrio en el motor y las aspas. Esta medida es necesaria para disminuir riesgos de explosividad y accidentes. De esta manera, la selección se realiza para los lavadores de gases.

3.5. Diseño del sistema de extracción y depuración de los gases

La concentración de los gases emanados, presentó un valor bastante desviado y elevado del

establecido por el reglamento de la OSHA, ya que se obtuvo una concentración de $14453,1 \text{ mg/m}^3$, y la máxima recomendada es de $1,5 \text{ mg/m}^3$. Partiendo de allí, se realizó el diagrama de bloques y de flujo del sistema.

Básicamente, los diagramas indican la dirección que lleva el flujo de gas desde el proceso de fundición, que es donde se generan, hasta el lavador de gases donde son depurados y liberados al ambiente una vez eliminada su contaminación. Esto se muestra en la Figura 2.

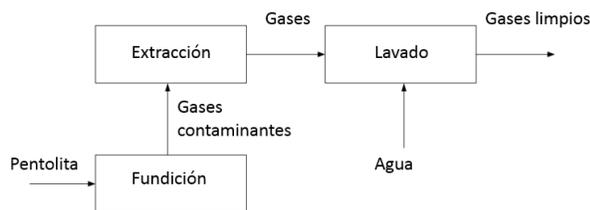


Figura 2: Diagrama de bloques del proceso de extracción y depuración de gases para el proceso de producción de pentolita.

El funcionamiento del lavador de gases consiste en hacer burbujear el gas proveniente del ventilador, dentro del tanque lavador donde se encuentra agua estancada; el gas al tocar el agua se deposita en el fondo del tanque para ser retirado una vez que se descargue el mismo. Este líquido y el sólido depositado se liberan hacia una tanquilla por un ducto, donde se encargan de recogerlo y disponerlo como desecho peligroso, tomando en cuenta las normas y requisitos necesarios para su manejo y posterior desecho.

Los equipos a utilizar en el sistema seleccionado y mostrados en la Figura 3, se describen a continuación:

- Campana extractora: Tuberías dispuestas en la salida de los tanques de fundición para conducir los gases hacia el ducto de transporte para el ventilador extractor. La altura de la campana se determinó utilizando la ecuación (3):

$$h = \frac{1}{3} D_c \tan(\alpha) \quad (3)$$

Donde:

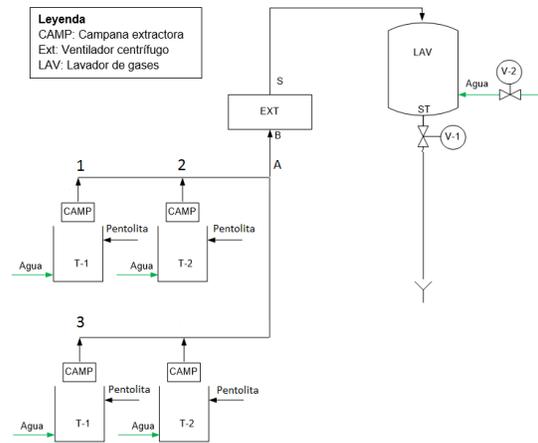


Figura 3: Diagrama de flujo del proceso de extracción y depuración de gases para el proceso de producción de pentolita.

α = Ángulo de la campana extractora (rad)

D_c = Diámetro de la campana (m)

h = Altura de la campana (m)

Se utiliza el mismo diámetro de tanque del proceso para dimensionar la campana.

- Ventilador extractor: está dispuesto en forma vertical en el techo del galpón por la parte exterior de éste. Tiene como función principal extraer los gases desalojados en el proceso de producción de pentolita. De allí debe conducirlos a través de la campana extractora hasta enviarlos al lavador de gases. Su dimensionamiento se lleva a cabo conociendo su potencia, utilizando la ecuación (4):

$$P_V = Q \Delta P_{TV} \quad (4)$$

Donde:

P_V : Potencia otorgada por el ventilador (W)

Q : Caudal volumétrico del gas (m^3/s)

ΔP_{TV} : Diferencia de presión total a entregar por el ventilador (N/m^2)

Otra característica importante a conocer del ventilador es la eficiencia, la cual viene determinada por la siguiente ecuación:

$$n_V = \frac{Q \Delta P_{TV}}{P_{IV}} \quad (5)$$

Donde:

n_V : Eficiencia del ventilador (adim)

P_{IV} : Potencia ideal del ventilador (W)

En el dimensionamiento del ventilador extractor, se trazó como parámetro de diseño el caudal de operación, el cual es el proveniente del sistema de extracción de la campana. Este equipo debe ser de fibra de vidrio en las aspas, y la carcasa de acero inoxidable. El material de las aspas se debe a riesgos de explosión ya que los gases presentan alto nivel de explosividad, y al ser las aspas de fibra de vidrio, se evita algún posible cortocircuito en el equipo y así un accidente posterior. Luego de realizar los cálculos se tiene una eficiencia del 40 %, el ventilador está diseñado, según el fabricante, para un rango de caudales desde 500 hasta 10000 pie^3/min , y en este proceso de trabaja con un caudal aproximado de 1600 pie^3/min .

- Lavador de gases: dispuesto en forma vertical; su función principal es lavar el gas proveniente del extractor haciéndolo burbujear por una tubería que entra por el tope del lavador. Los gases son burbujeados a un nivel del 25 % de la altura del tanque donde, por un proceso de sublimación inversa, se depositan en el fondo del tanque al entrar en contacto con el agua por su baja solubilidad. Luego, lo que no cambia de estado, escapa al ambiente. La deposición ocurre por enfriamiento del gas en el agua, además de que la sustancia burbujeante no es soluble en el agua.

Para dimensionar el tanque, es importante tomar en cuenta la relación de diseño que establece la ecuación (6):

$$D_t = \frac{1}{6} A_t \quad (6)$$

Donde:

D_t : Diámetro del tanque de burbujeo (m)

A_t : Altura del tanque de burbujeo (m)

La tubería que entra al tanque, por la cual se burbujan los gases provenientes del sistema, presenta un diámetro de 10", por lo que se establece entonces que el diámetro del tanque de burbujeo será de 16".

El lavador está cerrado al ambiente, pero se encuentra a presión atmosférica, ya que presenta

una pequeña chimenea en el tope donde se escapan los gases que no se depositan en el tanque. Según sus parámetros y condiciones de diseño, otorga una eficiencia entre 96 y 99 %, por lo que, la concentración de gases de TNT disminuye a un valor de $144,531 \text{mg}/\text{m}^3$; éste aún indica un número superior a la concentración establecida por OSHA. Para obtener que las emanaciones se encuentren dentro del valor requerido, es necesario la instalación de otro tanque de burbujeo dispuesto en serie con el primero logrando así disminuir la concentración de los gases hasta un valor de $1,445 \text{mg}/\text{m}^3$. Éste último cumple con la normativa ambiental vigente.

Para la distribución en planta de los equipos del sistema de extracción y depuración de gases, se tomaron las medidas de la estructura física directamente en el galpón donde se encuentran las instalaciones de la planta, considerando los espacios disponibles, áreas de desempeño de los trabajadores, facilidades de manejo de los equipos y desarrollo del proceso ya que el mismo se realiza de forma manual. Se tomaron en cuenta consideraciones de tipo ergonómicas al momento de determinar los espacios disponibles para la posterior instalación del sistema en estudio.

Las campanas extractoras junto al sistema de tuberías que llevan al ventilador, se colocan dentro del galpón. Los demás equipos como el extractor y el lavador de gases, junto a sus tuberías, se colocan en el techo del mismo. La descarga del tanque de burbujeo se realiza por una tubería que lleva estos desechos hasta la alcantarilla que se encuentra en el nivel de planta baja de este proceso.

Como en el proceso se tienen cuatro (4) tanques de fundido de pentolita, en el diseño del sistema se deben tomar en cuenta cuatro (4) campanas de extracción, una sobre cada tanque. De esta manera, las cuatro tuberías, provenientes de cada campana, se unen en un punto donde se forma un solo ducto hacia el ventilador. Es necesario que en este punto de unión, las pérdidas de presión sean las mismas para obtener un equilibrio en el sistema y así el buen funcionamiento del mismo.

Respecto a la distribución de los servicios industriales, las instalaciones ya están en planta, para abastecer la sección de la planta que allí

funciona; sólo se necesita alargar las tuberías de agua hacia el techo del galpón para realizar el llenado del tanque de burbujeo cuando sea necesario.

4. Conclusiones

La concentración de trinitrotolueno en el ambiente de trabajo ($14.453,1 \text{ mg/m}^3$) es superior a la establecida por normativas de salud de la OSHA ($1,5 \text{ mg/m}^3$), por lo que la instalación de un sistema de extracción y depuración de gases es de gran importancia en el proceso según los resultados de la aplicación del método Fine, debido a que los trabajadores y el medio ambiente están en riesgo de enfermedades y contaminación, respectivamente.

El ventilador extractor centrífugo es el más indicado para la extracción de los gases generados en el proceso en combinación con un tanque de burbujeo, por ser el equipo más eficiente por su diseño para la remoción de los gases contaminantes del proceso de fabricación de pentolita.

Empleando el método de Fine se determinó que se puede reducir el grado de peligrosidad de 1500 a 30 al instalar un sistema que permita reducir los contaminantes en las emanaciones gaseosas del ambiente de trabajo. Pasando así de una condición que amerita corrección inmediata a una situación de no emergencia en el ambiente de trabajo.

Para dar cumplimiento a la normativa ambiental se requiere instalar dos tanques de burbujeo dispuestos en serie, obteniendo una concentración de trinitrotolueno en los gases emanados del proceso de $1,445 \text{ mg/m}^3$ logrando que el valor se encuentre en el dispuesto por la OSHA (máximo $1,5 \text{ mg/m}^3$).

Referencias

- [1] James E. Brannon, Donald D. Adrian, Judith C. Pennington, and Tommy E. Myers. Slow release of PCB, TNT, and RDX from soils and sediments. Technical report EL-92-38, Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg MS Environmental Lab, Vicksburg, Mississippi, 1992.
- [2] James M. Brannon and Judith C. Pennington. Environmental fate and transport process descriptors for explosives. Technical report ERDC/EL TR-02-10, U.S. Army Engineer Research and Development, Vicksburg, Mississippi, 2002.
- [3] Ibis Cruz-Virosa, Juan José-Cabello-Eras, Luis Sorinas-González, Ana del Rosario Varela-Haro y Inocente Costa-Pérez. Propuesta de procedimiento para el control de emisiones atmosféricas en ambientes urbanos. *Ingeniería Industrial*, 36(1):2–16, 2015.
- [4] Francisco Carmona Pastor. *Transporte de mercancías peligrosas: explosivos*. Ediciones Díaz de Santos, S. A., España, 1 edición, 2002.
- [5] Instituto Nacional de Normalización. Sustancias peligrosas clase 1: Explosivos- medidas de seguridad en la inutilización y destrucción de explosivos de uso industrial. Norma Chilena (NCh-386-2004), 2004.
- [6] Yerson Durán y Christian Andrade. Biodegradación del explosivo tetranitrato de pentaeritritol (petn) por bacterias aisladas de ambientes mineros. *Revista Peruana de Biología*, 20(2):145–150, 2013.
- [7] United States Department of Labor. Chemical sampling information. 2,4,6-Trinitrotolueno. goo.gl/Bp4Goh Consulta: 2017, Abril 18.
- [8] Asamblea Nacional de la República Bolivariana de Venezuela. Ley orgánica de prevención, condiciones y medio ambiente de trabajo. *Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela*, (38.236):340.524–340.542, julio 2005.
- [9] Emilio Castejón Vilella. La evaluación de riesgos: una reflexión. *Salud y Trabajo*, (111-112):4–10, 1995.
- [10] William T Fine. Mathematical evaluations for controlling hazards. Technical report, Naval Ordnance Lab White Oak MD, Maryland, 1971.
- [11] Juan Carlos Rubio Romero, editor. *Manual para la formación de nivel superior en prevención de riesgos laborales*. Ediciones Díaz de Santos, España, 2005.
- [12] Carmen Orozco Barrenetxea, Antonio Pérez Serrano, María Nieves González Delgado, José Marcos Alfayate Blanco y Francisco J. Rodríguez Vidal. *Contaminación ambiental: Una visión desde la química*. Paraninfo, 2003.

Evaluation of uncertainty in deterministic models

Aleida Cantor Rudas*

Departamento de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

Abstract.-

When an experimental assembly is carried out, the objectives establish the search for the functional relationship between the variables from a set of experimental points, the registration of these variables is carried out with instruments that are indispensable for the development of a mathematical model suitable for the explanation of the phenomenon under study. There are experimental assemblies that can be studied by determining the relationship between the output and the physical magnitudes that describe it and others, which require a probabilistic mathematical model for its study, where the phenomenon needs to be repeated experimentally under equal conditions. Therefore, a procedure that assesses the appropriate expression of the uncertainty and the error of the measurement of a physical phenomenon that establishes its reliability is contextualized since every measurement will always be accompanied by uncertainty. This article presents the evaluation of uncertainty in a process of measuring variables directly and indirectly according to the mathematical model presented.

Keywords: mathematical models; deterministic models; probabilities; statistics; uncertainty; errors.

Evaluación de la incertidumbre en modelos determinísticos

Resumen.-

Cuando se realiza un montaje experimental, los objetivos establecen la búsqueda de la relación funcional entre las variables a partir de un conjunto de puntos experimentales, el registro de estas variables se efectúa con instrumentos que son indispensables para el desarrollo de un modelo matemático adecuado para la explicación del fenómeno en estudio. Existen montajes experimentales que pueden ser estudiados determinando la relación entre la salida y las magnitudes físicas que lo describen y otros, que requieren de un modelo matemático probabilístico para su estudio, donde el fenómeno necesita repetirse experimentalmente en igualdad de condiciones. Por lo tanto, se contextualiza un procedimiento que evalúe la expresión apropiada de la incertidumbre y el error de la medición de un fenómeno físico que establezca su confiabilidad ya que toda medición siempre va a estar acompañada de incertidumbre. En este artículo se presenta la evaluación de la incertidumbre en un proceso de medición de variables de manera directa e indirecta según el modelo matemático que se presente.

