



Mayo-Agosto 2019, Vol. 26, N° 2, ISSN 1316-6832
Online ISSN: 2610-8240



Revista INGENIERÍA UC

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

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

VALENCIA - VENEZUELA

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

**Revista
Ingeniería UC**

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

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

Editor - Jefe

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

Editores Honorarios

Prof. Edilberto Guevara, PhD. Vocal of the National Tribunal of Water. National Water Authority, Perú. Instituto Hidrología Aplicada y Medio Ambiente (IHAMA), Lima, Perú. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela. Período (1992-2003)

Prof. Francisco Arteaga, PhD. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela. Período (2003-2009)

Prof.^a Lisbeth Manganiello, PhD. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela. Período (2009-2018)

Editores

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

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

Editores Asociados

Prof.^a Evelyn Yamal. PhD. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela

Prof.^a Lissette Jiménez. PhD. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela

Prof.^a Beatriz Herrera. PhD. Universidad Católica de Leuven, Bélgica

Corrector de redacción y estilo

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

Junta Editorial

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

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

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

**Revista
Ingeniería UC**

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

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

Comité Técnico*

Dr. Luis G. Zárate López, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México

Dr. Enrique Cázares Rivera, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México

Dra. Laura Sáenz, Universidad de las Fuerzas Armadas, Sede Latacunga, Ecuador

Ing. Johel Rodríguez, M.Sc., Universitat Politècnica de València, España

Ing. Pedro Vargas Ferrer, M.Sc., Universidad de Talca, Chile

Dr. Eliecer Colina, Universidad de Los Andes, Venezuela

Dr. Francisco García Sánchez, Universidad Simón Bolívar, Venezuela

Dr. Fernando Mora, Universidad Simón Bolívar, Venezuela

Dr. Carlos Hurtado, Universidad de Oriente, Venezuela

Dr. Giovanni De Mercato, Universidad Simón Bolívar, Venezuela

Dr. Gian Franco Passariello, Universidad Simón Bolívar, Venezuela

Dr. William Castro, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Venezuela

Dr. Oscar Crescente, Universidad de Oriente, Venezuela

Dr. Luis Mata Guevara, Universidad de Oriente, Venezuela

Dra. Maj Britt Mostue, Universidad de Oriente, Venezuela

*Lista parcial

Dra. Susana Salinas de Romero, Universidad del Zulia, Venezuela

Lic. Hernando Herrera Mata, M.Sc., Universidad de Oriente, Venezuela

Ing. Carlos Lameda, M.Sc., Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre, Venezuela

Ing. Alfonso Alfonsi, Universidad de Oriente, Venezuela

Dr. William C. Henriquez Guzmán, Universidad de Oriente, Venezuela

Dr. Sergio Pérez Pacheco, Universidad Estatal de Bolívar, Ecuador

Dr. César O. Seijas Fossi, Universidad de Carabobo, Venezuela

Dr. Demetrio Rey Lago, Universidad de Carabobo, Venezuela

Dr. Alfonso Zozaya, Universidad de Carabobo, Venezuela

Dra. Damelys Zabala, Universidad de Carabobo, Venezuela

Dra. Lilly Marcano, Universidad de Carabobo, Venezuela

Dr. Antonio Bonsjak, Universidad de Carabobo, Venezuela

Dr. Guillermo Montilla, Universidad de Carabobo, Venezuela

Dr. Luis Vallés, Universidad de Carabobo, Venezuela

Dr. José A. Díaz, Universidad de Carabobo, Venezuela

Frecuencia de publicación

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

Información de Contacto

<http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/>

<https://www.redalyc.org/revista.oa?id=707>

Correo–e: revistaing@uc.edu.ve

Correo–e: revistaing@gmail.com

Correo–e: adalmarza@gmail.com (A. Almarza)

Correo–e: jjjimenezgriman@gmail.com (J. Jiménez)

Redes sociales

 Twitter: @revistaing



Instagram: revistainguc

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

ISSN 1316-6832
Online ISSN: 2610-8240



Revista Ingeniería UC

ÓRGANO DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD DE CARABOBO

Valencia – Venezuela

Contenido General, (*General content*)

| | |
|---|------------|
| Volumen 26 Número 2 | 125 |
| Editorial volumen 26 número 2 | 126 |
| <i>José Luis Nazar y Ángel Almarza</i> | |
| 1 An electronic security application for the authentication of Android phones based on the biometric analysis of human locomotion | 128 |
| Una aplicación de seguridad electrónica para la autenticación de teléfonos Android basada en el análisis biométrico de la locomoción humana | |
| <i>Daniel E. Hernández, Víctor E. Gil, Fabián Robledo</i> | |
| 2 Effect of geometric specifications of ogee spillway on the volume variation of concrete consumption using genetic algorithm | 145 |
| Efecto de las especificaciones geométricas de un aliviadero ogee en la variación del volumen de consumo de hormigón utilizando algoritmo genético | |
| <i>Milad Kheiry, Alireza Pilpayeh</i> | |
| 3 Preliminary study of the process of nitrate removal optimization from aqueous solutions using Taguchi method. | 154 |
| Estudio preliminar de la optimización del proceso de remoción de nitrato de soluciones acuosas utilizando el método de Taguchi | |
| <i>Hedieh Ahmadpari, Seyyed Hashemi, Amir Afarinandeh</i> | |
| 4 Hydraulic evaluation of energy dissipation in four types of buffer basins, under variable flow conditions | 163 |
| Evaluación hidráulica de la disipación de energía en cuatro tipos de cuencos amortiguadores, bajo condiciones de flujo variable | |
| <i>Luis Vásquez, Nelson Terrones</i> | |
| 5 Comparison of different methods with lysimeter measurements in estimation of rice evapotranspiration in Sari Region | 175 |
| Comparación de diferentes métodos con mediciones lisimétricas en la estimación de la evapotranspiración del arroz en la región Sari | |
| <i>Maryam Babaee, Ahmad Shokat-Naghadeh, Hedieh Ahmadpari, Mohammad Nabi-Jalali</i> | |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 6 | Rolling friction of AISI 4140 steel in a ring on ring tribometer | 185 |
| | Fricción por rodamiento del acero AISI 4140 en tribómetro anillo sobre anillo | |
| | <i>J. Romero, E. Rondón</i> | |
| 7 | Identification and quantification of (+) - Catechins and Procyanidins in Cocoa from Ocumare de la Costa, Venezuela | 192 |
| | Identificación y cuantificación de (+) - Catequinas y Procianidinas en cacao procedente de Ocumare de la Costa, Venezuela | |
| | <i>Eduardo Lujano, Lisbeth Manganiello, Ana Contento, Ángel Ríos</i> | |
| 8 | Studies of the mechanical properties of concrete reinforced with sugar cane bagasse fibers | |
| | Estudio de las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar | |
| | <i>Belén Paricaguán, José Muñoz</i> | 202 |
| 9 | World trend in the elaboration of cocoa derived products | 213 |
| | Productos derivados del cacao dirigidos al mercado alimentario y farmacéutico | |
| | <i>Rosangel Gómez–Molina, Samuel Villanueva, Magaly Henríquez</i> | |
| 10 | Trend study: technologies for the recycling of wastewater | 223 |
| | Trend study: technologies for the recycling of wastewater | |
| | <i>Jiraleiska Hernández, Samuel Villanueva, Magaly Henríquez</i> | |
| 11 | Tech note: exploratory analysis of the radioactive activity in the El Baúl Massif (Cojedes State-Venezuela) | 233 |
| | Nota técnica: análisis exploratorio de la actividad radiactiva en las Galeras de El Baúl (Estado Cojedes –Venezuela) | |
| | <i>Richard Barrios, Nelson Falcón</i> | |
| 12 | Tech Note: Study of the flow of a thin film on an inclined plane in the presence of a tangential stress applied to the free surface and effects of viscous dissipation. | 239 |
| | Nota técnica: Estudio del flujo de una película delgada sobre un plano inclinado en presencia de un esfuerzo tangencial aplicado a la superficie libre y efectos de disipación viscosa | |
| | <i>Gruber Caraballo, Enrique Flores</i> | |
| | Subjects index | 245 |

| | |
|--|------------|
| Índice de autores (<i>Author index</i>) | 246 |
| Apéndices | 1 |
| A. Línea editorial | 2 |
| B. Editorial line | 3 |
| C. Políticas de ética y publicación | 4 |
| D. Ethics and Publication Policies | 6 |
| E. Normas para la presentación de artículos | 8 |
| F. Authors Information | 11 |
| G. Carta de compromiso | 13 |
| H. Compromise letter | 14 |
| I. Índices de Revista Ingeniería UC | 15 |



Volumen 26 Número 2

Editorial

Revista Ingeniería UC en esta nueva edición de su Volumen 26, Número 2, Agosto 2019 presenta el producto del esfuerzo realizado para concretar el apoyo y acompañamiento requerido para seguir consolidando una memoria científica con los estándares de calidad que nos caracterizan, como medio de divulgación y difusión en las diferentes áreas de investigación de la ingeniería y ciencias afines. En tal sentido, se ha logrado la conformación de un nuevo Comité Editorial, que tiene como meta seguir extendiendo el alcance de nuestras publicaciones, atendiendo también a la evaluación permanente de los atributos que como órgano divulgativo nos permitirán un posicionamiento cada vez más sólido dentro de la comunidad científica. Así mismo, reafirmamos el compromiso ético y la transparencia con que abordamos todos nuestros procesos, por medio de las “Políticas de Ética y Publicación” de la revista. Paralelamente, hemos firmado la Declaración de San Francisco sobre la evaluación de la Investigación (DORA), atendiendo a las recomendaciones que allí se plantean en torno a la mejora en la forma como es evaluada la producción científica.

Nuestro primer artículo científico representa un Trabajo Especial de Grado de la Escuela de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería de nuestra ilustre Universidad de Carabobo, con Mención Honorífica como reconocimiento, realizado por Hernández y Gil, en el cual se presenta una aplicación de seguridad electrónica para la autenticación de teléfonos Android basada en el análisis biométrico de la locomoción humana, donde se integran con un enfoque transdisciplinar áreas como biomecánica, procesamiento de señales, técnicas de machine learning y la teoría de decisiones, con el empleo del acelerómetro triaxial del móvil para detectar su uso no autorizado.

Kheiry y Pilpayeh, muestran el efecto de las especificaciones geométricas de un aliviadero ogee en la variación del volumen de consumo de hormigón utilizando algoritmo genético, logrando determinar una relación entre el ancho del aliviadero y su altura en la sección transversal, que permite estimar un ahorro en el consumo de concreto y por ende una minimización de costos de construcción.

Ahmadpari y colaboradores, presentan el estudio preliminar de la optimización del proceso de remoción de nitrato de soluciones acuosas utilizando el método de Taguchi, analizando los parámetros: tipo de adsorbente, cantidad del mismo, tiempo de contacto, pH y concentración inicial de nitrato, empleando como adsorbentes hojas trituradas de palmas, espigas de trigo triturada y astillas de madera de haya.

Por otro lado, Vásquez y Terrones ejecutan la evaluación hidráulica de la disipación de energía en cuatro tipos de cuencos amortiguadores, bajo condiciones de flujo variable, desde el punto de vista experimental a escala de laboratorio.

Así mismo, Babae y su equipo realizan la comparación de diferentes métodos con mediciones lisimétricas en la estimación de la evapotranspiración del arroz en la región Sari, donde los resultados mostraron que el método Blaney – Criddle es el más consistente con los datos lisimétricos y por ende el más adecuado para estimar la evapotranspiración de la planta de arroz en dicha región.

Romero y Rondón estudian la fricción por rodamiento del acero AISI 4140 en tribómetro anillo sobre anillo, encontrando que la relación de velocidades es el parámetro de mayor influencia en el fenómeno.

También forma parte de esta edición otro Trabajo Especial de Grado con Mención Honorífica perteneciente a la Escuela de Ingeniería Química, donde Lujano presenta la identificación y cuantificación de (+)- catequinas y procianidinas en cacao procedente de Ocumare de la Costa, Venezuela, específicamente se distingue el grupo de los flavonoides dentro del cual se encuentran los flavanoles, como es el caso de la (+)- catequina y sus formas oligoméricas y del dímero Procianidina B2.

Igualmente, Paricaguán y Muñoz presentan el estudio de las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar, más específicamente analizan el efecto sobre la resistencia a compresión y flexión de mezclas de concreto mediante el uso de dichas fibras como sustituto parcial del agregado fino.

Gómez—Molina y su grupo muestran la tendencia mundial en la elaboración de productos derivados del cacao, realizando una exploración sistemática en base a patentes, permitiendo así comprender el uso actual como recurso y la proyección para el desarrollo de capacidades científico-tecnológicas vinculadas con la generación de nuevos productos. Hernández y colaboradores presentan un estudio de tendencia acerca de las tecnologías para el reciclaje de las aguas residuales, a través de la plataforma de patentes PatentInspiration®, realizando la extracción selectiva de documentos de invención desde el año 2012 hasta el 2017, lo cual sirve para identificar experiencias exitosas y sus posibles aplicaciones en el territorio nacional.

Finalizamos este número con dos notas técnicas. En la primera, Barrios y Falcón analizan de forma exploratoria la actividad radiactiva en las Galeras de El Baúl (Estado Cojedes-Venezuela). En la segunda, Caraballo y Flores realizan un estudio acerca del flujo de una película delgada sobre un plano inclinado, en presencia de un esfuerzo tangencial aplicado a la superficie libre y los efectos de disipación viscosa.

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

Profesor *Ángel Daniel Almarza*, PhD
Editor – Jefe

An electronic security application for the authentication of Android phones based on the biometric analysis of human locomotion

Daniel E. Hernández^a, Víctor E. Gil^a, Fabián Robledo^{*,b}

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

^b*Departamento de Electrónica y Comunicaciones, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.*

Abstract.- This article presents the development and results of an electronic security app running in real time and in background, aimed at Android phones that, based on human locomotion as a signature and the use of the triaxial accelerometer of the mobile, it allows detecting its unauthorized use, and manage the corresponding reaction. The biometric locomotion pattern of the owner is stored, being used as a reference for authentication when comparing it by multiple means with the user's pattern. For this purpose, two methods of pattern recognition were developed, the first of an experimental type designed based on statistical criteria, and the second based on the K-Nearest Neighbor algorithm (K-NN) of machine learning. Variations in walking patterns due to factors such as gender and footwear/terrain types were analyzed. Authentication involves a decision-making process where a hypothesis test on the user is applied repeatedly. A probability of correctly authenticating the user of more than 80 % and a probability of detection error of unauthorized individuals less than 5 % was obtained. The reaction includes the automated sending of e-mail and SMS to preset addresses informing of possible theft or loss of the mobile phone and the GPS coordinates of its location. Finally, it was determined that the application does not detrimentally affect the performance of the mobile (RAM, CPU) and may run in the background.

Keywords: Android app; authentication; biometry; K-NN algorithm; locomotion; security.

Una aplicación de seguridad electrónica para la autenticación de teléfonos Android basada en el análisis biométrico de la locomoción humana

Resumen.- En este artículo se presenta el desarrollo y resultados de una app de seguridad electrónica, de tiempo real y segundo plano, destinada a teléfonos Android que, basada en la locomoción humana como firma y el empleo del acelerómetro triaxial del móvil, permite detectar su uso no autorizado y gestionar la reacción. Se almacena el patrón biométrico de locomoción del propietario empleándose como referencia para la autenticación al compararlo por múltiples medios con el patrón del portador. A tal fin se desarrollaron dos métodos de reconocimiento de patrones, el primero de tipo experimental diseñado en base a criterios estadísticos, y el segundo a partir del algoritmo K-Nearest Neighbor (K-NN) de machine learning. Se analizaron las variaciones de los patrones de marcha debidos a factores como el género y los tipos de calzado/terreno. La autenticación implica un proceso de toma de decisiones donde se aplica recurrentemente una prueba de hipótesis sobre el portador. Se obtuvo una probabilidad de autenticar correctamente al usuario de más de 80 % y una probabilidad de error de detección de individuos no autorizados menor a 5 %. La reacción incluye el envío automatizado de e-mail y SMS a direcciones preestablecidas informando de un posible hurto o pérdida del móvil y de las coordenadas GPS de su ubicación. Finalmente se determinó que la aplicación no afecta perjudicialmente el desempeño del móvil (RAM, CPU) y puede correr en segundo plano.

Palabras clave: Android app; autenticación; biometría; algoritmo K-NN; locomoción; seguridad.

Recibido: 10 de mayo, 2019.

Aceptado: 29 de julio, de 2019.

1. Introducción

El avance tecnológico ha impulsado el desarrollo de técnicas de reconocimiento de patrones biométricos y estos sistemas se han extendido desde el campo de la medicina hasta la seguridad, donde la biometría toma mayor relevancia [1]. Las técnicas

* Autor para correspondencia:

Correo-e: frobledo@uc.edu.ve (F. Robledo)

computacionales y de los sensores han permitido a la biometría madurar en las aplicaciones de seguridad electrónica, implementando tecnologías como el reconocimiento facial, de voz, de marcha, etc. [2]. En las aplicaciones iniciales del reconocimiento de patrones biométricos era necesaria la explícita interacción del sujeto con los sensores. Estudios psicofísicos demuestran que es posible reconocer a una persona a partir de su forma de caminar [3]. De esta forma surge el estudio de la locomoción humana como potencial firma biométrica debido a propiedades como la de ser un método de identificación no invasivo [1].

La incorporación a los móviles de sensores inerciales para recolectar información del entorno y del usuario ha abierto la posibilidad de adquisición de datos biométricos. Ciertos estudios han sido realizados para el reconocimiento de la actividad humana, como caminar, trotar y saltar, usando los sensores para diversas aplicaciones de seguridad [4]. El incremento de la información privada almacenada en teléfonos inteligentes ha generado preocupación sobre la confidencialidad. En Venezuela de acuerdo al informe de 2015 de la Asociación Civil Paz Activa, un 39 % del mercado ilegal está dedicado a la venta de celulares robados en distintas comunidades [5]. Por lo tanto, la autenticación del usuario del teléfono móvil es esencial para la prevención de fugas de información. Las contraseñas o PINs son una forma de autenticación, pero son vulnerables a los ataques de fuerza bruta y al olvido [6]. Los sistemas biométricos para autenticación surgen como opción a considerar.

Se efectuó el desarrollo y evaluación de una aplicación (app) de seguridad implícita en segundo plano para teléfonos Android que permite la autenticación en tiempo real del usuario, realizada en base a la firma biométrica de locomoción humana. En esta investigación se implementó un prototipo capaz de llevar a cabo la autenticación del usuario del móvil en base al procesamiento de patrones de locomoción para así proveer un mecanismo de seguridad a los teléfonos que permita la reacción ante su robo o hurto. Para tal fin se programó un módulo de adquisición de datos de las señales biométricas de locomoción

que provienen de los sensores del teléfono, se construyó una base de datos de señales de locomoción humana de los sujetos de prueba, se seleccionaron las técnicas computacionales de reconocimiento de patrones para la identificación asertiva de las señales biométricas, se desarrolló un módulo de procesamiento principal para lograr la autenticación del sujeto portador, basada en el análisis estadístico que permite obtener indicadores de precisión y fiabilidad de la app, y se diseñaron los protocolos de notificación remota y reacción ante un posible hurto, programados en un módulo de seguridad. También se evaluó el impacto de la app en el desempeño general del teléfono.

El estudio se limitó al porte del móvil en un bolsillo del pantalón, ya que éste es el lugar donde se obtienen mejores resultados según algunas investigaciones [4]. La reacción de seguridad incluye el envío de la información de la ubicación del dispositivo perdido (vía sensor GPS) a través de mensaje de texto o correo. La investigación fue realizada en la Universidad de Carabobo, en la Escuela de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería, con soporte de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de esa misma Facultad.

2. Metodología y desarrollo de las aplicaciones de software

Las etapas en el desarrollo de la app requerida para llevar a cabo el proceso de autenticación del usuario del teléfono móvil se presentan en la Figura 1.



Figura 1: Diagrama de bloques de la app de autenticación.

Para la adquisición de datos se emplea un acelerómetro triaxial que detecta la aceleración inercial producida por movimiento e incluye la gravedad, y es capaz de cuantificar la aceleración en tres ejes perpendiculares entre sí. El eje X corresponde a un eje horizontal respecto a la pantalla del teléfono, el eje Y corresponde a un eje vertical, y el eje Z es perpendicular (en

base a developers Android, documentation for app developers, 2018.), según la Figura 2.

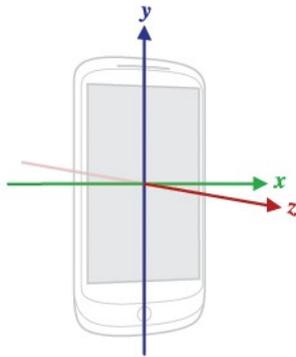


Figura 2: Ejes del acelerómetro triaxial en teléfonos Android.

Para usar el sensor se usó un *método oyente* de Android que permite a la app acceder a los datos del acelerómetro y configurar el retardo para una adecuada frecuencia de muestreo (con cambios de hasta un 5%). Para el retardo se optó por el valor dado por la constante *SENSOR_DELAY_GAME*, con una frecuencia nominal de 50 Hz para prevenir el aliasing. Una vez activado el oyente del acelerómetro se obtienen los valores adquiridos a través del método llamado *onSensorChanged*, pudiendo tomar las muestras de los ejes X, Y y Z de manera individual a través de un vector dado por el sistema llamado *event*. En relación a la orientación espacial del teléfono, las muestras de aceleración deben ser recolectadas mientras el dispositivo se encuentra en el bolsillo del pantalón. En general, hay dos eventos que pueden afectar la adquisición de datos: el error por desplazamiento y el error por orientación [7]. El error de desplazamiento se desprecia y el error de orientación es tomado en cuenta ya que afecta significativamente las señales en el eje X y Y (Figura 3).

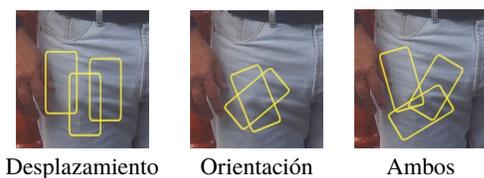


Figura 3: Errores de orientación y desplazamiento.

Se optó por calcular la magnitud total de aceleración, ya que los errores mencionados son mínimos para esta señal [7], de modo que fueron la aceleración en el eje Z y la magnitud total de la aceleración las señales usadas en el estudio. Los valores de aceleración que proporciona el acelerómetro triaxial están afectados por la fuerza de la gravedad, aun cuando el teléfono está en reposo [4]. Las variaciones en la orientación del teléfono generan cambios en las componentes gravitatorias de los ejes que forman al vector aceleración, resultando en la adición de señales de baja frecuencia, que pueden ser removidas usando un filtro paso alto. Se desarrolló una aplicación donde dichas señales se visualizan en tiempo real antes y después del proceso de filtrado (Figura 4). Las frecuencias importantes no superan los 10 Hz en la marcha humana y aproximadamente hasta la 7^{ma} armónica hay contenido significativo de señal, que en promedio para un peatón no superaría los 6 Hz [8].

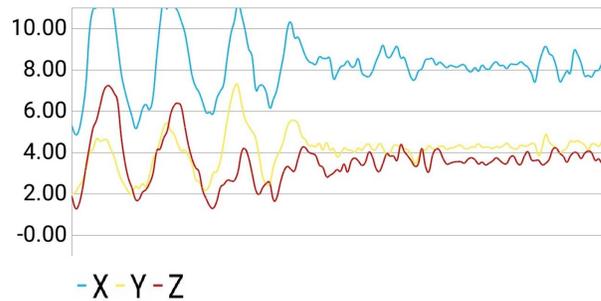


Figura 4: Señales temporales del acelerómetro triaxial, agitando el dispositivo.

En la etapa de pre-procesamiento (Figura 5) se prepara la señal para su caracterización en la autenticación del usuario. Los filtros empleados pertenecen a la librería de código abierto *KalebKE.FSensor* de Android Sensor Filter and Fusion.

La aceleración de gravedad debe ser removida, este procedimiento se considera la calibración del sensor. Esto se logró usando dos clases de la librería *Fsensor* siguiendo la recomendación de *Android Studio*, en la que un filtro pasabajo es aplicado a la señal para aislar la gravedad, valor que luego es sustraído de la señal original. Los datos del



Figura 5: Etapas de pre-procesamiento.

acelerómetro tienen ruido proveniente de varias fuentes (irregularidades en el piso sobre el cual se camina y procesos internos del teléfono) [7]. Dos filtros paso bajo en cascada, empleando la clase *LowPassFilter* fueron configurados para generar un efecto suavizador, eliminando componentes de alta frecuencia. En cuanto al ajuste temporal, la tasa de muestreo en dispositivos móviles celulares no es constante y depende del sistema operativo. Este *jitter* en el intervalo de tiempo entre muestras requiere ser corregido para contar con un conjunto de datos bajo una tasa de muestreo fija, por lo que una interpolación lineal fue empleada. A continuación se realiza una segmentación y extracción de ciclos. Se establece un tiempo finito para el registro del patrón del caminar de una persona, bajo una tasa de muestreo de 50 Hz, ello implica una gran cantidad de procesamiento por lo que se emplea una segmentación para la extracción de características y posterior clasificación [9, 10]. Con más de 20 ciclos es posible obtener una representación general del patrón de una persona. Por tal motivo, se estableció un tiempo de 40 s en cinco grupos de 8 s, en la cual la persona debe caminar. Estos grupos de muestras fueron organizados y almacenados en tablas de una base de datos por usuario. En la Figura 6 se aprecian las señales típicas obtenidas en esa ventana.

Las muestras tomadas en tiempo real se adquieren en ventanas de 6 s. El proceso consiste en recolectar los datos, efectuar el pre-procesamiento y ejecutar la autenticación para obtener una respuesta que permita tomar una decisión sobre quien porta el teléfono, repitiendo nuevamente todo el ciclo. La señal es cuasiperiódica, de manera que puede ser seccionada, y se obtiene cada uno de sus pseudociclos a los cuales le son extraídas características temporales/frecuenciales, para la autenticación (Figura 6). La señal Z presenta un

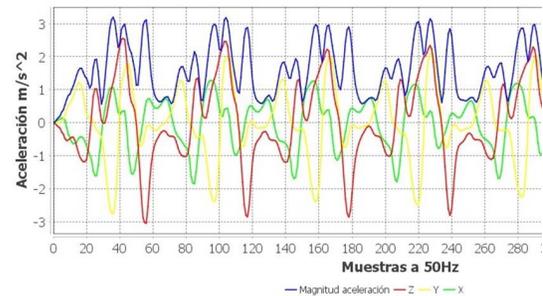


Figura 6: Señales de aceleración muestreadas en una ventana de 8 s, magnitud, X, Y y Z.

pico de aceleración justo cuando se da un paso, evento que permitió desarrollar el algoritmo para la extracción de ciclos. Se elaboró un método “experimental” que consiste en desplazar una ventana con un ancho de 51 muestras desde el inicio hasta el final de la señal muestreada, y en cada desplazamiento verificar si la muestra que se encuentra en el medio de dicha ventana es la que posee mayor amplitud.

Para la extracción de características temporales/frecuenciales es necesario que cada ciclo obtenido posea la misma cantidad de muestras, por consiguiente se debe tomar un valor promedio y emplear algoritmos de interpolación y diezrado para modificar la frecuencia de muestreo. Para la interpolación se usó el método de los polinomios cúbicos de la librería *Commons Math* de Apache. Una vez que se obtiene la señal interpolada, se le extraen las muestras adecuadas para generar un nuevo vector diezrado en un algoritmo diseñado a tal efecto. Esta librería permite hacer el ajuste de curvas a través del cálculo de regresión polinomial. Se implementó un algoritmo que calcula la señal promedio determinando las medias de cada muestra.

Las aplicaciones desarrolladas generan una base de datos por cada usuario que registra un patrón de caminar en tablas individuales. Todos los datos son almacenados en la base de datos correspondiente al generarse el movimiento del individuo. El conjunto de algoritmos y técnicas de procesamiento mencionados fueron programados en dos aplicaciones para Android, que se incorporaron en una aplicación de prueba para la recolección de patrones de locomoción,

en función de la cual se desarrolló el algoritmo de autenticación. Estas aplicaciones registran a distintos usuarios en bases de datos SQLite, y permiten visualizar los patrones de caminar adquiridos (Figura 7).