Palabras clave: modelos matemáticos; modelos determinísticos; probabilidades; estadística; incertidumbre; errores.

Recibido: octubre 2017

Aceptado: diciembre 2017

1. Introducción

El modelo matemático de la medición, que transforma la serie de observaciones repetidas en

resultado de medida es de importancia crítica ya que, además de las observaciones, incluye generalmente varias magnitudes de influencia, no conocidas con exactitud. Este conocimiento imperfecto contribuye a la incertidumbre del resultado de medida, lo mismo que lo hacen las variaciones encontradas en las observaciones repetidas y cualquier otra incertidumbre asociada al propio modelo matemático [1, 2].

*Autor para correspondencia

Correo-e: aleidacant@hotmail.com (Aleida Cantor Rudas)

Cuando el resultado de una medición se obtiene a partir de los valores de otras magnitudes, la incertidumbre típica de este resultado se denomina incertidumbre típica combinada, y se representa por u_c . Se trata de la desviación típica estimada asociada al resultado, y es igual a la raíz cuadrada positiva de la varianza combinada, obtenida a partir de todas las varianzas y covarianzas [1, 2].

Para satisfacer las necesidades de determinadas aplicaciones industriales y comerciales, así como las exigencias de los campos de la salud y la seguridad, la incertidumbre típica combinada u_c se multiplica por un factor de cobertura k , obteniéndose la denominada incertidumbre expandida U . El propósito de esta incertidumbre expandida U es proporcionar un intervalo en torno al resultado de medida, que pueda contener una gran parte de la distribución de valores que razonablemente podrían ser atribuidos a la medición. La elección del factor k , habitualmente comprendido entre los valores 2 y 3, se fundamenta en la probabilidad o nivel de confianza requerido para el intervalo [1].

El modelo matemático debe revisarse cuando los datos obtenidos, incluyendo aquí los resultados de determinaciones independientes de la misma medición, demuestran que el modelo es incompleto. Con el fin de decidir si un sistema de medida funciona correctamente, a menudo se compara la variabilidad observada experimentalmente de sus valores de salida, caracterizada por su desviación típica, con la desviación típica esperada, obtenida mediante combinación de las distintas componentes de incertidumbre que caracterizan la medición. En tales casos, solamente deben considerarse aquellas componentes que puedan contribuir a la variabilidad observada experimentalmente, de los valores de salida.

2. Proceso de estimación de la incertidumbre estándar

2.1. Modelo de medición

En un modelo determinístico, una medición Y , no se realiza de manera directa, sino que se determina a partir de otras N magnitudes, x_1, x_2, \dots, x_N por medio de una relación funcional.

$$f : Y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (1)$$

Las magnitudes de entrada, x_1, x_2, \dots, x_N de las que depende la magnitud de salida Y pueden ser consideradas a su vez como medidas, pudiendo depender de otras magnitudes, junto con las correcciones y factores de corrección de los efectos sistemáticos, llegándose así a una relación funcional f compleja, que podría ser difícil de escribir en forma explícita. Además, la función f puede determinarse experimentalmente o existir solamente en forma de algoritmo calculable numéricamente.

También, el conjunto de magnitudes de entrada x_1, x_2, \dots, x_N puede clasificarse en magnitudes cuyos valores e incertidumbres se determinan directamente en el curso de la medición. Estos valores e incertidumbres pueden obtenerse, por ejemplo, a partir de una única observación, o a partir de observaciones repetidas, o por una decisión basada en la experiencia. Pueden implicar la determinación de correcciones para las lecturas de los instrumentos y correcciones debidas a las magnitudes de influencia. [2]

2.2. Magnitudes de entrada correlacionadas

El caso en que existe una relación entre dos o más magnitudes de entrada; es decir, en que son dependientes entre sí o correlacionadas, La incertidumbre típica de y , siendo y la estimación del mensurando Y ; es decir, el resultado de medida, se obtiene componiendo adecuadamente las incertidumbres típicas de las estimaciones de entrada x_1, x_2, \dots, x_N . Esta incertidumbre típica combinada de la estimación y se nota como $u_c(y)$. La incertidumbre típica combinada $u_c(y)$ es la raíz cuadrada positiva de la varianza combinada $u_c^2(y)$, dada por:

$$\begin{aligned} u_c^2(y) &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \\ &= \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \\ &\quad + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} (u(x_i, x_j)) \end{aligned} \quad (2)$$

Donde x_i, x_j son las estimaciones de X_i, X_j , y $u(x_i, x_j) = u(X_i, X_j)$ es la covarianza estimada asociada a X_i, X_j . El grado de correlación entre X_i, X_j viene dado por el coeficiente de correlación estimado [2]

$$r(i, j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)} \quad (3)$$

Cuando la no linealidad de f (ecuación (1)) resulta significativa, es necesario incluir términos de orden más elevado en el desarrollo en serie de Taylor para la expresión de $u_c^2(y)$ de la ecuación (2). Cuando la distribución de cada X_i es simétrica alrededor de su media, los términos más importantes de orden inmediatamente superior que deben ser añadidos a los términos de la ecuación (2).

3. Análisis y procedimiento de medidas directas e indirectas

Cuando en el proceso de medición se obtienen medidas directas por un instrumento, la incertidumbre queda definida por el 50% de la apreciación y la dispersión de los datos, cuando se ha medido varias veces [3]. Las medidas indirectas están relacionadas por un modelo matemático, donde la magnitud se obtiene de otras magnitudes que se han medido varias veces de manera directa, la incertidumbre esta expresada en función de la desviación estándar experimental y la apreciación del instrumento, además de las derivadas parciales de la ecuación matemática en función de las magnitudes de medición directa.

3.1. Descripción del dispositivo experimental

Se realizara un experimento de caída libre [3], se suelta el cuerpo desde una altura H prefijada y se mide el tiempo que tarda en llegar al suelo. Las ecuaciones relacionadas con el tratamiento de los datos experimentales para calcular la aceleración de gravedad a través de la ecuación del movimiento uniformemente acelerado, como modelo matemático.

Ecuaciones relacionadas con el tratamiento de los datos experimentales. Para medir la aceleración de gravedad se empleara la ecuación del movimiento uniformemente acelerado, como modelo matemático:

$$\Delta Y = \frac{gt^2}{2} \quad (4)$$

Dónde: ΔY es el desplazamiento del cuerpo de modulo igual a la altura H , g la aceleración de gravedad y t el tiempo del movimiento. Para determinar la aceleración de gravedad de la ecuación (4).

$$g = \frac{2H}{t^2} m/s^2 \quad (5)$$

El error estadístico E_e y el error instrumental E_i se obtienen de las ecuaciones (6) y (7) [4].

$$E_e = t \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{con } t = 3 \quad (6)$$

$$E_i = \frac{A}{2} \quad (7)$$

A = apreciación.

3.2. Explicación del método que se siguió para efectuar las mediciones

Se dispone de los siguientes instrumentos, un cronometro de apreciación 0,01 s y una cinta métrica de apreciación 0,10 cm. Se determinan la altura y el tiempo, siguiendo el procedimiento para medir directamente y la ecuación (5) para hallar g como una medición indirecta. Para las mediciones directas, se determina, la media, como estadístico para el valor central y la desviación estándar, estadísticos para la dispersión de datos. Las medidas se indican en la Tabla 1 y la Figura 1 el movimiento del cuerpo.

De la Tabla 1 el criterio de rechazo de las medidas directas x_i (tiempo y altura) se indica en la expresión (8).

$$\bar{x}_i - 3\sigma < x_i < \bar{x}_i + 3\sigma \quad (8)$$

No se requiere rechazar medidas, cuando están dentro de este rango.

El valor mayor entre los errores instrumental y estadístico es el error absoluto. Se expresa el

Tabla 1: Registro de mediciones directas e indirectas.

	Tiempo (s)	Altura (m)	Gravedad (m/s ²)
	2,00	19,60	9,800
	2,01	19,59	9,698
	2,02	19,61	9,612
	2,00	19,59	9,795
	2,01	19,59	9,698
	1,98	19,59	9,994
	1,97	19,60	10,101
	2,00	19,61	9,805
	2,01	19,60	9,703
	1,97	19,61	10,106
Media	2,00	19,60	9,829
σ	0,018	0,009	0,176
E_e	0,0168	0,0083	
E_i	0,005	0,005	

σ : Desviación estandar experimental

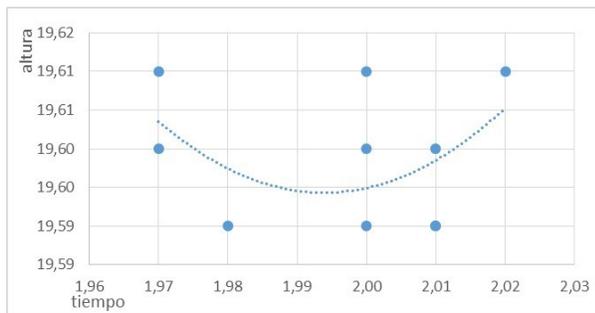


Figura 1: Movimiento del cuerpo.

Tabla 2: Expresión de las medidas directas.

Tiempo (t)	Altura (H)
$(2,00 \pm 0,0168)s$	$(19,60 \pm 0,0083)m$

resultado de la medida directa $\bar{x} \pm \Delta x$ en la Tabla 2.

El cálculo de la aceleración de gravedad, se obtiene a partir de la ecuación (5) la cual relaciona otras magnitudes que se miden directamente, como el tiempo y la altura. La ecuación (9) muestra el resultado.

$$\bar{g} = \frac{2\bar{H}}{\bar{t}^2} = 9,8m/s^2 \quad (9)$$

Se utilizan los valores absolutos de las derivadas, para obtener la suma de los errores y se evalúan con los valores promedio de las mediciones directas. El cálculo del error absoluto cuadrático medio, [3] la cual es una expresión más

apropiada para determinar el grado de incertidumbre asociado a una medida indirecta ecuación (10) y del error relativo ecuación (11).

$$\Delta \bar{y} = \Delta \bar{g} = \sqrt{\left(\frac{\partial f \Delta x_1}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial f \Delta x_2}{\partial x_2}\right)^2} \quad (10)$$

$$\frac{\Delta \bar{g}}{\bar{g}} = \frac{\frac{2\Delta H}{\bar{t}^2} + \frac{4\bar{H}}{\bar{t}^3} \Delta t}{\frac{2\bar{H}}{\bar{t}^2}} 100 = 2 \quad (11)$$

3.3. Evaluación de la incertidumbre

3.3.1. Incertidumbre de mediciones directas

A partir de la apreciación, se determina la incertidumbre asociada al instrumento de medición, tomando como criterio el 50 % de esta, Tabla 3.

Tabla 3: Incertidumbre de los instrumentos de medición directa.

Apreciación del Instrumento	Incertidumbre
A_c 0,01 s	u_{ct} 0,01/2= 1/200s
A_H 0,01m	u_{cH} 0,01/2= 1/200m

Incertidumbre debida a la dispersión de los datos de medición directa [2]

$$u_{vt} = \frac{S_t}{\sqrt{n}} = 5,69 \times 10^{-3} \quad (12)$$

$$u_{vH} = \frac{S_H}{\sqrt{n}} = 2,84 \times 10^{-3} \quad (13)$$

3.3.2. Incertidumbre Combinada de las mediciones directas

Se calculan con la incertidumbre de los instrumento u_{li} y las generadas por la dispersión en el proceso de medición u_{vi} .

$$u_{ci} = \sqrt{(u_{li})^2 + (u_{vi})^2} \quad (14)$$

Aplicando la ecuación (14) al tiempo

$$u_{ct} = 7,7 \times 10^{-3}$$

Aplicando la ecuación (14) a la altura

$$u_{cH} = 5,75 \times 10^{-3}$$

3.3.3. Incertidumbre para mediciones indirectas

Calculo de las derivadas parciales de la ecuación (5), evaluadas en los valores medios de tiempo y altura, Tabla 1.

$$\begin{aligned}\frac{\partial g}{\partial H} &= \frac{2}{t^2} = \frac{1}{2} \\ \frac{\partial g}{\partial t} &= \frac{4H}{t^3} \\ &= \frac{49}{5}\end{aligned}\quad (15)$$

3.3.4. Incertidumbre total combinada

A partir de la incertidumbre combinada de las mediciones directas ecuación (14) y el calculo de las derivadas parciales de la ecuación del modelo matemático de la aceleración de gravedad ecuacion15, se obtiene la incertidumbre total combinada de la gravedad ecuación (16).

$$u_{cg} = \sqrt{u_{ct}^2 \left(\frac{\partial g}{\partial t}\right)^2 + u_{cH}^2 \left(\frac{\partial g}{\partial H}\right)^2} \quad (16)$$

Para el rango de confianza asociada a los datos y estimación del valor de cobertura K se considera la siguiente expresión

$$g_{max} = \bar{g} \pm K S_g$$

En la Tabla 4 se visualiza los valores de K a considerar.

Tabla 4: Evaluación del rango de confianza.

K	Nivel de confianza	$\bar{g} + K S_g$ Li- mite Máx.	$\bar{g} - K S_g$ Li- mite mín.
1	68 %	10,005	9,653
2	95 %	10,180	9,478
3	99 %	10,356	9,302

3.3.5. Incertidumbre Expandida

Con el resultado de la incertidumbre combinada de la variable indirecta y los valores de k Tabla 4, se calcula la incertidumbre expandida que se presenta en la ecuación (17).

$$U_g = K u_{cg} \quad (17)$$

4. Múltiples magnitudes de salida, determinadas simultáneamente en la misma medición, y la correlación entre sus estimaciones

Los datos se han obtenido a partir de cinco conjuntos de observaciones, de tres magnitudes de entrada V , I y φ , se calculan los valores de R , X y Z para cada conjunto de datos de entrada, y tomar la media aritmética de los cinco valores individuales para obtener las mejores estimaciones de R , X y Z . La desviación típica experimental de cada media se calcula a partir de los cinco valores individuales, y las covarianzas estimadas de las tres medias a los cinco valores individuales que se utilizaron para el cálculo de cada media [1].