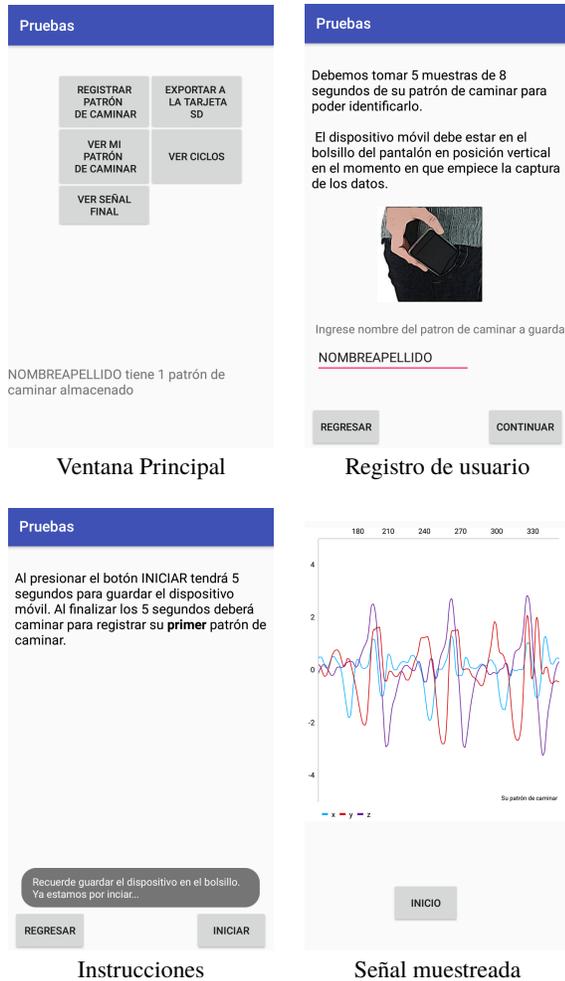


Figura 7: Vistas de la aplicación del módulo de adquisición programado.

En relación a la extracción de parámetros, cada ciclo es procesado y se extraen:

1. Características temporales, que son registradas en una matriz.
2. Vectores de cada uno de los índices de correlación temporal empleados
3. Índices de correlación espectral, empleando la FFT.

Algoritmos como *Sequential Forward Selection* (SFS) y *Sequential Floating Forward Selection* (SFFS) permiten determinar entre un conjunto de

parámetros cuales son más discriminatorios [7, 11, 12]. Se seleccionaron los parámetros temporales para cada ciclo extraído de la señal en el eje Z y la señal de magnitud total, generando un vector con cada uno (Tabla 1). De cada matriz obtenida se calculan dos vectores que contienen el valor medio y la desviación estándar de cada parámetro temporal calculado.

Tabla 1: Parámetros temporales de las señales Z y magnitud de aceleración.

| Parámetros de Z | Parámetros de magnitud |
|------------------------------------|------------------------------------|
| Valor RMS | Valor RMS |
| Energía | Energía |
| Longitud de forma de onda | Longitud de forma de onda |
| Desviación estándar | Desviación estándar |
| Media | Media |
| 3 ^{er} momento (Skeness) | 3 ^{er} momento (Skeness) |
| 4 ^{to} momento (Kurtosis) | 4 ^{to} momento (Kurtosis) |
| Aceleración máx. | Aceleración máx. |
| Aceleración mín. | Cantidad de muestras |
| Pico a pico | – |

El cómputo de la correlación temporal se realiza mediante los índices de correlación de Pearson y Spearman entre cada ciclo con la señal promedio, y el algoritmo desarrollado almacena estos resultados en 4 vectores. Posteriormente se obtiene la media y la desviación de los índices contenidos en cada vector, con un total de 8 valores que sirven para la caracterización de la persona. Se computó el espectro de la señal promedio de cada patrón de caminar mediante la FFT. El cálculo se realiza con los métodos FFT de la librería Commons Math de Apache que aporta el método *FastFourierTransformer*. El espectro de un ciclo del patrón se compara con el de la señal de referencia del promedio usando las mismas técnicas de correlación aplicadas a los parámetros temporales.

En relación a la autenticación del usuario en base a los parámetros extraídos se desarrollaron dos métodos para hacer el proceso de autenticación del portador del móvil. El primer método, denominado *experimental*, se basa en la comparación de los valores estadísticos calculados, y el segundo en aplicar el algoritmo de machine learning, denominado K vecinos más cercanos (K-NN)

[13]. Para las validaciones de los métodos de autenticación se desarrolló una aplicación Java de escritorio llamada *MARCHEMOS*, empleando el IDE Netbeans, que permitió automatizar el análisis de los patrones. Se puede hacer elección de la base de datos a calcular y obtener los valores para una tabla específica, para conjunto de una base de datos o para varias bases de datos de un sujeto (Figura 8).

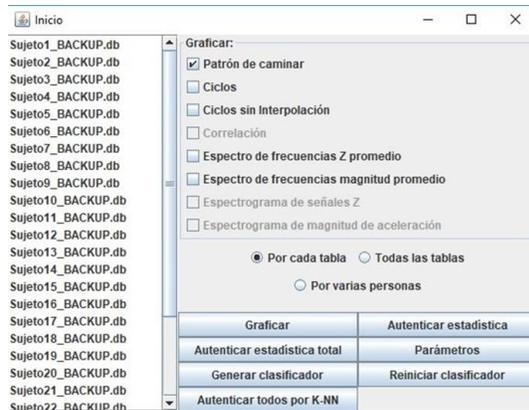


Figura 8: Aplicación *MARCHEMOS* desarrollada para el estudio y análisis de los patrones de locomoción.

Para la validación por el método experimental, con el propósito de comparar los patrones de cada una de las bases de datos obtenidas y constatar que cada persona posee una manera distintiva de caminar, se computó la correlación temporal de todos estos ciclos. Se estableció que la validación de las señales sería a 3 niveles: Correlación temporal, correlación espectral y comparación de parámetros (Figura 9). Para que una señal sea considerada como válida debe superar con éxito los criterios de los 3 niveles, devolviendo un valor de 1 con lo cual el sistema reconoce una autenticación correcta. Si la señal es descartada al no superar alguno de los niveles, se devuelve un valor de 0.



Figura 9: Método de validación experimental.

Alternativamente, se diseñó un método de validación basado en el algoritmo mencionado K-NN actuando como clasificador para llevar a cabo la autenticación del individuo. Un conjunto de bases de datos se usan para generar una matriz de características de referencia de individuos que representan usuarios no auténticos (impostores), mientras que una base de datos específica se emplea para generar una matriz de características que representan al patrón de caminar del usuario a identificar o auténtico. Otro conjunto de bases de datos representan los casos de prueba a los cuales se aplicará el clasificador. Para evitar que características con valores en una escala mayor influyan más que otras en la decisión, todos los valores son normalizados y estandarizados. El algoritmo fue probado usando la herramienta desarrollada *MARCHEMOS* empleando las bases de datos disponibles para formar el conjunto de referencia y prueba. El valor del parámetro k del fue seleccionado experimentalmente.

El objetivo es que las herramientas tengan por lo menos un 80% de efectividad al momento de efectuar el proceso de autenticación, debido a que es un valor estadísticamente aceptable considerando todas las posibles variables que pueden afectar dicho proceso. Por otra parte, se considera que un evento es estadísticamente improbable si su probabilidad de ocurrencia es menor a 5% [14].

Se desarrolló la aplicación final de seguridad con nombre *PasoSeguro*, programada en Java con el IDE Android Studio. Esta app es capaz de hacer la adquisición, autenticación y la toma de decisiones de seguridad en el momento que se detecte que un presunto impostor porta el dispositivo. El usuario debe registrar nombre, e-mail y número de teléfono alternativo para las notificaciones. Después se debe realizar la captura del patrón de caminar para tomarlo como referencia. Cada captura tiene una duración de 10 s en la que el sujeto debe caminar en línea recta (Figura 10).

Las pantallas principales de la app se observan en la Figura 11 y en la Figura 12 (navegación). Se diseñó la app con la capacidad para almacenar los patrones de caminar de dos usuarios diferentes, seleccionando uno de ambos para la autenticación



Posicionamiento del teléfono en el bolsillo

Adquisición de los datos, caminando

Figura 10: Proceso de captura de un patrón de marcha.

en tiempo real. Desde el *inicio* se puede acceder a las configuraciones de autenticación. Un usuario registrado con más de 5 patrones está habilitado para iniciar el proceso de autenticación en tiempo real. Una vez activado el proceso se ejecutan los algoritmos de autenticación desarrollados estableciendo como referencia todos los patrones de caminar disponibles. Este proceso se mantiene en ejecución hasta que el portador decida detenerlo.

Se recolecta una señal de 6 s, extrayendo los ciclos y realizar la autenticación. Si la autenticación se efectúa de manera correcta en un ciclo, el sistema devolverá un valor de 1, caso contrario, devolverá el valor 0. Luego de obtener los valores se vuelve a adquirir otra muestra de 6 s y así sucesivamente. Estos valores son almacenados en un vector que contiene máximo 100 muestras a la vez, eliminando los excedentes bajo un esquema FIFO. El porcentaje de validaciones correctas en el vector es representado gráficamente como se visualiza en la Figura 13.

Si este valor se mantiene por debajo de un umbral, fijado según las pruebas, un contador registrará el tiempo transcurrido hasta que o bien el porcentaje de validaciones sobrepase el valor umbral y se reinicie el contador o se alcance el tiempo de reacción prefijado. Esto último desencadena la respuesta de seguridad programada (Alarma). El proceso de autenticación se resume en la Figura 14.

Como resultado de una autenticación que implique el posible hurto, el sistema de seguridad envía un mensaje de texto y un correo electrónico al número de teléfono y dirección de correo

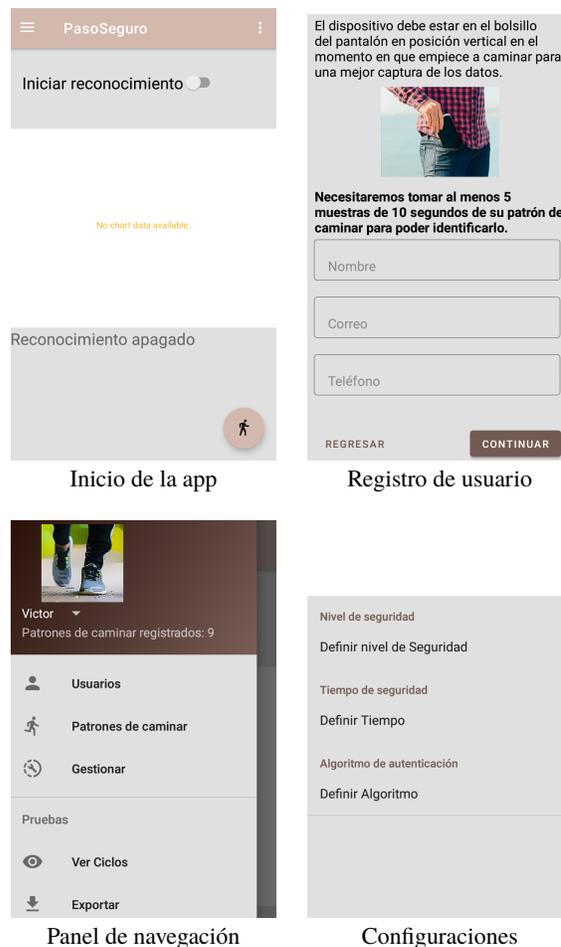


Figura 11: Pantallas principales de la app *PasoSeguro*.

registrado. En el mensaje se notifica el uso no autorizado del dispositivo. El mensaje suministra la ubicación del portador mediante el GPS del teléfono. En la configuración se puede seleccionar uno de los algoritmos de autenticación desarrollados, además de elegir entre tres niveles de seguridad (bajo, medio y alto), lo cual modifica el valor de porcentaje umbral y parámetros de los algoritmos.

3. Análisis y discusión de resultados

En esta sección se analizan y discuten los resultados del empleo de la app con las herramientas desarrolladas en esta investigación, descritas en la sección 2 aplicada sobre varios sujetos de prueba. Los patrones de caminar obtenidos se grafican usando la app *MARCHEMOS*. En la Figura 15 se



Figura 12: Opciones del panel de navegación de la app *PasoSeguro*.

muestran los patrones de caminar de las bases de datos de dos hombres y dos mujeres. Las señales del eje Z inician con un máximo positivo, pico que lo genera la pisada de la pierna donde se encuentra el móvil, seguidamente se observa que la señal cae a un pico negativo y fluctúa de forma característica para cada persona hasta el siguiente paso.

Comparando entre hombres y mujeres, en la caminata de un hombre se generan picos debido a la fuerza que se aplica al momento de la pisada. En contraste, para algunos casos de mujeres, los ciclos presentan diferencias notorias debido a lo suave de la pisada y hay casos donde se generan dos picos de aceleración con magnitudes similares cercanas (Figura 15 2^{do} patrón femenino). La orientación de la pantalla del dispositivo dentro del bolsillo fue un factor importante. La pantalla del móvil se posicionó hacia afuera del pantalón. El efecto de las dos posibles orientaciones del móvil se ilustra



Figura 13: Porcentaje de verificaciones correctas respecto al total por método experimental.

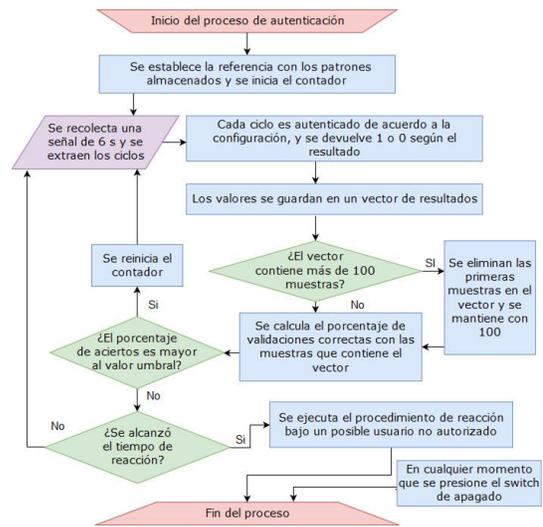


Figura 14: Diagrama de flujo del proceso de autenticación de la aplicación desarrollada.

en la Figura 16. El efecto del cambio es la inversión desplazada de la señal Z.

En otro orden, se observó que el estado anímico de un individuo afecta su biomecánica. Si una persona está nerviosa, tiende a apresurar el paso; por el contrario, cuando la persona se encuentra triste o cansada las zancadas se tornan más lentas e irregulares (Figura 17).

En relación al efecto del calzado y del terreno, se observó que un zapato alto (bota) repercute en la amortiguación de la zancada y por ende en la forma de onda. Para el caso de las mujeres fue evidente

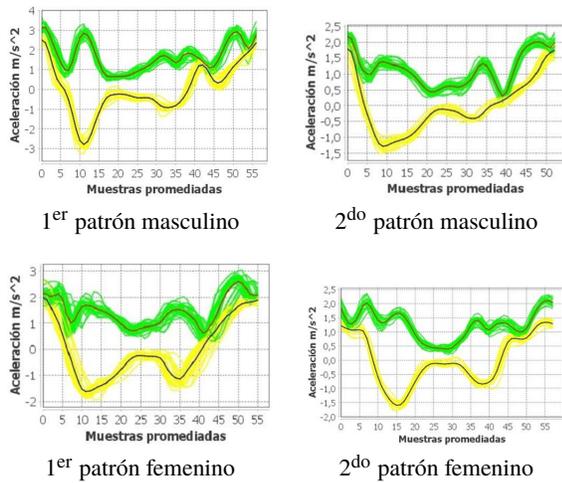


Figura 15: Patrones de caminar de señales Z y de magnitud.

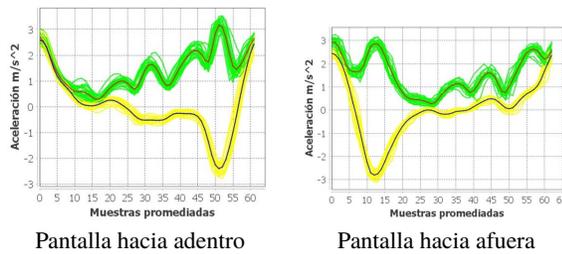


Figura 16: Efecto de la orientación del teléfono respecto al eje Z en la adquisición de datos.

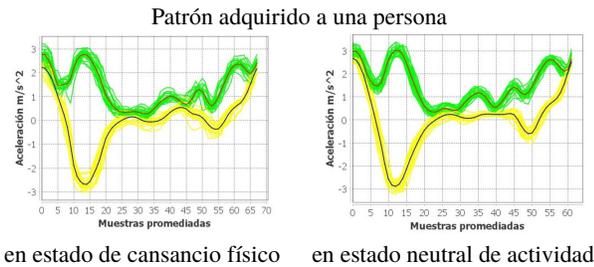


Figura 17: Efecto del estado físico de la persona en la adquisición de datos.

que el uso de tacones modifica su forma de caminar. De igual manera el terreno influyó al momento de la captura de datos. Si la superficie es irregular se agrega ruido al patrón de la persona (Figura 18).

En la Figura 19 se exhiben dos patrones femeninos, de mujeres de 24 y 16 años de edad, con 1,69 y 1,60 m de altura respectivamente. Existe cierta similitud en sus señales promedio, aunque es apreciable que no son iguales. Es notable el parecido en el promedio de Z. Se observó que, en

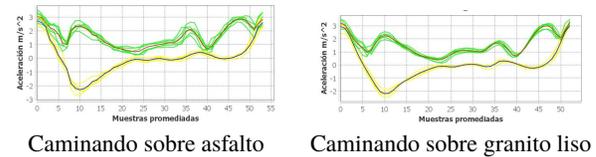


Figura 18: Efecto del terreno en la adquisición de datos de la misma persona.

general, en el patrón de una persona tomado en un momento determinado la señal en Z presenta menos dispersión que la de magnitud, como se ve en las dos señales de la Figura 19.

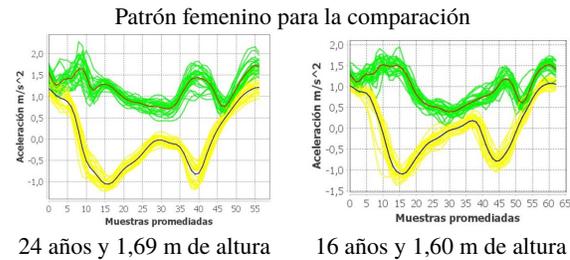


Figura 19: Similitud de dos patrones femeninos para la comparación de la señal Z y magnitud de aceleración.

Sin embargo, la señal de magnitud es más característica para una persona en particular, y más discriminadora. Con respecto a la comparación entre bases de datos de un mismo sujeto, un individuo puede tener variaciones en su patrón en diferentes espacios temporales y situacionales, por lo que a algunos sujetos se les recolectó más de una base de datos. En algunos casos los valores de los ciclos extraídos distan de forma considerable entre bases de un solo individuo, como los que se muestra en la Figura 20, que fueron adquiridos de un sujeto de pruebas A. Aunque tienen un alto grado de similitud (ya que provienen de la misma persona), es evidente que presentan diferencias entre las señales Z.

En el dominio frecuencial se observan las diferencias entre los armónicos de cada señal promedio, resaltando la desigualdad de los tamaños de la componente continua de magnitud de aceleración (Figura 21). Esto puede ocurrir debido a factores como una pisada más fuerte, un calzado que presente menos amortiguación, el estado de ánimo de la persona o una forma de caminar

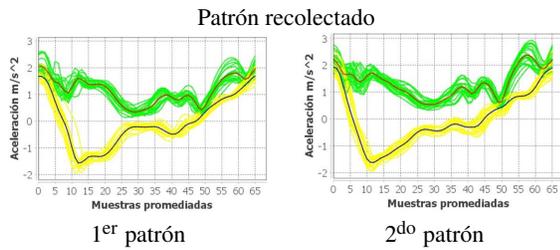


Figura 20: Comparación de dos patrones recolectados de un sujeto A en momentos diferentes.

anómala que presente diferencias marcadas entre un ciclo y otro (marcha festinante o la marcha espástica [15]).

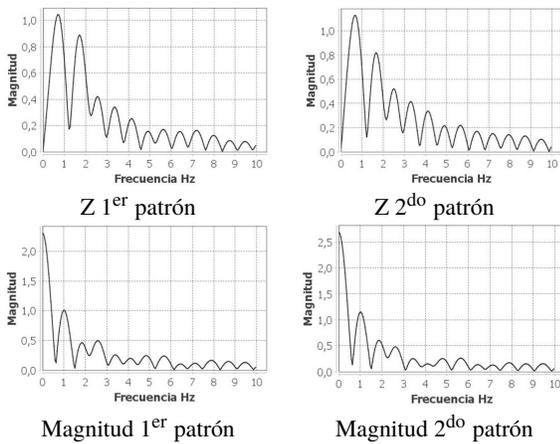


Figura 21: Espectros de las señales promedio de aceleración Z y de magnitud del sujeto A.

Por el contrario, hubo personas que mantuvieron su patrón más constante dentro de las bases obtenidas ya que entre una recolección y otra sus patrones no discreparon considerablemente. Un ejemplo es el caso de un sujeto de pruebas B que posee dos bases de datos (Figura 22). En cuanto al criterio de correlación espectral, se computa la FFT y los índices de correlación espectral. Se determinó que para los ciclos de una misma persona, el índice de Pearson de magnitud es mayor a 0,989, mientras que los tres restantes (Pearson Z, Spearman Z y magnitud) fluctúan más. Por ello, para emplear la correlación espectral como medida discriminatoria sólo se usó el índice Pearson de magnitud. Si éste es mayor a 0,989, la señal bajo estudio pasa a la última etapa de la autenticación, caso contrario es descartada.

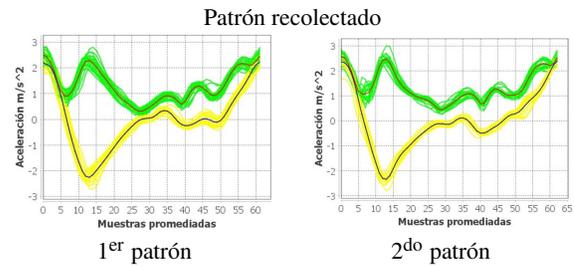


Figura 22: Comparación de dos patrones recolectados de un sujeto de pruebas B en momentos diferentes.

En la última etapa de la validación se comparan los parámetros temporales del ciclo de prueba y las referencias. Esto se realiza a través de un sistema de puntajes, donde la señal de prueba acumula puntos por cada parámetro que coincida con los de referencia, con un valor inicial de 0 puntos y según lo siguiente: Si un parámetro cae dentro del rango de la media más o menos tres desviaciones estándar, al acumulado se le suman 0,2 puntos, si el rango es de más o menos dos desviaciones se le suman 0,8 puntos y si el rango es de más o menos una desviación, se le suma 1 punto. Al comparar los primeros 4 parámetros de ambas señales: Valor RMS, energía, longitud y desviación estándar, estos se multiplican por 1,5 para darles más peso, ya que se consideran más discriminatorios [11]. El máximo acumulado posible es 26 puntos. Para que un ciclo sea válido debe acumular al menos 15,4 puntos, valor establecido por experimentación, como un balance entre la cantidad de falsos positivos y verdaderos negativos. Si la señal pasa estas tres etapas, se autentican el portador de manera correcta (dueño).

En relación a los resultados de la autenticación por el método experimental, a través del uso de la herramienta *MARCHEMOS*, se comprobó la eficacia del método, obteniendo resultados de cada nivel de seguridad al comparar cada base de datos de los sujetos de prueba con todas las demás, determinando los porcentajes de los ciclos autenticados correctamente y de los falsos positivos. Usando *MARCHEMOS* (Figura 23) se obtienen los resultados de autenticación: Seleccionando un sujeto de la lista y pulsando el botón *Autenticar estadística*, se autentica la base

de datos de del individuo contra todas las demás y sus propios valores, dando como resultado el porcentaje de ciclos autenticados correctamente y de falsos positivos para cada una de las etapas del método (Figura 24).

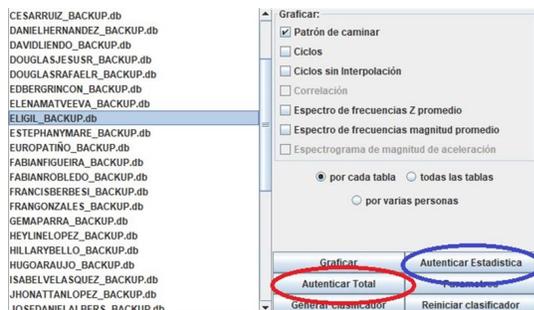


Figura 23: Aplicación MARCHEMOS para la autenticación por el método experimental.

| |
|---|
| Comparaciones Totales: 1854 , Mismo sujeto: 47 , Con otros sujetos: 1807 Verificaciones del mismo sujeto: Por Correlación Temporal: 44 , Porcentaje: 93,62% Por Correlación Temporal y Espectral: 42 , Porcentaje: 89,36% Verificaciones Totales: 42 , Porcentaje: 89,36% Falsos positivos en las verificaciones con otros sujetos: Por Correlación Temporal : 130 , Porcentaje: 7,19% Por Correlación Temporal y Espectral: 60 , Porcentaje: 3,32% Falsos positivos totales : 16 , Porcentaje: 0,89% |
|---|

Figura 24: Resultados obtenidos de la autenticación de la base de datos de una sola persona.

Las validaciones correctas (verdaderos positivos) se calculan en base a la comparación de la referencia de una persona contra todos los ciclos de ese mismo sujeto, y cuando los resultados no son exitosos se les denota como falsos negativos: Ciclos correctos que no superan la validación y se catalogan por error como un presunto impostor. Los falsos positivos, por el contrario, se obtienen de la comparación entre una base específica contra todas las demás, por lo que este parámetro representa la cantidad de sujetos impostores que pueden ser autenticados erróneamente como verdaderos. El botón *Autenticar estadística total*, computa la autenticación entre todas las bases (Figura 25).

En la Figura 26 se ven los patrones de dos sujetos C y D con respecto a una y dos bases de datos. C mantiene la simetría entre los diferentes ciclos por lo que no hay cambios considerables en el patrón, pero D presenta ciclos con más dispersión. En la Tabla 2 para C y D se muestra el proceso

| |
|---|
| Número total de comparaciones de un mismo sujeto: 1854 Pasaron la primera fase: 1706 , segunda: 1687 , tercera: 1642 Número total de comparaciones sujeto impostor: 87138 Pasaron la primera fase: 4964 , segunda: 3407 , tercera: 1306 Sujetos de prueba: 48, Bases totales comparadas: 78 Desviación de las verificaciones: 9,97 Media: 88,18 Desviación de los falsos positivos: 1,78 Media: 1,50 Porcentaje promedio de verificaciones por Correlación Temporal: 91,29% Porcentaje promedio de Verificaciones por Correlación Temporal y Espectral: 90,22% Porcentaje promedio de Verificaciones Totales: 89,18% Porcentaje promedio de Falsos positivos por Correlación Temporal : 5,69% Porcentaje promedio de Falsos positivos por Correlación Temporal y Espectral: 3,90% Porcentaje promedio de Falsos positivos totales : 1,50% |
|---|

Figura 25: Resultados obtenidos de la autenticación de todas las bases.

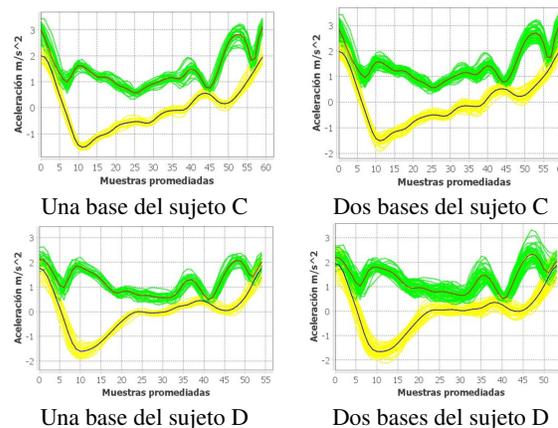


Figura 26: Comparación entre los patrones recolectados de una y dos bases de datos, para los sujetos C y D.