4.1. Descripción del dispositivo experimental

La resistencia R y la reactancia X de un elemento de un circuito se determinan midiendo la amplitud V de la diferencia de potencial alterna sinusoidal entre sus bornes, la amplitud de la intensidad de corriente alterna I que lo atraviesa, y el desfase φ entre la diferencia de potencial y la corriente alterna. Así, resulta que las tres magnitudes de entrada son V , I y φ , mientras que las magnitudes de salida, son las tres componentes de la impedancia R , X y Z . Como $Z^2 = R^2 + X^2$, solo hay dos magnitudes de salida independientes [1][2].

4.2. Explicación del método que se siguió para efectuar las mediciones

Se considera que se han obtenido cinco conjuntos independientes de observaciones simultáneas de las tres magnitudes de entrada V , I y φ , en condiciones análogas donde resultan los datos que se presentan en la Tabla 5:

Tabla 5: Valores de las magnitudes de entrada V , I y φ , obtenidos a partir de cinco conjuntos de observaciones simultáneas.

$V(v)$	$I(mA)$	$\varphi(rad)$
5,007	19,663	1,045 6
4,994	19,639	1,043 8
5,005	19,640	1,046 8
4,990	19,685	1,042 8
4,999	19,678	1,043 3

4.3. Ecuaciones relacionadas con el tratamiento de los datos experimentales

Las magnitudes de entrada por la ley de Ohm.

$$\begin{aligned} R &= \frac{V \cos(\varphi)}{I} \\ X &= \frac{V \operatorname{sen}(\varphi)}{I} \\ Z &= \frac{V}{I} \end{aligned} \quad (18)$$

Relación funcional de las variables, la resistencia y el voltaje. A continuación se presenta la Tabla 6 y la gráfica del fenómeno Figura 2.

Tabla 6: Datos de gráfica de la resistencia.

$v \cos(\varphi)$	I(A)
2,510	0,020
2,512	0,020
2,504	0,020
2,514	0,020
2,516	0,020

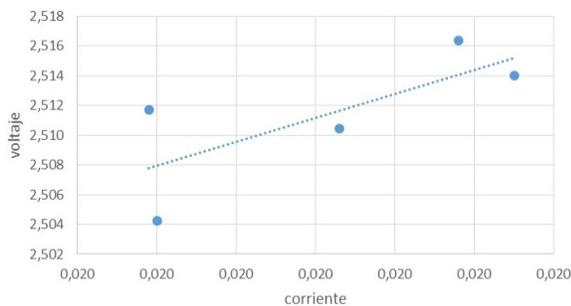


Figura 2: Gráfica del fenómeno.

4.4. Ley de Ohm

La pendiente de la recta, Figura 2 es la impedancia, pero en este caso es la parte real de esta, la resistencia, ver Tabla 7 con sus respectivos valores y correlaciones Como las medias V , I y φ han sido obtenidas a partir de observaciones simultáneas, se hallan correlacionadas, y deben tenerse en cuenta estas correlaciones en la evaluación de las incertidumbres típicas de los cálculos de R , X y Z . Los coeficientes de correlación necesarios se obtienen a partir de la ecuación (3). Los resultados

Tabla 7: Resultados.

	V	I	φ
μ	4.999	19.661	1,044 46
σ_x	0.0032	0.0095	0.00075
	VI	$V\varphi$	$I\varphi$
r	-0.36	0.86	-0.65

se incluyen en la Tabla 7, debiendo recordarse que $r(x_i, x_j) = r(x_j, x_i)$ y que $r(x_i, x_i) = 1$.

La desviación estándar calculada corresponde a una muestra: $\sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$

La incertidumbre típica combinada para Z en función de los coeficientes de correlación, ecuación (3):

$$u_c^2(Z) = \left[\frac{1}{\bar{I}^2} \right] u^2(\bar{V}) + \left[\frac{\bar{V}^2}{\bar{I}^4} \right] u^2(\bar{I})$$

Los resultados de los cálculos de R , X y Z según ecuación (18) y coeficientes de correlación ecuación (3) se muestran en la Tabla 8 [1].

Tabla 8: Valores de las magnitudes de salida R, X y Z.

Magnitud Ω	$u_c \Omega$	r
R=127,732	0,071	RX=0,588
X=29,847	0,295	RZ=-0,485
Z=254,260	0,23	XZ=0,993

Si los datos de la Tabla 8, las correlaciones entre las magnitudes V , I y φ se suponen inexistentes, entonces los coeficientes de correlación observados carecen de significado y deben tomarse iguales a cero. Si se realiza esto en la Tabla 8, la ecuación (3) se reduce a una expresión equivalente a la ecuación.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2$$

5. Conclusiones

En un montaje experimental, una magnitud puede repetirse cuando su medición se realiza con un instrumento de manera directa un número de veces en igualdad de condiciones, se puede

indicar el conjunto de todos los resultados posibles debido a que estos aparecen al azar en un fenómeno que utiliza un modelo determinístico que permite obtener una magnitud de manera indirecta. Este fenómeno está descrito por un modelo determinístico que lo formula por una ecuación matemática que establece un modelo matemático que permite la medición de magnitudes directas sometidas a un proceso aleatorio.

Se ha presentado el abordaje de dos sistemas con variables que se encuentran sometidas a condiciones del azar, debido a un proceso de medición, aun cuando su comportamiento obedece a un modelo determinístico en un área de física como es el movimiento rectilíneo uniformemente acelerado cuya aceleración gravitatoria se calcula de manera indirecta a través de magnitudes de medición directas como el tiempo y el espacio recorrido. Otro modelo es la ley de Ohm, que relaciona magnitudes directas voltaje y corriente y la resistencia como una magnitud indirecta. Estos modelos se toman de referencia para evaluar la incertidumbre con el propósito de convertirse en un soporte técnico para el conocimiento y difusión científica en el área de mediciones en otros modelos determinísticos.

Referencias

- [1] JCGM. *Evaluación de datos de medición. Guía para la expresión de la incertidumbre de medida*. Centro Español de Metrología, España, 1ª edición, 2008.
- [2] Javier Miranda Martín del Campo. *Evaluación de la incertidumbre en datos experimentales*. México.
- [3] Lilian Miliani de Souza y Zaida González de Clamens. *Propuesta para la enseñanza del Laboratorio I de Física*. Trabajo de Ascenso, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Carabobo, Venezuela, 1997.
- [4] Sáez Ruiz Sifredo J. y Luis Font Ávila. *Incetidumbre de la medición: teoría y práctica*. L&S Consultores C.A., Aragua, Venezuela, 1ª edición, 2001.

Water quality assessment in a Caribbean saltwater wetland

R. Pérez^a, F. Riveiro^a, M. Jiménez–Noda^{*b}, Lisbeth Manganiello^b, C. Vega^c, R. Cova^d, J. Moreno^d

^a*Departamento de Ingeniería Química, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela*

^b*Centro de Investigaciones Química (CIQ), Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela*

^c*Instituto de Matemáticas y Cálculo Aplicado, IMYCA, Facultad de Ingeniería, U. de Carabobo, Valencia, Venezuela*

^d*Instituto Nacional de Parques – INPARQUES, Valencia, Venezuela.*

Abstract.-

The La Bocaina Lagoon is a saltwater wetland of the Caribbean Sea, it is located in the San Esteban National Park, its hydrographic space is divided into two zones: coastal and deep, located in the Bay of Patanemo, place of great tourist affluence. The lagoon has presented notorious physical changes in its waters, as a result of the misuse and management of the man of said resource. The goal was to evaluate the water quality with the purpose of providing a physicochemical and microbiological support to the National Institute of Parks. Physicochemical and microbiological parameters were determined. When comparing this results obtained with the permissible limits established in the current legal regulations, it was found that the dissolved oxygen, the sedimentable solids, total coliforms and fats, oils and hydrocarbons are outside the permissible ranges. Later, the percentage estimation of the water quality index of the lagoon was carried out, with the purpose of defining its current condition in terms of quality, the evaluation of the impact of the lagoon.

Keywords: saltwater wetland; water pollution; Water Quality Index; WQI

Evaluación de la calidad del agua en un humedal de agua salada del Caribe

Resumen.-

La Laguna La Bocaina es un humedal de agua salada típico del Mar Caribe, está ubicado en el Parque Nacional San Esteban, su espacio hidrográfico se divide en dos zonas: costera y profunda, ubicada en la Bahía de Patanemo, lugar de gran afluencia de turismo. La laguna ha presentado notorios cambios físicos en sus aguas, como resultado del mal uso y manejo del hombre. La meta fue evaluar la calidad del agua a fin de brindar un apoyo fisicoquímico y microbiológico al Instituto Nacional de Parques. Los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos fueron determinados. Al comparar los resultados obtenidos con los límites permisibles establecidos en las normas legales vigentes, se encontró que el oxígeno disuelto, los sólidos sedimentables, los coliformes totales y las grasas, aceites e hidrocarburos están fuera de los rangos permisibles. Posteriormente, se realizó la estimación porcentual del índice de calidad del agua (ICA) de la laguna, con el objetivo de definir su condición actual en términos de calidad, y evaluación del impacto de la laguna.

Palabras clave: humedal de agua salada; contaminación de agua; índice de calidad del agua; ICA

Recibido: noviembre 2017

Aceptado: diciembre 2017

1. Introducción

El 71 % de la superficie del planeta tierra se encuentra cubierta por mar, que mediante sus interacciones con la atmósfera, la litosfera y la biosfera y los océanos han ayudado a modelar las

*Autor para correspondencia

Correo-e: ing.milagrosjimeneznoda@gmail.com

(M. Jiménez–Noda)

condiciones que hacen posible la vida. Cerca del 60% de la población mundial y el 70% de la población venezolana, se encuentra emplazadas a una distancia inferior de los 100 Km de la línea costera. Venezuela posee una superficie de espacio acuático de 630.620 Km² aproximadamente, que incluyen el Mar territorial, la Zona Contigua y la proyección de la Zona económica exclusiva, diferenciado por una gran diversidad de paisajes y recursos escénicos naturales, entre los que destaca el paisaje costero con 4.989 Km de costa; constituido por playas, islas, islotes, lagunas y bahías de gran valor escénico, que realzan el interés turístico de la zona. En el espacio costero y marítimo existen áreas de importante valor ecológico y paisajístico; como las lagunas costeras, arrecifes coralinos, playas arenosas, manglares, estuarios, humedales costeros, bahías, entre otros, muchas de ellas protegidas a través de 95 Áreas Bajo Régimen de Administración Especial (ABRAE). El Estado Carabobo, específicamente el municipio Puerto Cabello cuenta con grandes cuerpos de aguas saladas propias del Mar Caribe; destinadas principalmente al turismo, en el cual se destaca la Bahía de Patanemo cuyo lindero geográfico se ubica dentro del Parque Nacional San Esteban. Este parque fue creado el 14 de enero de 1987, mediante el decreto N° 1430, bajo el nombre “José Miguel Sanz” sin embargo, en el año 1990 se reformó el decreto anteriormente citado, dándole la denominación de Parque Nacional San Esteban y tiene como finalidad proteger una gran variedad de ecosistemas asociados a la zona central de la Cordillera de la Costa y las áreas marinas e insulares ubicadas frente a la costa noreste del municipio.

La laguna La Bocaina es el objeto de estudio de este trabajo, su representación geográfica y zonas está representado en la Figura 1.

La importancia de estudiar este importante ecosistema venezolano ha quedado evidenciado por los trabajos de Yánes [1] donde se evaluó el ensamblaje de aves acuáticas asociado a la Laguna La Bocaina, representaban un elemento de importancia ecológica y socioeconómica a considerar. La riqueza y la abundancia de especies de aves acuáticas varían de acuerdo a la época del



Figura 1: Vista satelital y fotografías panorámicas de la Laguna la Bocaina, mostrando el área total. Fuente: Imágenes: Google Earth, 2012 y Fotografías Sabina Caula.

año y la población aledaña al área posee una alta sensibilidad hacia la conservación del ambiente. Otros ecosistemas de la misma naturaleza han sido estudiados por Malaver, *et al.* [2], tal es el caso de la Laguna de Tacarigua exponiéndose en su trabajo un diagnóstico de la calidad microbiológica del agua, utilizando parámetros físicos, químicos y microbiológicos como indicadores de la calidad sanitaria, ambiental y de intervención antrópica del ecosistema. Los resultados obtenidos indicaron la evidente contaminación y mala calidad del agua del humedal, por influencia de factores ambientales y antrópicos. Espinoza y Rodríguez [3] estudio la presencia de macroinvertebrados, a fin de dar un diagnóstico de la calidad del agua de la laguna evaluada, estos organismos proporcionan excelentes señales sobre la calidad del agua ya que algunos de ellos requieren agua de buena calidad para sobrevivir; otros, en cambio, resisten, crecen y abundan cuando hay contaminación. Los resultados obtenidos reflejan la mala calidad del agua de la Laguna de Yahuarcocha por las influencias de factores antrópicos aledaños al sistema lagunar. Espinal, *et al* [4] también investigó sobre los parámetros de calidad que definen la laguna de Yuriria, Guanajuato, México en dos periodos estacionales mediante el método evaluando mejoras introducidas para su saneamiento. López, *et al.* [5] determinaron las

variables fisicoquímicas del agua de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz, México, en diferentes estaciones climáticas durante el período enero de 2009 a marzo de 2010 con el fin de contribuir a su conocimiento ecológico. Determinándose in situ las variables de temperatura, pH, porcentaje de saturación de oxígeno, salinidad, conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (SDT) entre otras. Todos los antecedentes que anteceden a esta investigación muestran la importancia de determinar la calidad de las aguas de las lagunas a fin de establecer un índice de calidad de las mismas e iniciar un plan de conservación y saneamiento. El desarrollo del presente trabajo tiene gran importancia a nivel ambiental y social; ya que mediante la evaluación de la calidad del agua de la laguna de La Bocaina se identificaron las fuentes y niveles de contaminación generados por las actividades antrópicas, lo que le permite al Instituto Nacional de Parques (INPARQUES) contar con un soporte científico para la implementación de planes integrales que contribuyan a la disminución del impacto ambiental mediante la elaboración de un plan de gestión integral para la conservación de ese humedal.