Tabla 2: Porcentajes de la autenticación de los sujetos C y D, cuando se tienen una y dos bases de datos de referencia.

| Número de bases de referencia | Sujeto | Validaciones correctas % | Falsos positivos % |
|-------------------------------|--------|--------------------------|--------------------|
| 1 | C | 89,36 | 1,09 |
| 2 | C | 97,87 | 1,15 |
| 1 | D | 59,27 | 0,92 |
| 2 | D | 78,72 | 3,05 |

de autenticación, fijando como referencia los datos extraídos de una y dos de sus bases por separado.

Las estadísticas de C sugieren que una sola base de referencia es capaz de obtener resultados adecuados. Se consideró también a un sujeto E al que se le extrajeron 8 bases de datos de locomoción. Se extrajo el patrón de la combinación de las 8 bases (Figura 27, con autenticación según la Figura 28).

Aún si los criterios se hacen respecto a 8 bases, la ocurrencia de falsos positivos se mantiene baja. En la Tabla 3 se muestran los resultados de la

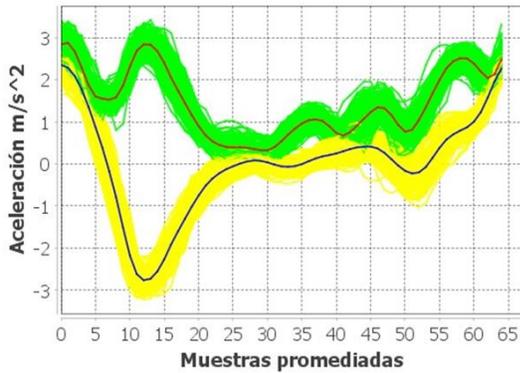


Figura 27: Patrón resultante del procesamiento de 8 bases de datos distintas de un solo individuo (sujeto E).

| |
|---|
| Comparaciones Totales: 1854 , Mismo sujeto: 169 , Con otros sujetos: 1685 Verificaciones del mismo sujeto: Por Correlación Temporal: 167 , Porcentaje: 98,82% Por Correlación Temporal y Espectral: 166 , Porcentaje: 98,22% Verificaciones Totales: 162 , Porcentaje: 95,86% Falsos positivos en las verificaciones con otros sujetos: Por Correlación Temporal : 50 , Porcentaje: 2,97% Por Correlación Temporal y Espectral: 24 , Porcentaje: 1,42% Falsos positivos totales : 6 , Porcentaje: 0,36% |
|---|

Figura 28: Resultado de la autenticación del patrón proveniente de 8 bases distintas de un solo individuo.

autenticación cuando se usan una, dos y tres bases para generar los criterios. Se realizó además la autenticación total de 48 sujetos (todos contra todos), incluyendo las bases extra. Se elaboraron los histogramas obtenidos para cada uno de los 48 sujetos, con el fin de conocer el tipo de distribución que presentan los resultados (Tabla 4).

Tabla 3: Porcentajes de la autenticación del sujeto E cuando se usan una, dos y tres bases distintas como referencia.

| Número de bases de referencia | Validaciones correctas % | Falsos positivos % |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------|
| 1 | 55,62 | 0,12 |
| 2 | 68,05 | 0,25 |
| 3 | 92,90 | 0,50 |

En relación al estudio estadístico realizado cuando se aplica el método experimental de autenticación de un usuario, se empleó el método de prueba de hipótesis. Se usó la distribución t-student con prueba de dos colas, típico de

Tabla 4: Diferentes métodos de autenticación según una o varias bases de datos.

| Método de autenticación | Criterio | Validaciones correctas % | Falsos positivos % |
|--|-------------------------------|--------------------------|--------------------|
| Comparando el uso de criterios de decisión para una y múltiples bases de un sujeto | Una base de referencia | 76,90 | 1,04 |
| | Múltiples bases de referencia | 88,18 | 1,50 |
| Una sola base de datos como referencia | Correlación temporal | 84,40 | 4,37 |
| | Correlación espectral | 88,89 | 9,00 |
| | Parámetros temporales | 86,51 | 9,05 |
| Todas las bases disponibles por sujeto como referencia | Correlación temporal | 91,29 | 5,69 |
| | Correlación espectral | 94,49 | 10,71 |
| | Parámetros temporales | 96,36 | 12,38 |

estas pruebas [14]. En este sentido los resultados de la autenticación del usuario por el método experimental fueron:

- Se tiene una confianza del 95 % de que el valor medio de efectividad del método experimental se encuentra entre 85,28 % y 91,08 %.
- Se tiene una confianza del 95 % de que el error medio del método experimental para autenticar falsos positivos se encuentra entre 0,98 % y 2,02 %.
- Se rechaza la hipótesis nula para los experimentos de la comparación entre los datos de un mismo sujeto, ya que los resultados sustentan la aseveración: el porcentaje de eficacia del método experimental para autenticar a una persona correctamente es de al menos un 80 %.
- Se rechaza la hipótesis nula para los experimentos de la comparación entre un sujeto y todos los demás, ya que los resultados sustentan la aseveración: el porcentaje de autenticación para un presunto sujeto impostor con el método experimental es a lo sumo 5 %.

A continuación se describen los resultados de autenticación empleando el método alternativo del algoritmo K-NN, programado en *MARCHEMOS*, con las bases de datos recolectadas como sujetos de prueba. La herramienta computa falsos positivos, verdaderos negativos, falsos negativos y verdaderos positivos, empleados en las pruebas estadísticas. Ofrece la capacidad de efectuar la autenticación de algún usuario seleccionado de la lista contra los restantes, arrojando resultados parciales referentes al sujeto elegido, que será etiquetado como auténtico mientras que el resto como impostores. Luego de generado el modelo, el botón *Generar clasificador* cambia de nombre a *Autenticar sujeto* para que se efectúe la validación con el resto de bases de datos del listado, ciclo a ciclo. La opción *Autenticar todos por K-NN* consta de una autenticación al estilo “todos contra todos”, en la que cada base de datos por separado de un sujeto de una lista de 70 bases sirve como auténtico y es comparado contra otra lista, conformada por los sujetos de la primera. Los resultados de esta opción (Figura 29), son los empleados en la posterior prueba estadística.

```

Comparaciones entre bases de un mismo sujeto: 39
Bases totales comparadas: 70
Porcentaje promedio de falsos positivos: 6,57%
Desviación de falsos positivos: 3,67
Porcentaje promedio de falsos negativos: 27,65%
Porcentaje promedio de verdaderos positivos: 72,35%
Desviación de verdaderos positivos: 17,89
Porcentaje promedio de verdaderos negativos: 93,43%
    
```

Figura 29: Resultados de la autenticación total por el método K-NN.

El algoritmo determina los K vecinos más cercanos y cataloga cada uno entre auténtico o impostor. Cada vecino que contribuye al contador de auténticos o de impostores genera un voto que es pesado por el inverso de la distancia. Esto asegura que vecinos más cercanos influyen más en la decisión final. La elección de emplear votos pesados para la toma de decisión del clasificador surge en función de la distribución de los parámetros temporales que son extraídos en las matrices de referencia. En la Figura 30 se observa una gráfica de dispersión de 2 de los 9 parámetros temporales. En color verde se ilustran los puntos de cada ciclo de la matriz referencial del sujeto

auténtico mientras que en color rojo se muestran los puntos de cada ciclo de la matriz referencial de impostores.

Debido a la dispersión que presentan los puntos de un impostor se decidió que, para asumir un ciclo de caminar como auténtico, no solo basta con la sumatoria de votos, sino que esta debe ser superior a un valor umbral (denominado T_{knn}). Este valor umbral es seleccionado en función del valor del parámetro K .

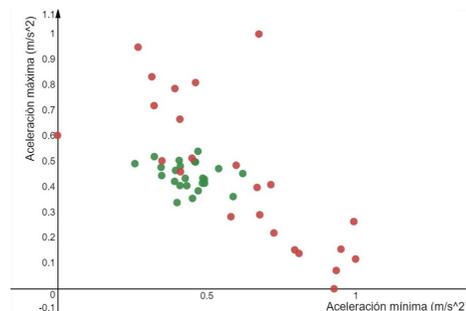


Figura 30: Diagrama de dispersión de la aceleración mínima versus aceleración máxima.

Se realizó el experimento para distintos valores de K y valores umbrales para determinar cuáles generaban los mejores resultados. Se observó que $K = 3$ presenta el mayor porcentaje de verdaderos positivos. Entre $K = 5$ y $K = 9$ ambos porcentajes se mantienen aproximadamente constantes, con el menor porcentaje de falsos positivos en $K = 9$. El valor de K a seleccionar debe ofrecer un bajo porcentaje de falsos positivos (dificultad para el rechazo de impostores) pero con un considerable porcentaje de verdaderos positivos. El valor de $K = 7$ presenta dichas condiciones, con el segundo menor porcentaje de falsos positivos (6,57%) y un 72,35% de verdaderos positivos. Estos porcentajes para un valor de $K = 7$ fueron logrados especificando un $T_{knn} = 8$. En cuanto a la capacidad de rechazo que ofrece el valor umbral resultó que para un valor de $T_{knn} = 8$ gran parte de los votos como auténticos para un usuario impostor se ubican por debajo del umbral, contrario a los votos de un usuario realmente auténtico, siendo así catalogado como impostor. En relación al estudio estadístico efectuado cuando se aplica el método K-NN de autenticación de un usuario, análogo en metodología al que se usó en el

método experimental, los resultados de la prueba de hipótesis aplicada a la autenticación K-NN del usuario por el método experimental son:

- Se tiene una confianza del 95 % de que el valor medio de efectividad de la autenticación por K-NN se encuentra entre 66,56 % y 78,14 %.
- Se tiene una confianza del 95 % de que el valor medio de error por K-NN para autenticar falsos positivos se encuentra entre 5,69 % y 7,45 %.
- Los estadísticos de prueba obtenidos no entran dentro de los rangos porcentuales que se establecieron previamente para medir la efectividad del método.

Una vez programados en el app *PasoSeguro* los algoritmos de autenticación (método experimental y K-NN) se realizaron pruebas sobre ese sistema. Para las pruebas previas se usaron 4 modelos de teléfonos inteligentes: Google phone Nexus 5, Doogee Xpro 5, Alcatel Cameox y Samsung Galaxy J3 Luna Pro, resultando éste último el seleccionado para probar el desempeño de la autenticación. Primero se evaluaron las validaciones correctas (verdaderos positivos). Para este fin, dos sujetos X y Y adquirieron 10 muestras de 10 s. Se realizó el experimento en dos escenarios, uno en piso de granito liso y otro en acera de calle. Se realizaron 3 pruebas para cada escenario y usuario. En la Figura 31 se muestran dos de los resultados obtenidos del sujeto X directamente de la aplicación y en la Tabla 5 se presentan los resultados logrados para cada escenario en ambos usuarios. Se observó que la autenticación K-NN presenta valores más altos que los obtenidos por el método experimental. Esto se debe a la gran cantidad de puntos que se utilizan en la comparación K-NN, con una referencia variada, aumentando la posibilidad de autenticación. Los valores obtenidos mejoran cuando el terreno es regular. Seguidamente, se presentan los resultados para 4 sujetos R1, R2, R3 y R4, realizándose la autenticación con las referencias de los sujetos X y Y, con dos pruebas por persona.

En la Figura 32 se muestran los resultados obtenidos para R1 y R2, usando como referencia

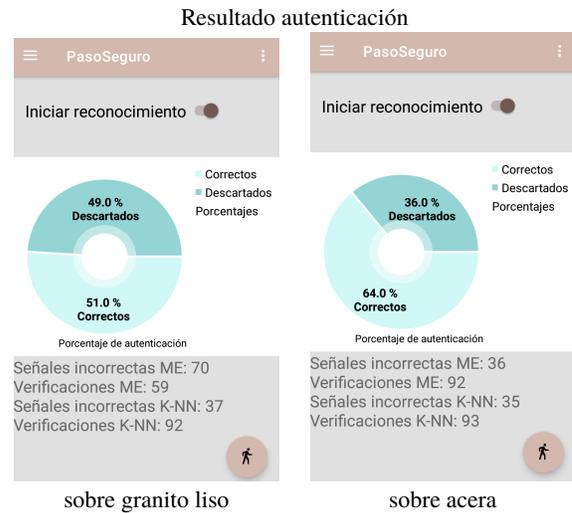


Figura 31: Resultados de la autenticación de la app *PasoSeguro* para el usuario X en dos terrenos diferentes.

Tabla 5: Resultados de las pruebas de verificación de la app *PasoSeguro*.

| Usuario | Tipo de terreno | Prueba | Método experimental % | Método K-NN % |
|---------|-----------------|--------|-----------------------|---------------|
| X | Granito liso | 1 | 71,88 | 72,56 |
| X | Granito liso | 2 | 76,34 | 75,28 |
| X | Granito liso | 3 | 66,86 | 69,22 |
| X | Acera de calle | 1 | 45,74 | 71,32 |
| X | Acera de calle | 2 | 51,23 | 71,08 |
| X | Acera de calle | 3 | 40,54 | 66,34 |
| Y | Granito liso | 1 | 76,83 | 77,69 |
| Y | Granito liso | 2 | 70,34 | 73,27 |
| Y | Granito liso | 3 | 74,86 | 80,06 |
| Y | Acera de calle | 1 | 48,73 | 72,54 |
| Y | Acera de calle | 2 | 55,65 | 74,27 |
| Y | Acera de calle | 3 | 52,35 | 68,43 |

los patrones de X, en escenarios distintos. En la Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos en el primer escenario con los 4 usuarios y en la Tabla 7 se muestran los de los cuatro sujetos en el segundo escenario. Los resultados del método experimental son más discriminatorios que los de K-NN, debido

a que es más probable que dos personas tengan valores similares en sus parámetros temporales a que las formas de onda de los patrones tengan un alto grado de correlación. Por ello la cantidad de falsos positivos del método experimental es mucho menor que la del K-NN.

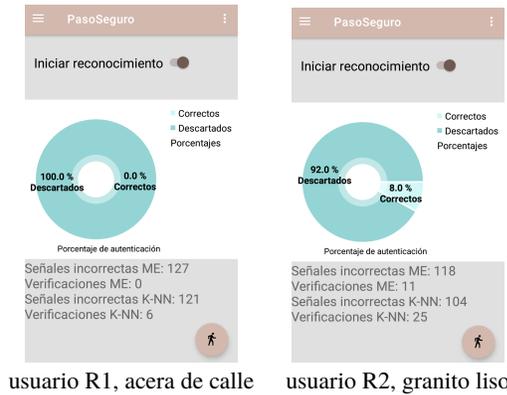


Figura 32: Resultados de la autenticación de la app *PasoSeguro*, para R1 y R2 en prueba de la capacidad de rechazo, empleando la referencia del patrón de un sujeto X.

Tabla 6: Resultados de las pruebas respecto a la capacidad de rechazo de la app *PasoSeguro*, usando la referencia de dos sujetos X y Y, en el primer escenario (piso de granito liso).

| Usuario | Prueba | Sujeto de referencia | Método experimental % | Método K-NN % |
|---------|--------|----------------------|-----------------------|---------------|
| R1 | 1 | X | 8,53 | 19,38 |
| R1 | 2 | X | 9,76 | 24,26 |
| R1 | 1 | Y | 0,00 | 1,56 |
| R1 | 2 | Y | 0,00 | 0,00 |
| R2 | 1 | X | 1,49 | 4,72 |
| R2 | 2 | X | 0,00 | 3,27 |
| R2 | 1 | Y | 3,58 | 12,24 |
| R2 | 2 | Y | 2,83 | 7,56 |
| R3 | 1 | X | 0,00 | 2,73 |
| R3 | 2 | X | 0,43 | 1,67 |
| R3 | 1 | Y | 2,30 | 4,37 |
| R3 | 2 | Y | 1,56 | 5,71 |
| R4 | 1 | X | 0,00 | 3,65 |
| R4 | 2 | X | 0,00 | 0,78 |
| R4 | 1 | Y | 4,58 | 17,52 |
| R4 | 2 | Y | 4,97 | 16,85 |

El algoritmo K-NN, aunque presenta una probabilidad de error mayor, aún puede ser empleado si tiene valores umbrales más altos.

Tabla 7: Resultados de las pruebas respecto a la capacidad de rechazo de la app *PasoSeguro*, usando la referencia de dos sujetos X y Y, en el segundo escenario (acera de calle).

| Usuario | Prueba | Sujeto de referencia | Método experimental % | Método K-NN % |
|---------|--------|----------------------|-----------------------|---------------|
| R1 | 1 | X | 3,61 | 17,43 |
| R1 | 2 | X | 2,58 | 20,56 |
| R1 | 1 | Y | 0,00 | 3,50 |
| R1 | 2 | Y | 0,00 | 0,00 |
| R2 | 1 | X | 0,00 | 3,40 |
| R2 | 2 | X | 0,00 | 4,72 |
| R2 | 1 | Y | 1,49 | 10,30 |
| R2 | 2 | Y | 0,80 | 6,73 |
| R3 | 1 | X | 0,00 | 1,53 |
| R3 | 2 | X | 0,00 | 0,00 |
| R3 | 1 | Y | 0,00 | 3,95 |
| R3 | 2 | Y | 0,00 | 2,43 |
| R4 | 1 | X | 0,00 | 0,00 |
| R4 | 2 | X | 0,00 | 2,79 |
| R4 | 1 | Y | 2,60 | 20,43 |
| R4 | 2 | Y | 4,54 | 18,60 |

Los niveles umbrales se fijaron con los valores presentes en la Tabla 8. La autenticación por K-NN se muestra como la más indicada para estas situaciones.

Tabla 8: Valores umbrales para los distintos niveles de seguridad en ambos métodos de autenticación desarrollados.

| Nivel de seguridad | Método experimental (%) | K-NN (%) |
|--------------------|-------------------------|----------|
| Bajo | 20 | 30 |
| Medio | 30 | 45 |
| Alto | 40 | 60 |

En lo relativo a la reacción de seguridad posterior a la autenticación, la app genera una respuesta en función del nivel de seguridad (Tabla 8). Al finalizar el tiempo de seguridad y de no cumplirse el requerimiento de nivel umbral es enviado un e-mail de advertencia la dirección preestablecida, notificando de un presunto caso de hurto debido a que el portador del dispositivo no ha podido ser identificado, enviando las coordenadas geográficas capturadas por el GPS del móvil. El correo electrónico ofrece un enlace

a través del botón *Ubicar* en Google Maps y se ubica un puntero en la posición geográfica dada por las coordenadas obtenidas del GPS. Simultáneamente se envía un SMS al número de teléfono preestablecido, con información similar. Se evaluó el rendimiento computacional de la app final mediante la herramienta de software *Android Profiler*, en términos de ocupación de RAM, consumo de CPU y consumo de datos de red. Para esto se utilizó un teléfono Samsung Galaxy J3 Luna Pro de 1,5 GB de RAM y procesador de 1,4 GHz. Sin dar inicio a ningún proceso de registro o de autenticación la app llega a ocupar entre 40 y 60 MB de RAM, la cual no llega a representar un 10 %. El uso del CPU es constante en torno al 17 %, durante el lapso de tiempo que toma ingresar los datos de un usuario hasta que finaliza el registro del patrón. La RAM ocupada asciende hasta unos 79 MB para luego disminuir. Se midió el consumo de recursos también durante la autenticación. En esta etapa para el método experimental el consumo de CPU es mínimo durante el lapso que dura el proceso, presentando picos que no sobrepasan un 10 % de consumo en cada nueva recolección de datos. La ocupación de RAM se mantuvo relativamente constante en 45 MB. Para el caso del uso del algoritmo K-NN, los resultados fueron similares.

4. Conclusiones

En relación al desarrollo del módulo de adquisición de datos se determinó que el mismo requirió no sólo de etapas de filtrado de ruido, sino también de la aplicación adicional de diezmado e interpolación para el ajuste del tamaño de las muestras. En cuanto a la construcción de una base de datos de patrones de locomoción de distintos sujetos, resultó conveniente seleccionar el motor de bases de datos SQLite de Android, por ser una opción que presentó flexibilidad durante la ejecución de las pruebas de almacenamiento y edición de datos. Parámetros temporales y estadísticos se pueden extraer de las señales de locomoción y cuáles resultaron ser los más discriminatorios para su empleo en la autenticación. Esto derivó en el desarrollo de dos métodos de reconocimiento:

el método experimental y el algoritmo K-NN. La app programada fue capaz de adquirir y almacenar los datos del patrón de locomoción de un usuario y establecerlos como referencia para la autenticación en tiempo real, empleando los dos métodos desarrollados en el ambiente de software creado.

En relación al estudio estadístico realizado para estimar la confiabilidad se observó que el método experimental es más discriminatorio y presenta probabilidades de autenticar erróneamente a un usuario no autorizado menores a 5 %. El algoritmo K-NN mostró flexibilidad y capacidad de autenticación de verdaderos positivos, a costo del aumento del margen de error por falsos positivos. Se determinó la conveniencia de adquirir una variada cantidad de patrones de locomoción de un mismo individuo, para mejorar la efectividad de la autenticación. La evaluación de los distintos patrones de locomoción de sujetos de la base de datos permitió observar que los mismos se ven afectados por factores externos tales como el tipo de terreno o de calzado. A medida que estos factores no presenten una gran variación entre el momento en que se tomó el patrón de referencia del individuo y cuando se realizó el proceso de autenticación, los resultados obtenidos por la aplicación serán más precisos.

El desarrollo de los métodos de autenticación permitió observar que, a pesar de que los factores externos afectan los valores de las muestras, la forma de onda del patrón de locomoción generalmente conserva la distribución relativa entre muestras pudiendo aseverar que la correlación empleada como método de comparación entre señales es un criterio más robusto que el uso de los parámetros temporales. El estudio del espectro de los patrones de los sujetos de prueba dio paso al uso de los índices de correlación como una herramienta para ser implementada en la comparación de señales a nivel frecuencial. De los resultados de este tipo de correlación se puede afirmar que la marcha humana también presenta características con capacidades discriminatorias entre distintos patrones.

El protocolo de reacción incluyó los mensajes que alertan sobre un posible porte no autorizado del teléfono móvil permitiendo el conocimiento de

la ubicación geográfica aproximada del dispositivo vía GPS. Esta cualidad concede la posibilidad de recuperar el teléfono en un evento de pérdida.

En relación al desempeño computacional, la app requiere de una RAM mayor a 90 MB. Es conveniente un teléfono celular de gama media o alta con un mínimo de 1 GB de RAM para que la aplicación no afecte perjudicialmente el rendimiento del dispositivo. Para finalizar, puede señalarse que los casos de error en la autenticación son poco probables (menores a 5% para autenticación por método experimental), determinándose que la autenticación a través de señales de locomoción es lo suficientemente distintiva y asertiva en cada sujeto, en la medida adecuada para justificar su empleo bajo los escenarios expuestos, otorgando viabilidad al prototipo de app objeto del estudio.

Reconocimiento

El presente Trabajo Especial de Grado fue reconocido con Mención Honorífica por la Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo (Venezuela), quien declaró que los motivos para ello se deben al enfoque transdisciplinario aplicado al haber integrado en forma coherente e innovadora diversas áreas del conocimiento, que incluyeron la biomecánica, el procesamiento de señales, las técnicas de machine learning y la teoría de decisiones.

5. Referencias

- [1] N. Boulgouris, D. Hatzinakos, and K. Plataniotis. Gait recognition: a challenging signal processing technology for biometric identification. *IEEE Signal Processing Magazine*, 22(6):78–90, Nov 2005.
- [2] A. Kale, A. Roychowdhury, and R. Chellappa. Fusion of gait and face for human identification. In *2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, volume 5, pages V–901, May 2004.
- [3] A. Kale, A. Sundaresan, A. Rajagopalan, N. Cuntoor, A. Roy-Chowdhury, V. Kruger, and R. Chellappa. Identification of humans using gait. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(9):1163–1173, Sep. 2004.
- [4] A. Bayat, M. Pomplun, and D. Tran. A study on human activity recognition using accelerometer data from smartphones. *Procedia Computer Science*, 34:450–457, 2014.
- [5] L. Cedeño, M. Fagúndez, R. Briceño-León, A. Camardiel, A. Chacón, M. Capriles, M. Tarre, J. Mayorca, C. Marín, A. Rebolledo, F. Esquerre, y P. Rondón. 1^{er} Informe del observatorio de delito organizado en Venezuela. Visibilizando lo que hay detrás de la criminalidad. Venezuela, 2015.
- [6] N. Clarke and S. Furnell. Authentication of users on mobile telephones—a survey of attitudes and practices. *Computers & Security*, 7(24):519–527, 2005.
- [7] T. Hoang, D. Choi, V. Vo, A. Nguyen, and T. Nguyen. A lightweight gait authentication on mobile phone regardless of installation error. In L. Janczewski, H. Wolfe, and S. Sheno, editors, *Security and Privacy Protection in Information Processing Systems*, pages 83–101, Berlin, Heidelberg, 2013. Springer Berlin Heidelberg.
- [8] D. Winter. *Biomechanics and motor control of human movement*. John Wiley & Sons, 4^a edition, 2009.
- [9] G. Bajrami. Activity identification for gait recognition using mobile devices. Master’s Thesis, Department of Computer Science and Media Technology, Gjøvik University College, 2011.
- [10] M. Ehatisham-ul-Haq, M. Azam, J. Loo, K. Shuang, S. Islam, U. Naeem, and Y. Amin. Authentication of smartphone users based on activity recognition and mobile sensing. *Sensors*, 17(9):1–31, 2017.
- [11] H. Thang, V. Viet, N. Dinh, and D. Choi. Gait identification using accelerometer on mobile phone. In *2012 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS)*, pages 344–348, Nov 2012.
- [12] J. Kwapisz, G. Weiss, and S. Moore. Activity recognition using cell phone accelerometers. *ACM SigKDD Explorations Newsletter*, 12(2):74–82, 2011.
- [13] S. Imandoust and M. Bolandraftar. Application of k-nearest neighbor (knn) approach for predicting economic events: Theoretical background. *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, 3(5):605–610, 2013.
- [14] M. Triola. *Estadística*. Pearson Educación, 10^{ma} edition, 2004.
- [15] A. Jain and A. Ross. Introduction to biometrics. In A. Jain, R. Bolle, and S. Pankanti, editors, *Biometrics: Personal Identification in Networked Society*, pages 1–42. Springer, 2008.

Effect of geometric specifications of ogee spillway on the volume variation of concrete consumption using genetic algorithm

Milad Kheiry Ghojeh-biglou^{*,a}, Alireza Pilpayeh^b

^a *M.Sc. Civil Engineering of water and Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, Parsabad Moghan Branch, Islamic Azad University, Parsabad, Iran*

^b *Department of Civil Engineering, Parsabad Moghan Branch, Islamic Azad University, Parsabad, Iran*

Abstract.- Nature is a great inspirational source of complex and interesting phenomena that can be used to solve current problems. Genetic algorithm is one of the nature-inspired meta-initiative algorithms that can play an important role in optimizing engineering. The purpose of this research is to achieve a relation to determine the volume of concrete used in the ogee spillway. With the help of genetic algorithm, optimization was performed in MATLAB software. The ratio of the volume of concrete used in the ideal spillway over P/H (height/head) was determined and finally the relation between W/P (width of the spillway and its height at the cross section) was reported with the volume of concrete consumption in the spillway. Using a regression model, a new relation was reported for two volumes of concrete consumption and geometric component (W/P). The results of the research indicated that there is linear and direct relation between (W/P) with concrete volume. By choosing the optimal width (W) to spillway height (P), it saves a significant amount at the cost of concrete and operation.

Keywords: spillway geometry; concrete volume; genetic algorithm; ideal spillway.

Efecto de las especificaciones geométricas de un aliviadero ogee en la variación del volumen de consumo de hormigón utilizando algoritmo genético

Resumen.- La naturaleza es una gran fuente de inspiración de fenómenos complejos e interesantes que pueden usarse para resolver problemas actuales. El algoritmo genético es uno de los algoritmos de meta-iniciativa inspirados en la naturaleza que pueden desempeñar un papel importante en la optimización de la ingeniería. El propósito de esta investigación es lograr una relación para determinar el volumen de concreto utilizado en el aliviadero de ogee. Con la ayuda del algoritmo genético, la optimización se realizó con el software MATLAB. Se determinó la relación del volumen de concreto utilizado en el aliviadero ideal sobre P/H y finalmente se reportó la relación entre W/P (ancho del aliviadero y su altura en la sección transversal) con el volumen de consumo de hormigón en el aliviadero. Usando un modelo de regresión, se reportó una nueva relación para dos volúmenes de consumo de hormigón y W/P . Los resultados de la investigación indicaron que existe una relación lineal y directa entre el ancho y la altura del aliviadero (W/P) con el volumen de concreto. Al elegir el ancho óptimo (W) para la altura del aliviadero (P), se obtiene un ahorro significativo en costo de concreto y en operación.