2. Cuencas Hidrográficas del Estado Carabobo

El Estado Carabobo cuenta con seis cuencas hidrográficas (Véase Figura 2): La cuenca del Mar Caribe, el Lago de Valencia, Alta del Río San Carlos, Alta y Media del Río Pao, Alta del Río Tiznado, Alta del Río Guárico, todos conformados por 268 cursos de agua aproximadamente entre ríos, quebradas, caños y arroyos dispersos a lo largo y ancho del territorio, (Martínez [6]).

2.1. La laguna La Bocaina

La Laguna la Bocaina ($10^{\circ}26'56,42''N$ – $67^{\circ}55'51,37''O$) es un humedal de agua salada; se encuentra localizada dentro del Parque Nacional San Esteban específicamente en la costa del Estado Carabobo, 10 Km al este de Puerto Cabello, se encuentra bajo la administración y cuidado de INPARQUES, su extensión territorial es de 190,55 Km exactos y se encuentra dividida en dos zonas: la zona profunda como su nombre lo indica

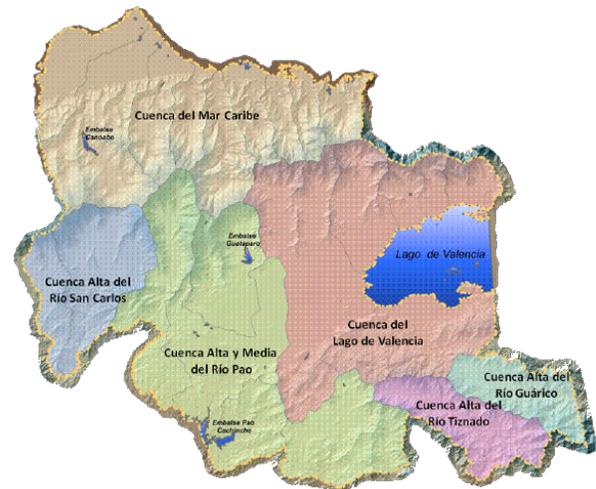


Figura 2: Distribución de las Cuencas Hidrográficas en el Estado Carabobo. Fuente: Imágenes: Global Water Partnership South America. (2017).

se caracteriza por tener 5 m de profundidad y es la que conecta al Mar Caribe, el cual le permite el abastecimiento de agua a todo el humedal, mientras que la zona litoral posee una dinámica estacional, determinada por las precipitaciones y las mareas, que ocasiona desde ausencia total de agua, en los meses de sequía (diciembre-marzo) hasta inundaciones que pueden desbordar la cuenca, en la época de lluvia (julio–noviembre), véase Figura 3.

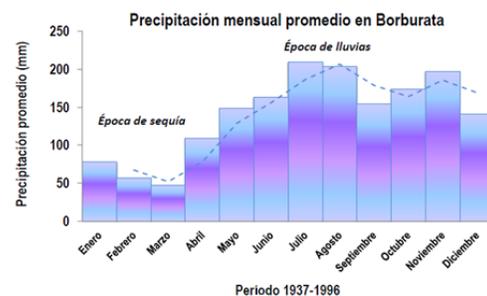


Figura 3: Precipitación promedio mensual en la estación Borburata, la más cercana a Patanemo.

3. Calidad del agua

El término calidad del agua es relativo y solo tiene importancia universal si está relacionado con

Tabla 1: Modelos matemáticos empleados para la estimación del ICA

Grupo	índice	Modelo matemático	Observaciones
1	WQI NSF (EU) WQI Dinius (EU) IQA CETESB (Brasil) ICA Rojas (Colombia) ICA UCA (Colombia)	$ICA_m = \prod_{i=1}^n I_i^{W_i}$	Promedio geométrico ponderado: W_i : peso o porcentaje asignado al i -ésimo parámetro. I_i : valor del i -ésimo parámetro.
2	WQI (Canadá) DWQI (EU)	$ICA = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \right)$	El índice incorpora tres elementos: Alcance (F1): porcentaje de parámetros que exceden la norma. Frecuencia (F2): porcentaje de pruebas individuales de cada parámetro que excede la norma. Amplitud (F3): magnitud en la que excede la norma cada parámetro que no cumple.
3	UWQI (Europa)	$UWQI = \sum_{i=1}^n W_i I_i$	Promedio aritmético ponderado: W_i : peso o porcentaje asignado al i -ésimo parámetro. I_i : Valor del i -ésimo parámetro.
4	ICA (Centro América)	$ICA = \frac{\sum_{i=1}^n W_i I_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$	W_i : peso o porcentaje asignado al i -ésimo parámetro. I_i : Valor del i -ésimo parámetro.
5	ICP (Brasil)	$ICP = ISTO \times IQA$ $ISTO = ST \times SO$ $ST = \min \{q_i\}_{i=1, \dots, n} - 1$ $SQ = \bar{q}$	QA : Índice de Calidad del Agua adaptado del ICA NSF para las condiciones de Brasil. $ISTO$: Índice de Sustancias Tóxicas y Organolépticas. ST : Ponderación de los dos subíndices mínimos más críticos del grupo de sustancias tóxicas. SO : Media aritmética del grupo de sustancias organolépticas.
6	ICA (Venezuela)	$ICA = \frac{\sum W_i Q_i}{\sum Q_i}$	W_i : Datos físicos por parámetro. Q_i : Pesos o factores de ponderación.

Fuente: Torres, *et al*, [7] y Espinoza y Rodríguez [3]

el uso del recurso. Esto quiere decir que una fuente de agua suficientemente limpia que permita la vida de los peces puede no ser apta para la natación y un agua útil para el consumo humano puede resultar inadecuada para la industria. Para decidir si un agua califica para un propósito particular, su calidad debe especificarse en función del uso que se le va a dar. Bajo estas consideraciones, se dice que un agua está contaminada cuando sufre cambios que afectan su uso real o potencial [8].

Es importante resaltar que la evaluación de la calidad del agua se realiza usando técnicas analíticas adecuadas para cada caso. Para que los resultados de estas determinaciones sean representativos, es necesario dar mucha importancia a los procesos de muestreo y a las unidades y terminología empleadas [8].

A continuación se tratan en detalle las principa-

les características fisicoquímicas y biológicas que definen la calidad del agua:

1. Parámetros Fisicoquímicos

- Olor
- Color
- pH
- Temperatura
- Oxígeno disuelto
- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- Fenoles
- Aceites y grasas
- Metales tóxicos
- Sólidos totales

- Sólidos Flotantes
- Sólidos Sedimentables
- Radioactividad
- Nutrientes
- Turbidez
- Detergentes
- Conductividad

2. Parámetros Microbiológicos

3.1. Índice de Calidad del Agua (ICA)

El índice de calidad del agua (ICA o WQI por sus siglas en inglés) no es un concepto nuevo, ya en 1970 estaba en el ámbito de los modelos estadísticos de estudios medio ambientales figuraba (ver Brown, *et al.* [9]). El ICA es un número simple que expresa la calidad del agua mediante la integración de diferentes medidas de calidad como afirman [10] y [11].

A pesar de lo clásico del concepto es un tema de actualidad, como puede ser visto en trabajos de gran impacto del año 2017 como son los artículos de [10] y [12].

El modelo de cálculo de la mayoría de los ICA se basa en la normalización de los parámetros que los conforman de acuerdo con sus concentraciones, para su posterior ponderación en función de su importancia en la percepción general de la calidad agua; se calcula mediante la integración de las ponderaciones de los parámetros a través de diferentes funciones matemáticas [7].

La Tabla 1 muestra las ecuaciones asociadas por grupos, de acuerdo al modelo matemático empleado por diversas organizaciones y/o autores.

4. Metodología

4.1. Muestreo

La selección de los puntos de muestreo se realizó a partir del reconocimiento de la zona de estudio y la identificación de los posibles focos contaminantes, para ello se efectuó un recorrido por el área y con ayuda de un instrumento cartográfico de la laguna, basados en un muestreo sistemático se logró trazar sobre ésta una cuadrícula de muestreo, constituida por una matriz de

70 filas y 45 columnas, con dimensiones de 70x70 metros (véase Figura 4), en el cual se obtuvieron: 65 puntos dentro de la zona litoral de la laguna, mientras que en la zona profunda se ubicaron 71 puntos.

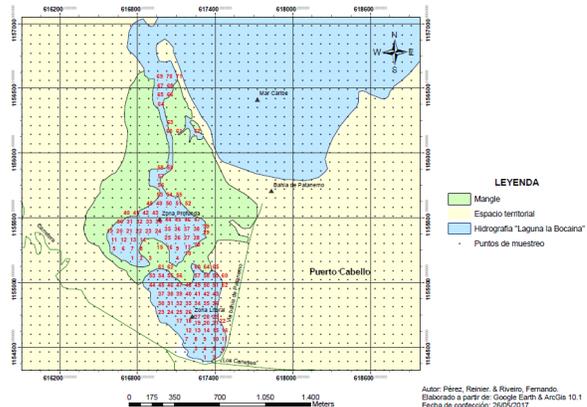


Figura 4: Cuadrícula de muestreo empleada sobre el área de estudio.

Mediante un muestreo aleatorio simple fueron seleccionados 7 puntos en la zona litoral y 17 puntos en la zona profunda. La muestra fue ampliada por conveniencia con tres puntos adicionales en cada zona al tomar en cuenta la información suministrada por el personal de INPARQUES respecto al vertido de agua con detergente en las zonas aledañas al humedal; con lo cual la muestra quedó constituida en un total de 30 puntos.

El procedimiento de muestreo fue realizado con la asesoría del Laboratorio de Procesos estocásticos del IMYCA

4.2. Cronograma de monitoreo para muestrear los puntos seleccionados

Para la toma de muestras, se consideró la información suministrada por el personal de INPARQUES y todas las observaciones registradas durante el recorrido por la zona de estudio. Para ello se realizaron dos seguimientos continuos del humedal.

El objetivo principal del seguimiento fue conocer los niveles de afectación en la laguna y lograr demostrar, si se cumplía o no con las normativas

de control especificadas en el Decreto N° 883. En el primer periodo de seguimiento se realizó la captación de muestra en tres puntos específicos para ambas zonas de la laguna, en el segundo se realizó el muestreo de los puntos restantes.

4.3. Adecuación y preservación de las muestras

Para su adecuación y preservación, las muestras fueron colocadas en frascos de vidrios previamente esterilizados y debidamente sellados e identificados, estos fueron almacenados y refrigerados en una cava con hielo para mantener la temperatura igual o inferior a los 4°C hasta su traslado al laboratorio. Al llegar al laboratorio se procedió a agregarle a las muestras de acuerdo al parámetro a analizar, ácido clorhídrico (HCl) o ácido sulfúrico (H₂SO₄) hasta pH menor a 2.

4.4. Determinación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos

La determinación de los parámetros se realizó siguiendo las metodologías de análisis establecidas en el Standar Methods: Oxígeno disuelto (Método 4500-O G), Turbidez (Método 2130-B), Sólidos sedimentables (Método 2540-F), Sólidos flotantes (Método 2540-D), Grasas y aceites (Método 5520-B), Hidrocarburos (Método 5520-F), Detergentes (Método 5540-C), Coliformes totales (Método 9221-B.) y Coliformes fecales (NMP 9221-E.), además de los equipos de campo empleados para las mediciones in situ de pH, temperatura y sólidos totales disueltos. Para la determinación de la conductividad se realizó una aproximación teórica debido a la relación que hay entre los sólidos totales disueltos y la conductividad, donde: $2 \mu\text{S}/\text{cm} = 1 \text{ ppm}$ (partes por millón de CaCO₃) siendo 1 ppm la unidad de medida para sólidos totales disueltos [13].

4.5. Estimación del índice de calidad del agua (ICA)

Para la estimación del índice de calidad del agua de la Laguna la Bocaina, se tomaron en cuenta los valores de subíndice obtenidos para cada uno de los parámetros seleccionados, en conjunto a los factores de ponderación generados, el cálculo se realizó empleando la expresión

matemática seleccionada de acuerdo al modelo ICA correspondiente y se efectuó para cada una de las zonas que conforman el humedal, a fin de establecer el nivel de calidad de las mismas, los valores obtenidos serán presentados a través de una tabla de resultados.

Parámetros necesarios para la estimación del ICA. Para el cálculo del ICA, fueron seleccionados los siguientes parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de acuerdo al modelo ICA desarrollado por Montoya, *et al* [14]: pH, temperatura, oxígeno disuelto, grasas y aceites, detergentes, conductividad, turbidez, sólidos totales disueltos, coliformes totales y fecales. De igual forma se tiene que parámetros como: pH, temperatura, oxígeno disuelto, sólidos totales disueltos, turbidez, conductividad y coliformes resultaron elegidos para el cálculo ICA definido por Espinoza. T y Rodríguez. C, en el 2016. La selección se realizó bajo la disposición de los datos obtenidos en el análisis de muestra.

Modelo matemático recomendado para la estimación del ICA. Para la estimación del índice de la calidad del agua de la Laguna la Bocaina se hizo uso de los modelos matemáticos ICA desarrollados por Montoya, *et al* [14] y el propuesto por Espinoza y Rodríguez [3] sobre los ríos Morón y Patanemo (véase Tabla 1).

5. Análisis y discusión de resultados

5.1. Reporte de resultados obtenidos de los parámetros físico-químicos y microbiológicos

Temperatura. La temperatura en el agua es uno de los factores físicos más importante, puesto que desempeña un papel fundamental sobre los ecosistemas acuáticos del humedal, ya que altera la composición de su agua, disminuye su densidad y contribuye en la variación del oxígeno disuelto [15], La Tabla 2 muestra lo resultados obtenidos tanto en la zona litoral como profunda.