Palabras clave: geometría del aliviadero; volumen de concreto; algoritmo genético; aliviadero ideal.

Received: April 05, 2019.

Accepted: June 10, 2019.

1. Introduction

For excess water and floods from the mirage to the dams, an instrument called the spillway is used. Spillways are made for a variety of purposes,

among which the most important are the passage of excessive flood water, the flow of excess streams on the capacity of the riverbeds, the raising and stabilization of the level of water to enter diverse cities, the adjustment of slopes of the reservoirs by the construction of successive spillways and Measurement Dedicated. Due to the sensitivity of the work being done by spillways, strong, reliable and high-performance devices must be built that can be ready for productivity at any time spillways

* Correspondence author:
e-mail:eng.miladenoor@gmail.com (M. Kheiry)

can be divided into two general superficial groups (graft, lateral, congress and steppe) and subsurface (for example morning glory spillway) [1].

Several studies have been made on direct-link gradient spillways. From 1886 to 1888, a comprehensive laboratory research have been conducted to determine the shape of a blade of water on a sharp edges, and carried out the first study on the shape of the spillway curve by [2]. The extensive experiments carried out by USBR, (1976) [3] from 1932 to 1948 on the profile of a sharp edge spillway blade for different slopes of the upper wall spillway, subsequently, USACE [4] introduced several states standard for crosslinking spillway.

Since the 1960s, researchers have been trying to simulate and solve experimental research with numerical methods [5]. The apparent flow characteristics were examined on diagonal spillways. They provided a new relation for calculating the flow in these types of spillways, so that this relation is in good agreement with laboratory values. Harcheghani *et al.*[1] by studying the physical sample of the Arctic spillway of the Garimi dam, the teeth examined the effective measurements of the coefficient of this spillway and provided relationships for calculating the flow coefficient in this spillway. Date *et al.*[6] stated that ogee spillway due to the proper hydraulic properties is one of the most popular hydraulic structures in scientific studies. Engineers widely use this type of spillway due to the hydraulic characteristics.

The proper characteristics of this type of spillway are effective drainage and high accuracy in discharge measurement. In general, hydraulic structures such as spillways require extraordinary high precision in optimization and design. Hydraulic structures are often complex and require attention in many cases so that the flow behavior around hydraulic structures and their effects in the environment can be accurately predicted [7]. The main function of the ogee spillway is to create conditions for the safe flow of flood from upstream to downstream. Inappropriate design and inadequate capacity of spillways have damaged some of the dams.

Therefore, the spillway must be appropriately

hydraulic and structural. Bagatur and Onen used gene expression planning (GEP) models as an alternative approach to predict apparent features and spillway design coefficients and suggested a new relation for this type of spillway [8]. The performance of GEP was very well evaluated in comparison with the regression model in predicting ogee spillway characteristics.

In this research, a definition of ideal ogee spillway is presented at first. Then, relationship between the volume of concrete used in constructing an ideal spillway over P/H (height ratio to overhead design) was determined. Finally, the relationship between W/P (width of the spillway to its height) and the volume of concrete used in the spillway was reported. In this study, the width of the spillway (W) is the horizontal distance between the spillway crown and the downstream and differs with the definition of the spillway length (L).

The results of this research are of great importance to spillway structure designers and researchers. The relationship between geometric spillway and volume of concrete consumption is one of the important issues in the field of hydraulic structures. In the present study, with consideration of the ideal spillway, the minimization of the amount of concrete used in the spillway structure has been made; which will help to reduce the cost of making it. The objectives of this research include:

1. Minimizing the amount of concrete used in the construction of a cliff spillway.
2. Determining the equation for the concrete volume in the ideal spillway.
3. Determining the relation between W/P (the width of the spillway to its height) with the amount of concrete used in the spillway.

2. Methodology

For the design and construction of an ogee spillway, various components are considered, some of which are shown in Figure 1. The relationships between these components are often derived from empirical experiments. These relationships were common in the mid-20th century and were developed by North American research and

engineering institutes. For spillway, equation (1) is one of the most well-known relations that correlates geometric components with the discharge and crown load.

$$Q = CLH^{3/2} \tag{1}$$

In equation (1), Q is expressed in terms of (m^3/s) and C is the discharge coefficient. It depends on the spillway geometric design, upstream flow conditions, and others metrics [9]. The component L is the spillway length and H is the head which are expressed in terms of meters. H in the following equation includes two static components on the crown and a height such as velocity. According to equation (2), the design load on the spillway is equal to the total static load (H_p) and the equivalent height (H_a)

$$H(\text{Design}) = H_p + H_a \tag{2}$$

2.1. Ideal spillway

The most common and perhaps the cheapest spillway that can handle a lot of water is the linkage spillway. Many researchers have tried to obtain equations based on the direction of motion of a water particle for the flow axis.

$$\frac{y}{H} = 0.15 + 0.055 \left(\frac{x}{H}\right) - 20.425 \left(\frac{x}{H}\right)^2 \tag{3}$$

Equation (3) is provided by Blaisdell [10]. X is the horizontal component of the flow of water on the spillway and y is the vertical component of the flow of water. H in the equation (2) includes two static load components on the crown and a height such as velocity. The overall shape of the ogee spillway is shown in Figure 1. In the ogee spillway research, two geometric components are often investigated: the length and height of the spillway. In this study, the effect of length is not considered and the basis of minimization is based on the volume of concrete used per length. The width of the spillway (W) is the same as final value of horizontal component (x) in Figure 1 for the peak overshoot.

If a concrete spillway is made just like the bottom curve of the mass flow, an ideal spillway will be

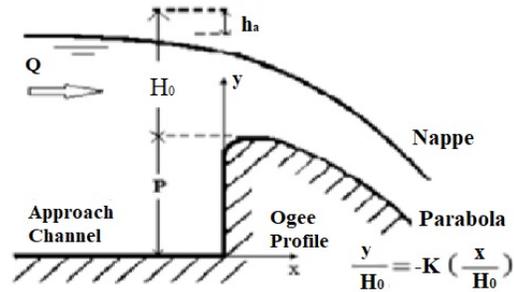


Figure 1: Flow over and ogee spillway [11]

achieved and the pressure on the spillway crown will be equivalent to atmospheric pressure. In this case, if the static load increases on the spillway crown; due to destruction of the mass flow, the pressure on the crown is negative and it will cause shaking and corrosion. Conversely, if the static load of water on the crown of spillway decreases, the mass flow falls on the spillway body and creates some additional friction that increases the friction as a result of the energy loss. Considering that H is considered for discharge, the second mode is most likely to occur. Some sources refer to the WES spillway or standard spillway and its shape is similar to the Figure 1.

In this study, we consider the ideal spillway equivalent to the standard spillway (WES) (Figure 2).

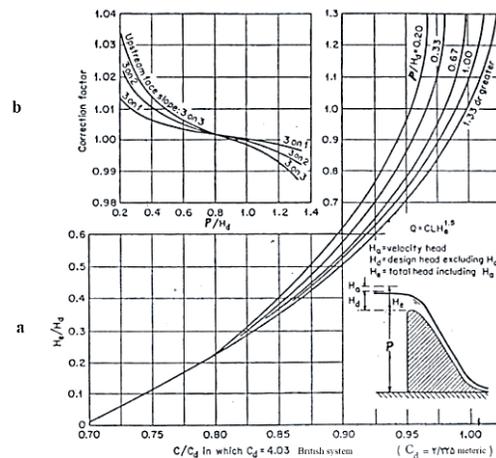


Figure 2: Flow coefficients in the WES spillway [12]

The genetic algorithm was used for optimization.

First, the target function and the constraints were coded. Then, this function was inserted in the MATLAB software command environment. The range of variables was written in the Bounds section of the genetic algorithm. Process of genetic algorithm is such that at first a number of initial solutions are implemented as the “primitive population” in the target function, then, according to Figure 3, the steps for implementing the algorithm are repeated until the desired solution is reached.

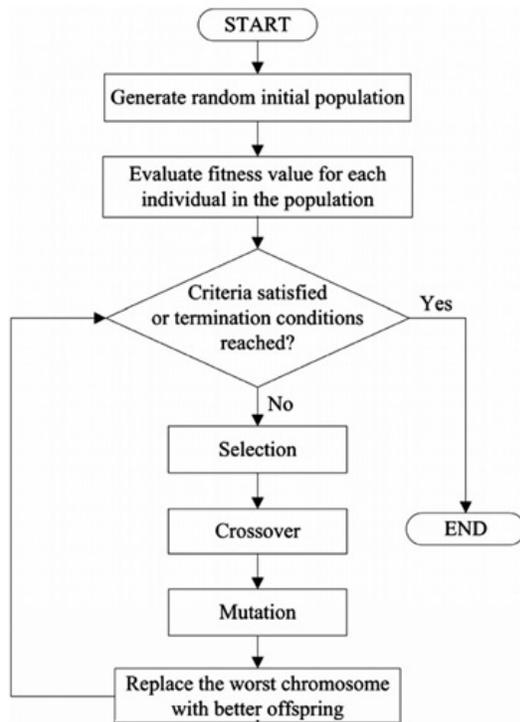


Figure 3: General procedure of genetic algorithm implementation [13]

In this method, first, for a fixed number called a population, a set of target parameters is generated randomly. After executing the program, the numerical simulator identifies the deviation of that set of information to that member of the population. This action was repeated for each member created. Then, by calling the operators of the genetic algorithm, including the opposition, mutation and selection operator, the next generation will be shaped and this procedure will continue to satisfy the convergence scale. Three parameters are commonly used as a stopping scale:

1. Duration of implementing the algorithm
2. Number of generation that are created
3. Convergence of the error criterion [14].

2.2. Regression analysis

In natural phenomena and experimental problems, there are several methods for estimating a parameter from one or more variables. One of the methods that predicts the behavior of a dependent variable is the multivariate linear regression model. This method is one of the simplest methods described for curve fitting [15]. A researcher can use linear regression if the following conditions are available [16].

1. Average (mathematical hope) errors should be zero.
2. The variance of the errors should be constant.
3. There should not be any correlations between the model errors.
4. The dependent variable should have a normal distribution.
5. Independent variables should not be linear.

In the linear regression model, the relation between independent variables $x(1), x(2), \dots, x(n)$ and the dependent variable Y is like:

$$Y = a(0) + a(1)x(1) + \dots + a(n)x(n) + e \quad (4)$$

In equation (4) $a(0)$ is the y-intercept and $a(1), a(2), \dots, a(n)$ are the regression coefficients and e is the error rate [17]. When N is in the variable and matrix mode, the linear multiple regression is like:

$$Y = X\beta + Z \quad (5)$$

In equation (5), Y is the vector of random variables and represents the expected data of the dependent variable. X is the matrix of independent variables, β is the matrix of regression coefficients, and Z is a random variable vector representing the error [18]. Significant tests are part of the inferential statistics that are based on the results of the sample on the population in which the sample is extracted. The assumption test is based on the studies of Sesser Ronald

Fischer (nineteenth and twentieth centuries), Jersey Nihsen (nineteenth century), and Karl Pearson (nineteenth and twentieth centuries). The modern assumption test is a combination of the work of these people, which was assigned to them in the twenty-first century [19]. In the discussion of statistical inference, that is, the analysis of the data and the generalization of its results to the statistical society, there is also a decision on the above-mentioned claims. In particular, the research hypotheses that are presented in the studies should be examined, validated or rejected by appropriate methods (statistical assumption tests). In this discussion, any hypothesis or question based on the difference or relation in analytical studies should be converted into statistical language (ie, statistical hypothesis) to be verified through statistical methods [20].

At first, various variables of (P/H) are extracted from the Figure 1 for the factor of discharge coefficient s 0,945; 0,953; 0,966; 0,975; 0,986. These variables lead to a specific relation to determine the volume of concrete used. The general objective is simplifying the calculation of the volume of concrete used in the design of ogee spillway. First, the factor of discharge coefficient (C/Cd) is converted to 5 discrete data from 0,945 to 0,9866 and thus the main problem of research (concrete volume minimization) is investigated in 5 phases. Figure 1. As already mentioned, being ideal was considered as the main constraint of spillway construction. The volume of concrete used in the spillway function was obtained from a special relation for the ideal flow of spillway profile. For 5 values of (C/Cd), the corresponding values of (P/H) were extracted from Figure 2, each of them has a specific relation for the volume of concrete used (Table 1).

The target functions were coded in MATLAB software, and each of the design components were defined in the programming language in the software. The Gatoool was used to calculate minimum volume of concrete consumption. The parameters of the genetic algorithm were also optimized. The optimal parameters of the algorithm were obtained based on trial and error and the experiences derived from repeating the

Table 1: Extracted materials from Figure 2

| C/Cd | P/Hd | Relation |
|--------|--------|--|
| 0,945 | 0,2 | $0,01 \left(150P + 1000P^2 - 37W \right) W$ |
| 0,953 | 0,33 | $0,00165 \left(90,9P + 606,6P^2 - 37W \right) W$ |
| 0,966 | 0,67 | $0,0033 \left(44,77P + 298,5P^2 - 37W \right) W$ |
| 0,975 | 1 | $0,005 \left(30P + 200P^2 - 37W \right) W$ |
| 0,9866 | 1,33 | $0,00665 \left(22,55P + 150,375P^2 - 37W \right) W$ |

algorithm (Table 2). Version 7.14.0.739 was used for optimization.