En la Tabla 2, la temperatura media se ubicó entre los 32,38°C y 33,56°C, donde el menor registro reportado fue de 30°C en la zona litoral. Finalmente al existir una diferencia entre los

Tabla 2: Estadísticos principales de la temperatura

Parámetro	Zona	
	Litoral	Profunda
Media	33,56	32,38
Varianza	10,03	0,75
Máximo	37,00	34,00
Mínimo	30,00	31,00
Desv. Típ.	3,1667	0,8646
C.V.	0,0944	0,0267
Hipótesis nula	$\bar{l} - \bar{p} = 0$	
g.l	9	
t -valor _{estimado}	1,0954	
p -valor _{estimado}	0,3018	
t -valor _{crítico} (dos colas)	2,2622	

Tabla 3: Estadísticos principales de pH

Parámetro	Zona	
	Litoral	Profunda
Media	7,35	7,09
Varianza	0,12	0,05
Máximo	7,89	7,29
Mínimo	6,71	6,28
Desv. Típ.	0,3423	0,0324
C.V.	0,0466	0,0324
Hipótesis nula	$\bar{l} - \bar{p} = 0$	
g.l	11	
t -valor _{estimado}	2,0161	
p -valor _{estimado}	0,0689	
t -valor _{crítico} (dos colas)	2,2010	

valores de temperatura de la zona litoral y profunda, fue realizada la prueba de hipótesis para la diferencia de las medias de las muestras pareadas suponiendo varianzas desiguales, la prueba fue realizada para un nivel de confianza del 95 % para un total de 30 observaciones, al comparar el estadístico t -valor_{estimado} con el valor t -valor_{estimado} encontrado, se puede asegurar que no existe diferencia estadísticamente significativa.

Potencial de hidrógeno (pH). La Laguna la Bocaína al ser un humedal abastecido por el agua del Mar Caribe se caracteriza por ser alcalina; razón por la cual debería presentarse valores constante de pH entre los 7,4 y 8,5 en condiciones normales, donde no se han realizado ningún tipo de actividad que favorezcan la degradación de sus agua [15].

La Tabla 3 muestra los valores obtenidos de pH una vez procesada la data del muestreo en ambas zonas del humedal. Al realizar la prueba de hipótesis para la diferencia de las medias suponiendo varianzas desiguales, con un 95 % de nivel de confianza se puede asegurar que no hay diferencia estadística significativa entre los resultados obtenidos.

Oxígeno disuelto (O.D.). En la dinámica acuática su concentración varía a lo largo del día por factores como la temperatura y el proceso de fotosíntesis de las plantas, el oxígeno disuelto juega un papel fundamental para los organismos que hacen vida en la laguna, puesto que este es

Tabla 4: Estadísticos principales de O.D.

Parámetro	Zona	
	Litoral	Profunda
Media	1,07	2,27
Varianza	0,06	0,20
Máximo	1,30	2,70
Mínimo	0,80	1,80
Desv. Típ.	0,2517	0,4509
C.V.	0,2359	0,1989

esencial para su respiración celular, sobrevivencia y adecuado crecimiento [15], es por ello que se hizo necesario la medición del mismo. La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos. La concentración (mg/L) del oxígeno disuelto para el momento del muestreo es de 1,07 mg/L en la zona litoral, mientras que en la profunda fue de 2,27 mg/L. Los valores máximos y mínimos de O.D. alcanzan los 2,70 y 1,80 mg/L respectivamente en la zona profunda y 1,30 a 0,8 mg/L en la litoral, que en términos generales representan concentraciones muy bajas según la norma.

Turbidez. La turbiedad del agua se debe a la presencia de material suspendido y coloidal como arcilla del suelo, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, plancton y otros organismos microscópicos que estén presentes [15]. La zona litoral presentó un turbidez media de 524,00 NTU que resulta superior a la obtenida en la zona

profunda donde se reportó un valor medio de 12,67 NTU, en lo referente a la desviación típica; un resultado elevado refleja el grado de dispersión en los valores obtenidos para los puntos de muestreo.

Tabla 5: Estadísticos principales de SDT

Parámetro	Zona	
	Litoral	Profunda
Media	4651,11	8110,48
Varianza	3466461,11	533314,76
Máximo	6880	9560
Mínimo	2900	6350
Desv. Típ.	1861,8935	730,28
C.V.	0,4000	0,0900
Hipótesis nula	$\bar{l} - \bar{p} = 0$	
g.l	9	
t -valor _{estimado}	-5,3989	
p -valor _{estimado}	0,0004	
t -valor _{crítico} (dos colas)	2,2622	

Sólidos totales disueltos (SDT). Representan la sumatoria de los minerales, sales, metales, cationes o aniones disueltos en el agua, las fuentes primarias de SDT en las aguas receptoras son la escorrentía residencial, industrial, la lixiviación de la contaminación de suelos y fuentes de descargas de aguas contaminadas sobre el recurso hídrico [15]. La Tabla 5 muestra los valores obtenidos una vez procesado los datos reportados durante el monitoreo. Se puede precisar que existe una notoria diferencia entre los valores de sólidos totales disueltos en ppm de la media obtenida en ambas zonas de la laguna, por esta razón fue realizada la prueba de hipótesis para la diferencia de las medias con un nivel de confianza del 95 %. Al comparar el absoluto del t -valor obtenido con el t -valor crítico, se puede asegurar que hay diferencia estadísticamente significativa.

Sólidos flotantes (SF). La expresión sólidos y sustancias flotantes se refieren aquellos materiales que se sostienen en la superficie del agua e influyen en su apariencia [15], para efecto del estudio realizado en la Laguna la Bocaina, los resultados arrojados en el análisis de muestra, se reportaron como *Ausente* para ambas zonas del humedal.

Sólidos sedimentables (SS). Los sólidos sedimentables representan la cantidad de material que sedimenta en un período de tiempo [15]. Los valores obtenidos en el análisis de muestra realizado para ambas zonas de la laguna reporta un rango menor a 1,50 para la zona del litoral y menor a 0,5 para la zona profunda.

Tabla 6: Estadísticos principales de Conductividad

Parámetro	Zona	
	Litoral	Profunda
Media	9302,22	16220,95
Varianza	13865844,44	2133259,05
Máximo	13760	19120
Mínimo	5800	12700
Desv. Típ.	3723,6864	1460,5687
C.V.	0,4003	0,0900
Hipótesis nula	$\bar{l} - \bar{p} = 0$	
g.l	9	
t -valor _{estimado}	-5,3989	
p -valor _{estimado}	0,0004	
t -valor _{crítico} (dos colas)	2,2622	

Conductividad. La conductividad del agua es un valor muy utilizado para determinar el contenido de sales disueltas en ella, en su defecto la laguna al ser propia del Mar Caribe presenta una elevada conductividad, a la que contribuyen la polaridad del agua y la abundancia de los iones disueltos [15], la Tabla 6 muestra los resultados obtenidos para la zona litoral y profunda de la laguna en lo referente a conductividad.

Al realizar la prueba de hipótesis para la diferencia de las medias suponiendo varianzas desiguales, con un 95 % de nivel de confianza se puede asegurar que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los valores obtenidos en ambas zonas de la laguna.

Detergentes. La presencia de detergentes en los distintos recursos hídricos representa una alteración en la calidad del agua, debido a que dichas sustancias suelen llegar a los distintos cuerpos de aguas por medio del vertido de agua contaminada proveniente de la actividad industrial y/o doméstica. En el caso de la Laguna la Bocaina

Tabla 7: Comparación de los resultados obtenidos contra los límites permisibles (Decreto 883) (mg/L salvo indicación)

Parámetro Evaluado	valor obtenido		Límites permisibles Decreto N° 883
	Zona Litoral	Zona Profunda	
Temperatura (°C)	33,56	32,38	
pH (adim)	7,35	7,09	Mínimo 6,5 y Máximo 8,5
O.D.	1,07	2,27	Mayor de 5,0
Turbidez (NTU)	524,00	12,67	
SDT (ppm)	4651,11	8110,48	
SF	Ausente	Ausente	Ausente
SS	0 – 1,50	0 – 0,5	
Conductividad (μ S/cm)	9302,22	16220,95	
Detergentes	<1	<1	<1
Aceite, Grasas e Hidrocarburos	0,6	0 – 0,20	0,3
Coliformes Fecales (NPM/100 MI)	0 – 1400	0 – 450	
Coliformes Totales (NPM/100 MI)	0 – 7900	460,67	

en el análisis de muestra se reportó valores menores a 1 mg/L tanto en la zona litoral como en la profunda.

Aceite, grasas e hidrocarburos. Su presencia reduce la reoxigenación a través de la interfase aire-agua del recurso hídrico, contribuyendo así en la disminución del oxígeno disuelto del agua y estas al absorber la radiación solar afecta la actividad fotosintética de las diversas plantas acuáticas [15]. Los valores obtenidos están en los rangos de 0,40 y 0,90 mg/L para la zona litoral y menor a 0,20 para la zona profunda.

Coliformes totales y fecales. Su determinación permitió establecer la contaminación patogénica y bacteriológica del agua proveniente de residuos fecales. Los resultados obtenidos son, para los coliformes totales hasta 7900,00 para la zona litoral y 930,00 para la zona profunda; para los coliformes fecales hasta 1400,00 para la zona litoral y a 450,00 para la zona profunda. Se puede observar que la zona litoral ha sido la más afectada por la presencia de los coliformes fecales y de manera genérica por los coliformes totales, estos resultados confirman que la calidad del agua presente en la laguna se encuentra severamente comprometida.

5.2. Comparación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos con los límites permisibles establecidos en la Norma.

La Tabla 7 muestra la comparación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos me-

dante la evaluación de los valores obtenidos de la recopilación experimental de la data, con los límites permisibles establecidos en la Norma.

Como se puede observar en la Tabla 7 la concentración del oxígeno disuelto en ambas zonas de la laguna, se encuentran por debajo del límite establecido en el Decreto N° 883, el cual compromete el normal desarrollo de la biota existente en el humedal, de igual manera la concentración de aceite, grasas e hidrocarburos obtenida en la zona litoral sobrepasan el valor permisible, comprometiendo así el proceso de reoxigenación del agua, mientras que en la zona profunda su concentración se ubica por debajo del límite establecido; en cuanto a los sólidos sedimentable la no ausencia en el agua incumple con lo normado.

Una vez comparado los resultados obtenidos, se puede precisar que el agua presente en la Laguna la Bocaina incumple con los límites máximos y mínimos establecidos en el Decreto N° 883, evidenciando de esta manera la existencia de un profundo deterioro en la calidad de su agua.

5.3. ICA presente en la laguna La Bocaina del parque nacional “San Esteban”

Una vez definidos los modelos matemático que describen el cálculo ICA empleado para la valoración del agua del humedal, se procedió a realizar los cálculos correspondientes (ver Tablas 1 y 8).

Tabla 8: Índice de calidad del agua de la zona litoral “Laguna la Bocaina” según los modelos de Montoya, *et al* [14] & Espinosa y Rodríguez [3]

Zona	Modelo	
	Centro América [14]	Venezuela [3]
Litoral	30,10	23,94
Profunda	36,49	34,37

Agradecimiento

R. Pérez y F. Riveiro agradecen al Laboratorio de Procesos Estocásticos del IMYCA por la colaboración en los estudios estadísticos de este trabajo.

6. Conclusiones

Las conclusiones fundamentales son que la laguna “La Bocaina” exhibe notorios cambios físicos con respecto al color y olor de sus aguas desde hace más de 5 años; en la laguna se identificaron factores contaminantes tales como: residuos y desechos sólidos y el vertido de agua hacia la zona litoral del humedal a través de los ductos de descarga registrados, además de la puesta en práctica de actividades antrópicas como: el pique de fangos, la extracción de moluscos y el desarrollo comercial de bodegones y restaurantes en zonas aledañas; por último el agua presente en la laguna la Bocaina no cumple con los límites permisibles.

Como el grado de contaminación del agua es medido en términos del índice, las condiciones del agua del humedal están seriamente comprometidas en términos de calidad y evaluando en función de los modelos ICA aplicados en cada zona de la laguna, en los que fueron considerados distintos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en función a lo establecido por sus autores, en términos numéricos no reflejaron un gran margen de diferencia, exceptuando el caso de la zona litoral, como efecto de los distintos niveles de calidad obtenidos para los parámetros de turbidez, sólidos totales disueltos y el oxígeno disuelto entre las dos metodologías aplicadas. También es

necesario resaltar; que a pesar de emplearse dos metodologías de cálculo ICA distinta, existe una variación numérica entre los resultados obtenidos para la zona profunda y litoral de la Laguna la Bocaina, el cual se hace interesante puesto que dicha diferencia refleja una notable degradación en la calidad de su agua.

Referencias

- [1] G. Yanes. Utilización de la avifauna acuática en la valoración ecológica y socioeconómica de la laguna La Bocaina del Parque Nacional “San Esteban” (Carabobo, Venezuela). Trabajo especial de grado, Departamento de Biología, Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología, Universidad de Carabobo, Valencia, Carabobo, Venezuela, 2014.
- [2] Nora Malaver, María Rodríguez, and Víctor Hugo Aguilar. Un diagnóstico de la calidad microbiológica del agua de la Laguna de Tacarigua, estado Miranda, Venezuela. *Acta Biológica Venezolana*, 34(2), 2014.
- [3] Tony Espinosa and Carmen Rodríguez. Determinación del índice de calidad del agua (ICA), de los ríos Morón y Patanemo del Estado Carabobo, en Venezuela. *Revista INGENIERÍA UC*, 23(2):204–215, 2016.
- [4] Tania Espinal, Jacinto Sede no, and Eugenia López. Evaluación de la calidad del agua en la Laguna de Yuriria, Guanajuato, México, mediante técnicas multivariadas: un análisis de valoración para dos épocas 2005, 2009-2010. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(3):147–163, 2013.
- [5] Marisela López, Griselda Pulido, Arturo Serrano, Juan Gaytán, William Scott, and Maria López. Evaluación estacional de las variables fisicoquímicas del agua de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz, México. *Revista Científica UDO Agrícola*, 12(3):713–719, 2012.
- [6] Zoyla Martínez. Gestión integrada de cuencas hidrográficas en el Estado Carabobo (Venezuela). Ponencia, AVEAgua, 2011.
- [7] Patricia Torres, Camilo Cruz, and Paola Patino. Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15e):79–94, 2009.
- [8] Ada Barrenechea. *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: teoría*, volume Tomo 1, chapter 1, Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua, pages 2–56. OPS–CEPIS–PUB, Lima, Perú, 2004. Cánepa de Vargas, Lidia; Maldonado Yactayo, Víctor; Aurazo de Zumaeta, Margarita., editores.
- [9] R. M. Brown, N. I. McClelland, R. A. Deininger, and R. Tozer. A water quality index – do we dare? *Water and Sewage Works*, 117(10):339–343, 1970.

- [10] Şehnaz Şener, Erhan Şener, and Ayşen Davraz. Evaluation of water quality using water quality index (wqi) method and gis in aksu river (sw-turkey). *Science of the Total Environment*, 584–585:131–144, 2017.
- [11] María Silvana, Marcelo Wilson, Marcos Ladoc, and Antonio Paz. Evaluation of soil degradation produced by rice crop systems in a vertisol, using a soil quality index. *CATENA*, 150:79–86, 2017.
- [12] Curtis G. Cude. Oregon water quality index: a tool for evaluating water quality management effectiveness. *Journal of American Water Resources Association*, 37(1):125–137, 2001.
- [13] PanaChlor, Panamá. *Solidos Disueltos Totales (TDS) & Electroconductividad (EC)*, 2016. <http://panachlor.com/>.
- [14] M. Montoya, C. Contreras, and V. García. Estudio integral de la calidad del agua en el estado de jalisco. Technical report, Comité nacional de agua, CONAGUA, Gerencia, Guadalajara – México, 1997.
- [15] ITSEMAP Ambiental, Madrid; Fundación MAPFRE. *Manual de contaminación ambiental*, 1994.

Tech note: Water quality index of Albarregas and Milla rivers of Merida State, Venezuela

O. Mayorga, M. Ramírez, J. Mayorga*

Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Mérida 25101, Venezuela

Abstract.-

In this study, the effects of the residual water generated by the population of the city of Mérida on two of the four rivers that pass through the city, Milla and Albarregas, are evaluated. For this purpose, the water quality index, WQI, is determined by measuring the following parameters: pH, temperature, turbidity, fecal coliforms, dissolved oxygen, total phosphates and suspended solids, calculating the index and determining the water quality. The results indicate that, during the sampling period, before entering the city, the two bodies of water have a WQI above 80 (the range is between 0 (worst) and 100 (best)) indicating that it is good quality water and can be used for human consumption, but when passing through the city, the index decreases rapidly (to below 50 in some cases), which indicates that its quality is between bad and moderate. It is proposed to continue the study on the quality of these and the other two rivers that pass through the city, that the competent government agencies implement an environmental education campaign within the community, and eventually construct a wastewater treatment plant.

Keywords: water quality index; Albarregas river; Milla river.

Nota técnica: Índice de calidad de agua de los ríos Albarregas y Milla del Estado Mérida, Venezuela

Resumen.-

En este estudio, se evalúa el efecto de las aguas residuales generadas por la población de la ciudad de Mérida sobre dos de los cuatro ríos que pasan por la ciudad, Milla y Albarregas. Para ello, se determina el índice de calidad de agua, ICA, midiendo los siguientes parámetros: pH, temperatura, turbidez, coliformes fecales, oxígeno disuelto, fosfatos totales y sólidos suspendidos, calculando el índice y determinando la calidad del agua. Los resultados indican que durante el período de muestreo, antes de llegar a la ciudad, los dos cuerpos de agua presentan ICA por encima de 80 (el rango está entre 0 (pésima) y 100 (excelente)) lo que indica que es un agua de buena calidad, y puede ser utilizada para consumo humano, pero al pasar por la ciudad, el índice decrece rápidamente (hasta debajo de 50 en algunos casos), lo cual indica que su calidad está entre mala y regular. Se propone la continuación del estudio sobre la calidad de éstos y los otros dos ríos que pasan por la ciudad, que los organismos competentes implementen una campaña de educación ambiental dentro de la comunidad, y la eventual construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales.

Palabras clave: índice de calidad del agua; río Albarregas; río Milla.

Recibido: septiembre 2017

Aceptado: noviembre 2017

1. Introducción

La vida no fuese posible en ninguna de sus formas, sin la existencia del recurso natural más importante: el agua, la cual cubre el 71 % de la superficie de la corteza terrestre, aunque 96,5 % de ella se encuentra en los océanos. Al caer en

*Autor para correspondencia

Correo-e: jmayorga@ula.ve (J. Mayorga)

forma de lluvia, el agua arrastra impurezas del aire, y a medida que circula por la superficie, o al filtrarse a través de la misma, se le añaden otros contaminantes químicos, físicos y biológicos. De ésta manera, existe una contaminación natural, pero con el crecimiento de la población humana, el desarrollo industrial y el avance tecnológico, se ha incrementado el uso de éste indispensable recurso y su contaminación. Por las razones expuestas anteriormente es usual someter a tratamiento el agua residual, para evitar la contaminación de los cuerpos de agua a donde se lleva. La ciudad de Mérida está atravesada por 4 ríos: Albarregas, Milla, La Pedregosa y Chama. La contaminación de los ríos de la ciudad los convierte en cuerpos de agua afectados, siendo el vertido de los residuos líquidos sin tratamiento y de desechos sólidos una de las principales causas del problema. En este estudio, se determina la calidad del agua en los ríos Albarregas y Milla antes y después de las descargas de aguas servidas. En un estudio posterior, se realizará una investigación similar sobre los otros dos cuerpos de agua. Los ríos Albarregas y Milla fueron las fuentes principales de abastecimiento del preciado líquido para la ciudad desde su fundación en 1558. Cuando se inició la construcción de un sistema de cloacas, sus colectores fueron diseñados para desembocar directamente a los ríos, elevando su contaminación, la cual ha ido en aumento con el paso de los años. El Albarregas es un importante río andino que tiene su nacimiento en la laguna Albarregas y su desembocadura en el río Chama. Tiene una longitud de 25 km con una cuenca de 112.33 km², y divide a la ciudad de Mérida en dos partes conocidas como La Banda Occidental y la Otra Banda. El río Milla nace un poco más arriba del Núcleo La Hechicera de la Universidad de Los Andes y se une con el río Albarregas en un punto muy cercano a la Plaza de Toros de la ciudad. Su longitud es 4,2 km. En el cauce de los dos ríos se observa gran cantidad de desechos sólidos, lo que contribuye bastante a elevar la contaminación.

La evaluación de la calidad del agua debe considerar un análisis integral del recurso hídrico, que permita tomar acciones para su posterior manejo y control. Una de las herramientas más

usadas para medir la calidad del líquido es el Índice de Calidad del Agua (ICA), que proporciona una evaluación cuantitativa de la misma, mostrando su grado de contaminación, lo que permite determinar si un cuerpo de agua es saludable o no. El índice representa un método cuantitativo estándar para conseguir fácilmente la salud relativa de un cuerpo de agua y puede ser utilizado para medir los cambios en la calidad del líquido en tramos particulares de los ríos a través del tiempo, comprobando las variaciones en sus parámetros en tales sitios, o puede compararse la calidad con la de otros ríos alrededor del mundo. Se han desarrollado muchos índices, entre lo que se pueden mencionar, el de Idaho y Oregón (EE UU) [1], British Columbia (Canadá) [2], Jalisco y León (México) [3] y Dalmatia (Europa) [4]. En el caso de Venezuela, hay estudios muy recientes realizados por Espinoza y Rodríguez [5, 6] en los estados Carabobo, Falcón y Yaracuy, donde se determinó el ICA y se cuantificó el efecto de la contaminación.

El índice que se usa con mayor frecuencia en estudios de calidad del agua es el propuesto por la Fundación Nacional de Instalaciones Sanitarias de los EE UU (National Sanitation Foundation), ICANSF [7], establecido en 1970, y es el que se emplea en esta investigación. El índice se representa mediante un número comprendido entre 0 y 100 (con 100, excelente), que resulta de un promedio ponderado de 9 parámetros de calidad del agua, incluyendo: cambio de temperatura, oxígeno disuelto, pH, sólidos suspendidos totales, coliformes fecales, turbidez, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), fosfatos y nitratos. El desarrollo del ICANSF se llevó a cabo a través de dos etapas. Inicialmente, se realizó una encuesta entre 142 expertos estadounidenses a nivel local, estatal y nacional, y se establecieron 35 pruebas de calidad del agua para incluirse en el índice. Finalmente, quedaron los 9 parámetros citados antes. Para convertir los resultados de las mediciones de los parámetros a valores del índice, se construyó una curva para cada parámetro en función de la calidad del agua (de 0 a 100), y de allí se obtuvo un valor numérico (denominado valor Q) de cada uno. En la segunda etapa, se consideró que algunos

parámetros eran más importantes que otros, por lo que se estableció una ponderación para cada parámetro y se asignaron los pesos relativos (W_i), en función de la importancia relativa del parámetro sobre la calidad del agua. Así, se fijó un peso de 0,17 para oxígeno disuelto; 0,16 para coliformes fecales; 0,11 para pH y DBO; 0,10 para cambio de temperatura, fosfatos y nitratos; 0,08 para turbidez y 0,07 para sólidos totales. Finalmente, se calculó el ICANSF mediante la suma ponderada de los parámetros

$$ICANSF = \frac{\sum (W_i Q_i)}{\sum W_i}$$

Cuando se miden menos de 9 parámetros, puede determinarse el índice sumando los resultados de los parámetros evaluados y ajustando al total de W_i . El ICANSF también se puede calcular utilizando una herramienta en línea [8], que facilita el cómputo, y que usa como dato el valor obtenido experimentalmente para cada parámetro, para determinar directamente el resultado. Ese enlace se utilizó en este estudio. Landwehr y Denninger [9], demostraron que el cálculo del ICA mediante el promedio ponderado es superior a la suma aritmética, es decir que es mucho más sensible a la variación de los parámetros, reflejando con mayor precisión un cambio de la calidad del agua. Para determinar la calidad del agua, una vez calculado el ICANSF, se emplea la Tabla 1.

Tabla 1: Calidad del Agua en función del ICANSF.

ICANSF	Calidad del agua
91-100	Excelente
71-90	Buena
51-70	Regular
26-50	Mala
0-25	Pésima

El agua con condiciones óptimas presenta un valor de 100, y este número es menor a medida que la contaminación es más elevada. Para valores de ICANSF mayores que 90 (excelente), el agua es apta para el desarrollo de la vida acuática animal y vegetal, y no causa riesgo alguno si se tiene

contacto directo con ella. Los cuerpos de agua ubicados dentro de la categoría regular presentan menos aptitud para la vida acuática, y en ellas se ha observado un aumento en la frecuencia de crecimiento de algas. Si el ICANSF tiene un valor entre 26 y 50 (calidad mala), disminuyen aún más las condiciones para la vida dentro de ella y el líquido puede sostener muy poca diversidad de vida. Para valores del índice inferiores a 25 (calidad pésima), el agua tiene problemas de contaminación que limitan la vida acuática, y representa un riesgo si se tiene contacto directo con ella, como por ejemplo en deportes acuáticos.

2. Metodología

El estudio se desarrolló en los ríos Albarregas y Milla de la ciudad de Mérida, Venezuela. Las muestras fueron tomadas en puntos de ambos ríos antes y después de la descarga de aguas residuales domésticas y en la confluencia de ambos ríos, siguiendo la norma Covenin 2709-02 [10] considerando factores como facilidad de acceso, seguridad del sitio, representatividad del punto de muestreo y logística. En todos los casos, se usaron muestras instantáneas. Las fechas del muestreo fueron entre el 05/02/2017 y el 18/03/2017. En las Figuras 1 y 2 aparece la ubicación aproximada de los sitios de muestreo.

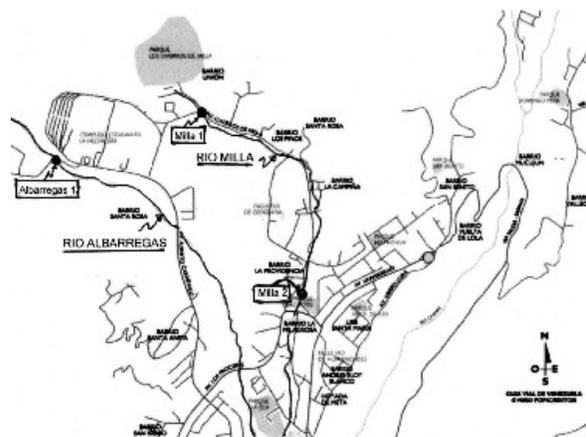


Figura 1: Puntos de muestreo Milla 1 y 2, y Albarregas 1.

Para la determinación de las coordenadas de los puntos de muestreo, se utilizó el programa Google Earth. En la Tabla 2 aparece la posición de cada punto.

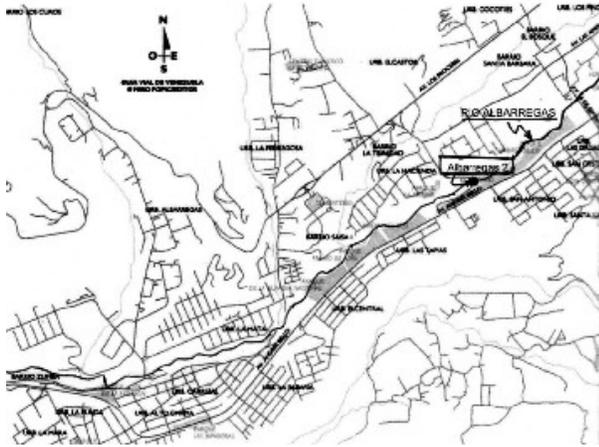


Figura 2: Punto de muestreo Albarregas 2.

Tabla 2: Ubicación de los puntos de muestreo.

Punto	Coordenadas		Altura msnm
	N	O	
Albarregas 1	8°37'48.95"	71°09'35.03"	1984
Milla 1	8°37'48.01"	71°08'57.91"	1889
Milla 2	8°37'02.99"	71°08'17.11"	1718
Confluencia	8°36'15.62"	71°08'24.71"	1640
Albarregas 2	8°34'27.37"	71°10'41.25"	1385

Las muestras registradas con un 1 corresponden a puntos aguas arriba de la descarga de aguas residuales de la ciudad. Las que tienen un 2 fueron tomadas aguas debajo de las descargas. La identificada como Confluencia se tomó en un sitio aguas abajo del punto donde se reúnen ambos ríos. Para el muestreo, se utilizaron envases plásticos nuevos con tapa, los cuales se enjuagaron dos veces con agua del río antes de recoger la muestra. Se llenó uno de los envases y se midió la temperatura. Además, se utilizó un erlenmeyer de vidrio con tapa esmerilada para “fijar” el oxígeno disuelto en el sitio de muestreo. Para el transporte, se colocaron las muestras dentro de una cava con hielo y se llevaron al laboratorio. Al llegar, se evaluó inmediatamente el oxígeno disuelto y el pH y se inició la caracterización bacteriológica y fisicoquímica, midiendo los siguientes parámetros: coliformes fecales, turbidez, fósforo total y sólidos suspendidos totales, utilizando en todos los casos, la metodología establecida en los Métodos Normalizados [11]. No se midió el contenido de nitratos

ni la DBO.

3. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos para cada Índice en los puntos de muestreo seleccionados aparecen en la Tabla 3. En la Tabla 4 se muestran los valores promedio de los ICA de cada río, aguas arriba y aguas abajo de las descargas de aguas residuales.

Tabla 3: Índice de calidad del agua.

Nº	Muestra	Fecha	Índice	Calidad
1	Milla 1	05-02-2017	81	Buena
2	Milla 1	12-02-2017	84	Buena
3	Milla 1	07-03-2017	85	Buena
4	Albar 1	05-02-2017	83	Buena
5	Albar 1	12-02-2017	88	Buena
6	Albar 1	07-03-2017	82	Buena
7	Milla 2	19-02-2017	61	Regular
8	Milla 2	09-03-2017	55	Regular
9	Milla 2	15-03-2017	57	Regular
10	Confluencia	19-02-2017	64	Regular
11	Albar 2	09-03-2017	68	Regular
12	Albar 2	15-03-2017	57	Regular
13	Albar 2	18-03-2017	46	Mala

Tabla 4: Índice promedio de calidad del agua.

Río	Índice	Calidad
Milla 1	83.3	Buena
Milla 2	57.6	Regular
Albar 1	84.3	Buena
Albar 2	57	Regular
Confluencia	64	Regular

En la Tabla 3 se puede observar que los valores del ICA para los 2 ríos, aguas arriba de las descargas residuales son muy elevados y similares, con una calidad buena para el líquido, lo que era de esperarse, ya que corriente arriba, ambos cauces presentan poca contaminación, por corresponder al paso del líquido por zonas casi vírgenes, con poca o ninguna intervención humana. A medida que los ríos atraviesan la ciudad, se van descargando efluentes líquidos sin tratamiento, además de los desechos sólidos, lo que desmejora su calidad, pasando de buena a regular. Incluso, en una de las muestras del río Albarregas, la calidad del agua es mala. En el punto de confluencia de los 2 ríos,

el índice tiene un valor intermedio. Se observa además que aguas abajo del río, los cambios en el ICANSF son mayores que aguas arriba (donde el valor se mantiene razonablemente constante), lo que significa que la contaminación del cauce es función del momento, y que cambia día a día, por lo que se requiere un número alto de muestras para obtener resultados confiables, además del monitoreo permanente del ICANSF para observar el grado de deterioro del río en función del tiempo.

En cuanto a los valores promedio del ICANSF para cada río, la Tabla 4 indica que durante el lapso de muestreo, la calidad del agua pasa de buena a regular en los dos ríos, con valores de índice próximos a 84 y a 57 antes y después de las descargas contaminantes.

4. Conclusiones

La descarga de aguas residuales afecta bastante el ICANSF de los ríos Milla y Albarregas, y la calidad del líquido pasa de buena a regular para los dos ríos. Esto es preocupante, pues existe un Proyecto de Desarrollo de un Parque a las riberas del río Albarregas, y ese río debería descontaminarse para que la población pueda hacer uso pleno de esas instalaciones sin riesgos para su salud. La presencia de desechos sólidos en los dos ríos, tanto en los puntos de muestreo Milla 2 y Albarregas 2 como en sitios intermedios, contribuye significativamente a empeorar la contaminación, y demuestra la poca conciencia de la ciudadanía para cuidar y mantener limpios los cauces de los ríos. Debería implementarse una campaña de concientización ambiental de las colectividades que habitan en lugares próximos a los cuerpos de agua, para que eviten lanzar al agua cualquier material que los contamine. Dado que esta situación es típica de muchas ciudades de Venezuela, esta acción debería extenderse a todo el país. Además, se debe establecer un plan de mejoramiento de la calidad de agua de los ríos que atraviesan la ciudad de Mérida, por lo que se propone la construcción de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales que reduzca la carga contaminante antes de su descarga en los ríos, como se hace en muchos centros poblados de

otros países, y realizar un monitoreo continuo de la calidad de agua de los 4 cuerpos de agua que pasan por la ciudad de Mérida, para conocer su grado de contaminación y la evolución del ICA en el tiempo.

Referencias

- [1] Nina I. McClelland. Water quality index application in the Kansas River Basin. Tech report, US Environmental Protection Agency-Region VII, Kansas City, Missouri, 1974.
- [2] Ministry of Environment, Lands and Parks. Water quality British Columbia water quality status report. Tech report, Ministry of Environment, Lands and Parks, British Columbia, Canada, 1996.
- [3] H. Montoya, C. Contreras y García V. Estudio integral de la calidad del agua en el Estado de Jalisco. Reporte técnico, Com. Nal. Agua, Geren. Reg. Lermasantiago, Guadalajara, México, 1997.
- [4] N Stambuk-Giljanovic. Water quality evaluation by index in dalmatia. *Water Research*, 33(16):3423–3440, 1999.
- [5] Tony M. Espinosa Paz y Carmen Rodriguez. Tech note: Determination of water quality index (WQI) of Moron river and Patanemo river of Carabobo state in Venezuela. *Revista Ingeniería UC*, 23(2):204–215, 2016.
- [6] Tony M. Espinosa Paz y Carmen Rodriguez. Tech note: Determination of water quality index (WQI) of Aroa river and Yaracuy river of Falcon and Yaracuy state in Venezuela. *Revista Ingeniería UC*, 23(3):381–386, 2016.
- [7] R. M. Brown, N. I. McClelland, R. A. Deininger, and R.G. Tozer. Water quality index-do we dare? *Water and sewage works*, 117(10):339–343, 1970.
- [8] M. K. Mitchell and W. B. Stapp. *Field manual for water quality monitoring: an environmental education program for schools*. Kendall/Hunt Publishing Company, 2008.
- [9] J. Maciunas Landwehr and R. A. Deininger. A comparison of several water quality indexes. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 48(5):954–958, 1976.
- [10] COVENIN 2709-2002, Aguas naturales, industriales y residuales. Guía para las técnicas de muestreo. COVENIN, 2002.
- [11] APHA, AWWA y WPCF. *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Diaz De Santos, Madrid, España, 1992.

Author index Índice de autores, Volumen 24 (1, 2 y 3) 2017.

Author	<i>Autor</i>	Nro.	Página	Author	<i>Autor</i>	Nro.	Página
A				L			
Alfonzo, C.		1	40	Latouche, H.		2	185
Alfonzo, C.		3	351	Linares, C.		3	341
Alvarado, C.		2	256	Llave, L.		1	105
Arteaga, S.		1	115	López, H.		2	231
Ayrault, P.		3	341	Lopez, I.		3	314
B				Lopez, I.		3	400
Barrios, V.		1	105	López, J.		1	22
Bolaños, R.		1	73	López, N.		3	279
Brunet, S.		3	341	M			
C				Malavé, J.		1	115
Cajiao, A.		1	91	Maldonado J.		1	91
Camejo, F.		1	40	Manganiello, L.		1	63
Cantor, A.		3	309	Manganiello, L.		1	128
Cantor, A.		3	410	Manganiello, L.		3	417
Carrera, F.		1	73	Marcano, L.		1	63
Castillo, N.		2	241	Mare, E.		2	204
Colmenares, M.		2	204	Marin, R.		3	372
Correia, A.		1	63	Martínez, E.		1	22
Correia, A.		2	241	Martínez, F.		2	196
Cova, R.		1	128	Martino, L.		2	148
Cova, R.		3	417	Martino, L.		2	218
D				Mata, G.		1	81
Dauhajre, I.		3	351	Mayorga, J.		3	428
De Abreu, B.		1	105	Mayorga, O.		3	428
De Sousa, C.		2	241	Medina, J.		3	365
de Zubeldia, M.		2	137	Mejías, C.		1	1
Del Pino, P.		1	1	Mendez, D.		3	314
F				Morales D.		1	46
Flores, E.		1	105	Moreno, J.		3	417
Franchi, I.		2	269	Mujica, V.		3	314
Freitez, C.		2	196	Mujica, V.		3	400
G				Muñoz, A.		2	137
Gallipoli, E.		2	137	N			
García, O.		3	302	Narváz, M.		3	327
Gómez, M.		2	137	Nazar, J.		1	105
González, L.		2	218	Noguera, Y.		3	356
Guerra, G.		3	372	Núñez, A.		3	365
Guerra, L.		1	12	O			
Guevara, E.		3	279	Olival, J.		1	115
H				Ordoñez, J.		2	185
Hernández, A.		3	383	Ordoñez, J.		3	383
Hernández, G.		1	46	Osman-Cabrera, A.		2	256
I				Osman, A.		1	1
Infante, S.		3	383	Osman, A.		2	170
J				Oviedo, O.		3	341
Jiménez-Noda, M.		1	128				
Jiménez-Noda, M.		3	417				
Jiménez, C.		1	12				
Jiménez, J.		2	170				

Author	Autor	Nro.	Página
P			
Pamela Cartes		2	161
Paricaguan, B.		3	365
Paricaguán, B.		3	356
Parra, J.		1	53
Perdomo, Y.		2	170
Pereira, J.		2	137
Pérez, J.		3	356
Pérez, O.		2	231
Pérez, R.		3	417
Perozo, N.		1	53
Pevalonic, F.		3	302
Porrello, A.		3	351
Porrello, A.		1	40
R			
Ramírez, M.		3	428
Rey, D.		1	105
Rincón, J.		2	196
Riveiro, F.		3	417
Ríos, A.		3	327
Rodríguez, J.		1	91
Rodríguez, S.		2	256
Rodríguez, A.		3	365
Rodríguez, M.		3	314
Rodríguez, M.		3	400
Rogontino, F.		1	22
S			
Sáenz, L.		3	302
Sánchez, L.		2	185
Sánchez, L.		3	383
Sandoval-Ruiz, C.		1	28
Sandoval-Ruiz, C.		3	290
Santander, J.		2	269
Scolac, S.		1	22
Scope, D.		1	40
Solarte, K.		2	185
Soto, F.		1	46
Soto, F.		3	372
Subero, N.		1	63
T			
Terán, R.		1	12
Torres, C.		3	351
Tortosa, A.		3	372
Tovar, A.		2	241
Trías, L.		1	128
U			
Ulloa, H.		1	40
Uzcátegui, O.		2	148
V			
Vega, C.		1	128
Vega, C.		3	417
Z			
Zozaya, A.		1	1
Zozaya, A.		1	73
Zozaya, A.		2	269
Zumalacárregui, L.		2	231

Índice de materias, Volumen 24 (1, 2 y 3) 2017.

Materia	Nro.	Página	Materia	Nro.	Página
A			D		
acceso a datos satelitales	2	269	daño acumulado	1	40
aceite	3	314	decodificador Reed Solomon	3	290
acero inoxidable dúplex	3	302	depuración de gases	3	400
ácido nítrico	3	302	destilación	2	161
actividades de construcción cíclicas.	1	46	detección de bordes	1	53
aducto	2	256	detector UV	1	63
Agencia Espacial Europea	2	269	Di--FAFS	1	91
agentes reductores	3	365	direccionales	2	218
agentes solidificantes	3	356	diseño	2	256
AISI 1005	3	351	diseño hardware libre	1	28
AISI 1045	1	40	Dunaliella salina	2	231
algoritmos de filtrado	3	383	dureza	3	351
alquilación	2	161	E		
AME	1	91	ecuaciones diferenciales estocásticas	3	383
amina	2	256	eliminación de cloruros	2	204
amortiguado	3	309	embalse Pao Cachinche	1	128
analgésicos anti-inflamatorios no este- roideos	1	63	entrenamiento adaptativo	3	290
análisis espectral	2	170	ENVISAT	2	269
asignación de horarios estudiantiles	1	105	equipos alimenticios	2	148
astaxantina	2	231	errores	3	410
autómata	1	81	ERS	2	269
autómata celular	1	53	esfuerzos de tracción	3	351
B			espumabilidad	2	137
beneficios	3	279	estabilidad de las espumas	2	137
bidimensional	2	196	estadística	3	410
biodiesel	2	231	extracción	2	231
C			extracción	3	314
calidad de zonas de aguas	1	128	extracción de características	1	12
caracterización	3	314	F		
caracterización	3	341	fallas en cojinetes	1	12
carbonato	2	241	fatiga	1	40
carne deshebrada	2	148	fertilizante	3	365
ciclo cardíaco	3	309	filtros anaerobios	1	91
clasificación y control de la calidad	1	128	filtros no lineales	2	185
cloruro de bario	2	241	fosfito diácido de potasio	3	365
códigos 2D-RS reconfigurable	1	28	FPGA	1	28
coeficiente de retrodispersión	1	73	FPGA	3	290
comparación de normas	1	115	frecuencia cardíaca	3	309
condiciones	2	256	fuego	1	22
contaminación de agua	3	417	función de dispersión de punto	1	73
control robusto	3	327	H		
control supervisorio	1	81	hidráulica	2	196
corrosión intergranular	3	302	hidrotalcita calcinadas	2	204
cosmético	3	314	hidrotalcitas terciarias	3	341
COV	1	91	HPLC	1	63
crisales líquidos	2	137	humedal	3	279
			humedal de agua salada	3	417
			I		
			ICA	3	417
			imagen de radar	1	73
			incertidumbre	3	410
			índice de calidad del agua	3	417
			índice de calidad del agua	3	428
			ingeniería	1	1
			integración	3	279

Materia	Nro.	Página	Materia	Nro.	Página
L			S		
LATEX	1	1	salud ocupacional	3	400
lixiviado	3	356	segmentación de imágenes	1	53
luminancia	2	185	selección de opciones	1	105
M			señal de voz	2	170
mantenimiento predictivo.	1	12	simulación	1	46
máquinas de vectores de soporte	1	12	simulación	2	161
metales pesados	3	356	simulación	3	372
método Maennig	1	40	sistemas de eventos discretos	1	81
metodología de diseño	1	115	sistemas descriptores	3	327
métodos de valoración	3	279	sistemas LPV	3	327
MgAl	2	204	sistemas neuro-cognitivo	3	290
modelo lógico-matemático	1	28	soda cáustica	2	241
modelos determinísticos	3	410	solidificación/estabilización	3	356
modelos espacio estados	3	383	sorción	1	63
modelos matemáticos	3	410	suelos	1	63
mortero	1	22	surfactantes	2	137
motor de inducción	1	12	T		
muros estructurales	1	115	telecomunicaciones.	1	1
N			tensión superficial	2	137
normalizado	1	40	tiempos aleatorios	1	46
normas H2 -H ∞	3	327	titulación	2	241
O			toxicología	3	314
olefinas	2	161	trabajos especiales de grado	1	1
operaciones de construcción	1	46	transformada discreta de Fourier	2	170
oscilador	3	309	transporte de gas	2	218
óxidos mixtos	3	341	trinitrotolueno	3	400
P			turba	3	356
pentolita	3	400	V		
perforación horizontal dirigida	2	218	VHDL	1	28
poliestireno expandido	1	22	VHDL	3	290
precipitación	2	241	viscosidad	2	256
probabilidades	3	410	viscoso	3	309
problema de satisfacción de restricciones	1	105	visión artificial	1	53
procesamiento de alimentos	2	148	Z		
procesamiento de imágenes	2	185	ZnAl	2	204
procesamiento de señales	3	290	Otros		
procesos constructivos	3	372	β -caroteno	2	231
puente	2	196			
R					
radares de apertura sintética SAR	1	73			
realimentación estática de la salida	3	327			
redes neuronales reconfigurables	3	290			
reducción de ruido	2	185			
Reed Solomon	1	28			
reflectancia	1	73			
reflectividad	1	73			
rendimientos	3	372			
resistencia	1	22			
río Albarregas	3	428			
río El Paño	1	128			
río Milla	3	428			

Subjects index, Volumen 24 (1, 2 y 3) 2017.

Matters	Nro.	Page	Matters	Nro.	Page
A			F		
access to satellite data	2	269	failures in bearings	1	12
adaptive training	3	290	fatigue	1	40
adduct	2	256	feature extraction	1	12
AISI 1005	3	351	fertilizer	3	365
AISI 1045	1	40	filtering algorithms	3	383
Albarregas river	3	428	fire	1	22
alkylation	2	161	foamability	2	137
amine	2	256	food equipment	2	148
anaerobic filters	1	91	food processing	2	148
astaxanthin	2	231	for constructive activities	3	372
automaton	1	81	FPGA	1	28
B			FPGA	3	290
backscatterer coefficient	1	73	free hardware design	1	28
barium chloride	2	241	G		
benefits	3	279	gas cleaning	3	400
biodiesel	2	231	gas transportation	2	218
bridge	2	196	H		
C			H ₂ -H _∞ norms	3	327
calcined hydrotalcites	2	204	hardness	3	351
carbonate	2	241	heart rate	3	309
cardiac cycle	3	309	heavy metals	3	356
caustic soda	2	241	horizontal drilling directed	2	218
cellular automata	1	53	HPLC	1	63
characterization	3	314	hydraulic	2	196
characterization	3	341	I		
chloride removal	2	204	image segmentation	1	53
classification and quality control	1	128	images processing	2	185
code comparison	1	115	induction motor	1	12
computer vision	1	53	integration	3	279
conditions	2	256	intergranular corrosion	3	302
constraint satisfiability problem	1	105	ionization	1	63
construction operations	1	46	L		
cosmetic	3	314	LATEX	1	1
cumulative damage	1	40	leachate	3	356
cushioned	3	309	liquid crystals	2	137
cyclical construction activities	1	46	logical-mathematical model	1	28
D			LPV systems	3	327
descriptor systems	3	327	luminance	2	185
design	2	256	M		
Di -- FAFS	1	91	Maennig method	1	40
directionals	2	218	mathematical models	3	410
discrete event systems	1	81	MgAl	2	204
discrete Fourier transform	2	170	Milla river	3	428
distillation	2	161	mining	3	314
Dunaliella saline	2	231	mixed oxides	3	341
duplex stainless steel	3	302	models deterministic	3	410
E			models space states	3	383
edge detection	1	53	mortar	1	22
El Paíto river	1	128	N		
EMA	1	91	neuro-cognitive	3	290
engineering	1	1	nitric acid	3	302
ENVISAT	2	269	noise reduction	2	185
equations stochastic differential	3	383	non-steroidal anti-inflammatory analge- sics	1	63
errors	3	410	nonlinear filters	2	185
ERS	2	269	normalized	1	40
European Space Agency	2	269			
expanded polystyrene	1	22			
extraction	2	231			

Matters	Nro.	Page	Matters	Nro.	Page
O					
occupational fhealth	3	400	uncertainty	3	410
oil	3	314	undergraduate thesis	1	1
olefins	2	161	UV detector	1	63
option selection	1	105	V		
oscillator	3	309	valuation methods	3	279
P					
Pao Cachinche reservoir	1	128	VHDL	1	28
peat	3	356	VHDL	3	290
pentolite	3	400	viscosity	2	256
performances	3	372	viscous	3	309
point--spread Function	1	73	voice signal	2	170
potassium dihydrogenphosphite	3	365	VOL	1	91
precipitation	2	241	W		
predictive maintenance	1	12	water areas quality	1	128
probabilities	3	410	water pollution	3	417
R					
radar imaging	1	73	water quality index	3	417
random times	1	46	water quality index	3	428
reconfigurable 2D-RS codes	1	28	wetland	3	279
reconfigurable neural networks	3	290	WQI	3	417
reducing agents	3	365	Z		
Reed Solomon	1	28	ZnAl	2	204
Reed Solomon decoder	3	290	Others		
reflectance	1	73	β -carotene	2	231
reflectivity	1	73			
reinforced concrete	1	115			
resistance	1	22			
robust control	3	327			
S					
saltwater wetland	3	417			
seismic--resistant structures	1	115			
shredded meat	2	148			
signal processing	3	290			
simulation	1	46			
simulation	3	372			
simulation	2	161			
soils	1	63			
solidifying agents	3	356			
sorption	1	63			
spectral analysis	2	170			
stability of foams	2	137			
stabilization/solidification	3	356			
static output feedback (SOF)	3	327			
statistics	3	410			
structural elements design	1	115			
structural walls	1	115			
student schedule generation	1	105			
supervisory control	1	81			
support vector machine	1	12			
surface tension	2	137			
surfactants	2	137			
synthetic aperture radars	1	73			
T					
telecommunications	1	1			
tertiary hydrotalcites	3	341			
titration	2	241			
toxicology	3	314			
traction effort	3	351			
trinitrotoluene	3	400			
two-dimensional	2	196			

Normas para la presentación de artículos

Generales

Linea 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.

Al enviar un artículo a Revista Ingeniería UC, el autor del trabajo está comprometido en forma formal que el trabajo es original e inédito, manifiesta su conocimiento de las normas de la revista y que su trabajo será arbitrado.

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 y presentar tres copias en físico.

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 numeradas en arábigos (1, 2, ...), citadas 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 17,5cm.

No es estilo de la revista frases como; “en la Figura siguiente” o en la “Tabla anterior”

Los artículos provenientes del exterior del país serán aceptados a través de correo electrónico.

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 y

6. Referencias Bibliográficas.

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: Beale [9], o simplemente el número de la referencia bibliográfica [9], 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 en un libro.
- Memorias de congresos.
- Libros
- Tesis doctorales
- Trabajo de grado de materia
- 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] Beale G.O., Arteaga F.J. y Black W.M. Design and Evaluation of a Controller for the Process of Microwave Joining of Ceramics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 39(4), 301–312, 1998

En caso de libros ha de incluirse: Autor(es), *título*, editorial, lugar de publicación y año de publicación.

Por ejemplo:

[9] Hill J.M. and Dewynne J.N. *Heat Conduction*. Blackell set. Pub. , London, 1992

En caso de colección editada: Autor(es). Título, En: editor, año, *título*, volumen, editorial, lugar, número de páginas y año de publicación.

Por ejemplo:

[11] Kalla S. L. and Galué L. (1993): Generalized fractional Calculus. Global Publishing Company, USA, 145-178.

Se recomienda a los autores tener en cuenta las normas internacionales de nomenclatura para la utilización de símbolos, unidades y abreviaturas.

Notas Finales

Los artículos serán sometidos a arbitraje previa a la publicación. Se podrán entregar separatas por tema a solicitud del autor, cuyo costo será a convenir

REVISTA INGENIERÍA UC
FACULTAD DE INGENIERÍA,
UNIVERSIDAD DE CARABOBO
CAMPUS BÁRBULA, NAGUANAGUA,
ESTADO CARABOBO,
CÓDIGO POSTAL 2008, VENEZUELA

<http://revista.ing.uc.edu.ve/>

<http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/>

Correo-e: revistaing@uc.edu.ve

Authors Information

General

Editorial line

Revista INGENIERÍA UC will considerer for publication contributions original and unpublished in engineering, in particular the 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.

Submitting an article to Revista Ingeniería UC, the work author is committed to formal so that the paper is original and unpublished, he shows 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 Word works must employ a fount of family Time, to be stored in compact disk and to present three copies in physical.

The labored 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 file apart 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 articles coming from other country are accepted through electronic mail (email). The writing sequence for the articles shall have these steps: Title Page, Introduction, Methodology or Research Development, Analysis and Discussion of Results and Conclusions, and 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: Jhonson [9], or simply [9] with no author name.

For \LaTeX 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:
Beale G. O. Arteaga F. J. and Black W.M., Design and Evaluation of a Controller for the Process of Microwave Joining of Ceramics. *IEEE Transactions of Industrial Electronics*. 39(4), 301-312, 1992.

In the case of Books: Author(s) (in caps and lower case), *title*, publisher, place and year of publication should be included. For example:

Hill J. M. and Dewynne J. N. *Heat Conduction*. Blackell Set. Pub., London, 1987.

Work in an edited collection: Author(s) (in caps

and lower case), *title*, volume, publisher, place and year. For example:

Kalla S. L. and Galué L. Generalized fractional, in *Calculus*. Global Publishing Company, USA, 145-178, 1997.

It is recommended to the authors to follow the International Nomenclature Norms (symbols, units and abbreviations).

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.

REVISTA INGENIERÍA UC
FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD
DE CARABOBO
CAMPUS BÁRBULA, NAGUANAGUA,
ESTADO CARABOBO,
CÓDIGO POSTAL 2008, VENEZUELA
<http://revista.ing.uc.edu.ve/>
<http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/>
Correo-e: revistaing@uc.edu.ve

Carta de compromiso

Envíe con su trabajo la siguiente carta el 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, que el autor y los coautores ceden los derechos de autor a la Revista INGENIERÍA UC, que 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 son 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: _____
El autor para correspondencia

Índices de Revista INGENIERÍA UC

Revista INGENIERÍA UC está indexada en:



Comité editorial

Editor Jefe

Dra. Lisbeth Manganiello
 Universidad de Carabobo
 Facultad de Ingeniería
 Valencia, Venezuela

Comité Editorial	Editores Honorarios	
<p>Dr Adelmo Ortiz Conde USB, Venezuela Dr. Ángel Rios Castro Universidad de Castilla La Mancha, España Dr. Antonino Caralli Universidad de Carabobo, Venezuela Dr. Carlos Martínez Universidad de Carabobo, Venezuela Dr. Enrique Barbien University of Houston, USA Dr. Guillermo Ramírez Universidad Central de Venezuela, Venezuela Dr. Herbertt J. Sira R. CINVESTAV–IPN, México Dr. johnny Bullon Universidad de los Andes, Venezuela</p>	<p>Dra Maura Vázquez de Ramírez Universidad Central de Venezuela, Venezuela Dr. Merlin Rosales Universidad del Zulia, Venezuela Dr. Pablo Baricelli Universidad de Carabobo Dr. Roberto Callarotti IVIC, Venezuela Dr. Sergio Mora Universidad de Santiago de Chile, Chile Dr. Teodoro Garcia Universidad de Carabobo, Venezuela Dr. José A. Díaz Universidad de Florida, USA</p>	<p>Dr. Edilberto Guevara Facultad de Ingeniería Universidad de Carabobo Dr. Francisco Arteaga Facultad de Ingeniería Universidad de Carabobo, Venezuela Asesores a la Editora Jefe: Dr. Cristóbal E. Vega G. IMYCA, Facultad de Ingeniería Universidad de Carabobo Ing. Jesús Jiménez, MSc., CATS, Facultad de Ingeniería Universidad de Carabobo</p>

**Revista Ingeniería UC, ISSN 1316–6832
septiembre – diciembre 2017, Volumen 24
Número 3**

Revista Ingeniería UC se encuentra indexada en:
Revenicyt (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 III y IV.



**Revista INGENIERÍA UC
Impreso en Publicaciones de la
Facultad de Ingeniería de la
Universidad de Carabobo,
Campus de Bárbula,
Venezuela**