Table 2: Optimized operators for genetic algorithm

| Parameter | Type | Amount |
|-----------------------|--------------------|----------------------|
| Population | Population size | 20 |
| Population | Population Type | Double Vector |
| Fitness scaling | Scaling Function | Rank |
| Selection | Selection Function | Stochastic Uniform |
| Reproduction | Elite count | 2 |
| Reproduction | Crossover Fraction | 0,8 |
| Mutation | Mutation Function | Constraint Dependent |
| Crossover | Crossover Function | Scattered |
| Migration | Fraction | 0,2 |
| Migration | Interval | 20 |
| Constraint Parameters | Initial Penalty | 10 |
| Stopping Criteria | Generation | 100 |

2.3. Definition of constraints (limitations)

In the design of spillways, in addition to the hydraulic design, some of the main variables or relations between them should not be exceeded, for this purpose constraint design is used. This constraint determines boundary conditions related to different factors of the issue. The conditions of the issue are as follows:

$$0,945 < \frac{C}{Cd} < 0,986 \tag{6}$$

$$0,2 < \frac{W}{P} < 1,4 \tag{7}$$

$$\frac{y}{H} = 0,15 + 0,055 \left(\frac{x}{H} \right) - 20,425 \left(\frac{x}{H} \right)^2 \quad (8)$$

In the equation (6), (7) and (8), the final limit of x is equal to W and the final limit of y is equal to P and C/Cd is the factor of discharge coefficient, W is spillway of width (not length) and P is spillway height. First, for analyzing the genetic algorithm, the objective function was used in MATLAB software, and the operators of the genetic algorithm were measured by trial and error methods and the result was mentioned in Table 2.

3. Results and Discussions

In this study, the amount of factor of discharge coefficient (C/Cd) was reported in the amount (P/H) in Table 1. Equation (3) was also integrated and using the genetic algorithm, the minimum volume of concrete was performed. Then, relations were reported for the volume of concrete used in ogee spillway (Table 2). For correlation analysis and calculation of determination coefficient (R^2), RMSE value and error and reliability of two models, Excel 2010 and SPSS software were used. For different values of P/H , few models were designed. Regression models have been investigated separately in the following. The first model ($P/H = 0,2$) is the linear relation between the independent variable ($x = W/P$) and the volume of concrete of the spillway construction with the coefficient of determination ($R^2 = 1$) and ($RMSE = 1,05$) and ($p - value = 0,0$), ($SE = 0,0006$); which its numerical value is mentioned in Table 3 and its diagram is mentioned in Figure 4a. This equation is as follows:

$$y = 100,91x + 0,1771 \quad (9)$$

The second model ($P/H = 0,33$) is the linear relation between the independent variable ($x = W/P$) and the volume of concrete of the spillway construction with the coefficient of determination ($R^2 = 1$) and ($RMSE = 1,05$); which its numerical value is mentioned in Table 3 and its diagram is mentioned in Figure 4b. This

equation is as follows:

$$y = 100,61x + 0,2926 \quad (10)$$

The third model ($P/H = 0,67$) is the linear relation between the independent variable ($x = W/P$) and the volume of concrete of the spillway construction with the coefficient of determination ($R^2 = 0,99$) and ($RMSE = 1,05$) and ($p - value = 0,0$), ($SE = 0,0079$); which its numerical value is mentioned in Table 3 and its diagram is mentioned in Figure 4c. This equation is as follows:

$$y = 98,743x - 0,2719 \quad (11)$$

The fourth model ($P/H = 1$) is the linear relation between the independent variable ($x = W/P$) and the volume of concrete of the spillway construction with the coefficient of determination ($R^2 = 0,99$) and ($RMSE = 1,05$) and ($p - value = 0,0$), ($SE = 0,001$); which its numerical value is mentioned in Table 3 and its diagram is mentioned in Figure 4d. This equation is as follows:

$$y = 98,742x - 0,2719 \quad (12)$$

The fifth model ($P/H = 1,33$) is the linear relation between the independent variable ($x = W/P$) and the volume of concrete of the spillway construction with the coefficient of determination ($R^2 = 0,99$) and ($RMSE = 1,05$) and ($p - value = 0,0$), ($SE = 0,0041$); which its numerical value is mentioned in Table 3 and its diagram is mentioned in Figure 4f. This equation is as follows:

$$y = 97,56x + 1,1794 \quad (13)$$

In the equations (9), (10), (11), (12) and (13), the component x represents the value of (W/P), and the component y is equal to the volume of concrete consumption per length in terms of (m^3/m).

3.1. Regression hypothesis test (t-Test)

The interpretation of a relation requires a hypothesis test. If the zero hypothesis was rejected, it can be concluded that there is a linear relation between two independent and dependent variables. In this study, t-test was used to interpret the

regression model and SPSS16 software was used for calculations. The absence of linear relation of hypothesis:

$$H_0 : \beta_1 = 0$$

$$H_1 : \beta_1 \neq 0$$

The first model ($P/H = 0, 2$): for the relation of length and height of spillway we have ($\ln(P)$) and T -table with standard distribution and p -value = 0, 05:

$$(t_0 = 1757, 84; -3.44), (t_{\alpha/2 \ n-2} = 2, 57)$$

Consequently, we have $|t_{\alpha/2 \ n-2}| < |t_0|$ and the assumption of H_0 is rejected and the linear relation of this model is confirmed. For simplicity and with the criterion error (S_{xy}) 1,153; we can use the following equation for this model:

$$Y = 100X \tag{14}$$

In equation (14), the component X represents the value of (W/P), and the component y is equal to the volume of concrete consumption per length in terms of (m^3/m).

The *second model* ($P/H = 0, 33$): like other models, we have:

$$(t_0 = -3, 44; 1062, 90), (t_{\alpha/2 \ n-2} = 2, 57)$$

Consequently, we have $|t_{\alpha/2 \ n-2}| < |t_0|$ and the assumption of H_0 is rejected and the linear relation of this model is confirmed. For simplicity and with the criterion error (S_{xy}) 0,984; we can use the $Y = 100X$ equation for this model.

The *third model* ($P/H = 0, 67$): like other models, we have:

$$(t_0 = 0, 446; 133, 64), (t_{\alpha/2 \ n-2} = 2, 57)$$

Consequently, we have $|t_{\alpha/2 \ n-2}| < |t_0|$ and the assumption of H_0 is rejected and the linear relation of this model is confirmed. For simplicity and with criterion error (S_{xy}) 1,802, we can use the $Y = 100X$ equation for this model.

The *forth model* ($P/H = 1$): like other models, we have:

$$(t_0 = 0, 446; 133, 69), (t_{\alpha/2 \ n-2} = 2, 57)$$

Table 3: Amount of concrete consumption per length

| W/P | Model | | | | |
|-----|---------|---------|---------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 0,2 | 20,285 | 20,293 | 19,947 | 19,947 | 20,2 |
| 0,4 | 40,54 | 40,537 | 37,797 | 37,797 | 40,2 |
| 0,6 | 60,766 | 60,733 | 59,549 | 59,549 | 60,013 |
| 0,8 | 80,963 | 80,88 | 79,204 | 79,2 | 79,62 |
| 1 | 101,13 | 100,978 | 98,761 | 98,761 | 99,038 |
| 1,2 | 121,267 | 121,027 | 118,22 | 118,22 | 118,25 |
| 1,4 | 141,374 | 141,027 | 137,582 | 137,58 | 137,27 |

1: $P/H = 0, 2$; 2: $P/H = 0, 33$; 3: $P/H = 0, 67$; 4: $P/H = 1$; 5: $P/H = 1, 33$;

Consequently, we have $|t_{\alpha/2 \ n-2}| < |t_0|$ and the assumption of H_0 is rejected and the linear relation of this model is confirmed. For simplicity and with criterion error (S_{xy}) 1,803, we can use the $Y = 100X$ equation for this model.

The *fifth model* ($P/H = 1, 33$): like other models, we have:

$$(t_0 = -3, 39; 255, 45), (t_{\alpha/2 \ n-2} = 2, 57)$$

Consequently, we have $|t_{\alpha/2 \ n-2}| < |t_0|$ and the assumption of H_0 is rejected and the linear relation of this model is confirmed. For simplicity and with criterion error (S_{xy}) 1,527, we can use the $Y = 100X$ equation for this model.

4. Conclusion

The first goal of the study is to minimize the volume of concrete used in the construction of ogee spillway. In this research we introduced the spillway height ratio (P/H) to design head of 5 models. Using genetics algorithms, the minimum volume of concrete consumption was calculated. The relations in Table 2 are based on the minimum volume of concrete and can be used in future designs of these models. In this study, the spillway was defined ideally and Equation (3) indicates the relation between the horizontal and vertical component (ogee spillway section). By integrating the enclosed area of the curve, the relation between the volume of concrete consumption and the geometric components (Spillway of height (P), width (W)) was determined. All calculations are

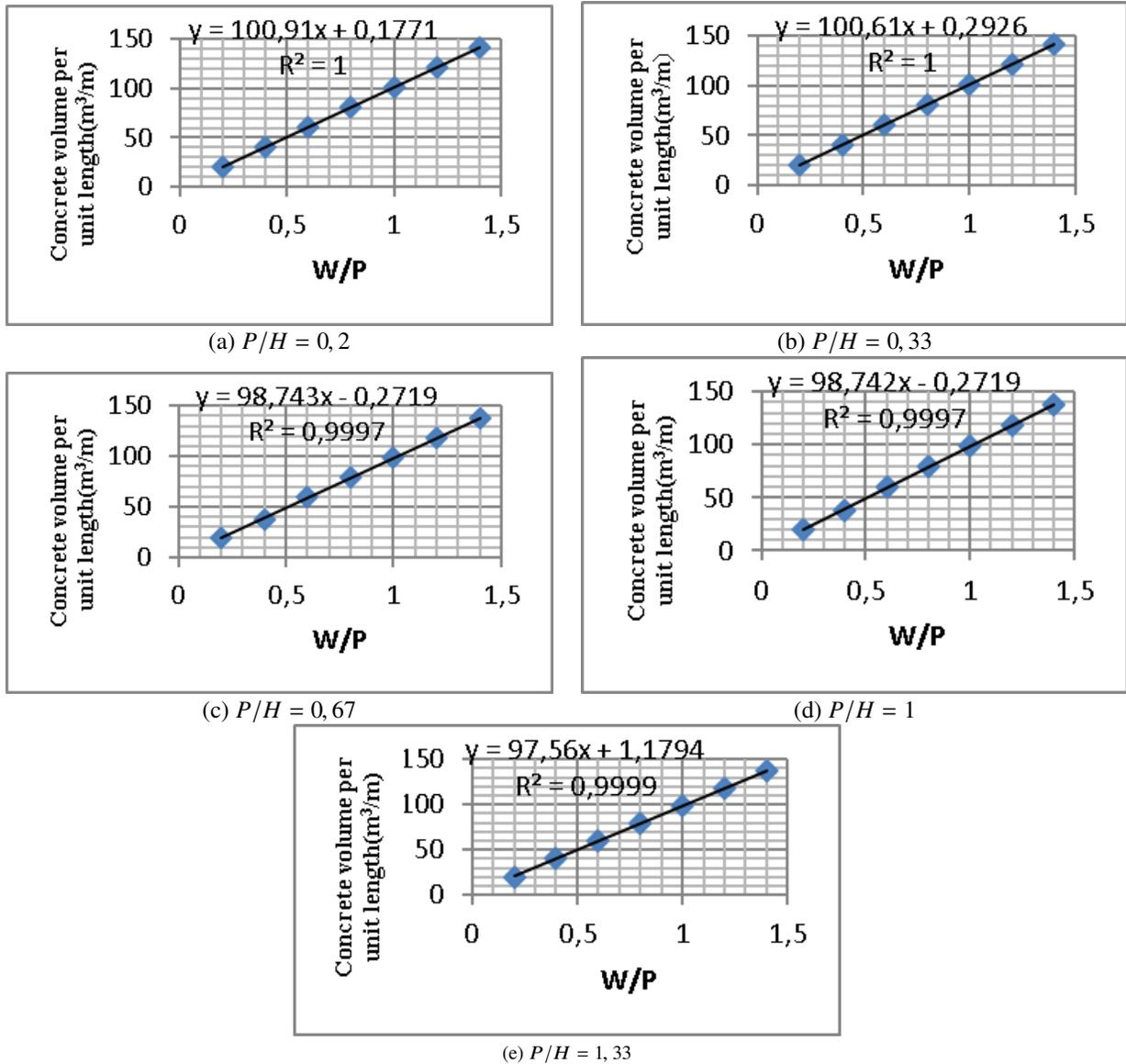


Figure 4: Changes in the amount of concrete volume consumption per length of ogee spillway

based on the ideal spillway characteristics. In this research, using correlation and regression, there is a linear and positive relation between the volume of concrete consumption in the ogee spillway and the geometric component (W/P). By choosing the optimal width (W) to spillway height, it saves significantly at the cost of concrete and operation. Also, the significance and accuracy of the regression model between concrete volume variable and geometric variable (W/P) indicate the high ability of models to estimate the relation between components. The study of the ogee spillway overflow and geometric characteristics of

its structure is one of suggestions for researchers in the hydraulic and structural fields can have extensive studies on it.

5. Bibliography

- [1] S.K. Harcheghani, S. Kouchakzadeh, and S. Ahmad-Hosseini. The impact of spillway curvature on discharge coefficient and the hydraulic behavior of the approach channel, case study: Germichai spillway. *The Journal of Watershed Engineering and Management*, 6(3):281–287, 2014.
- [2] F.M. Henderson. Open channel flow. In *MacMillan Series in Civil Engineering*. Macmillan Publishing Co, 1966.

- [3] U.S. Bureau of Reclamation (USBR). Design of gravity Dams. In *DESIGN MANUAL FOR CONCRETE GRAVITY DAMS*. United States Government Printing Office, Denver, Colorado, 1976.
- [4] U.S. Army Corps of Engineers (USACE). Hydraulic design of spillways. In *Engineering and design*. Engineer Manual 1110-2-1603, Washington D.C., 1990.
- [5] P.K. Swamee, C.H. Shekhar, and M. Talib. Discharge characteristics of skew weirs. *Journal of Hydraulic Research*, 49(6):818–820, 2011.
- [6] V. Date, T. Dey, and S. Joshi. International Engineering Research Journal Numerical Modeling of Flow over Ogee Crested Spillway under Radial Gate. *International Engineering Research Journal Special Edition PGCON-MECH-2017*, pages 1–5, 2017.
- [7] G.K. Demeke, D.H. Asfaw, and Y.S. Shiferaw. 3D Hydrodynamic Modelling Enhances the Design of Tendaho Dam Spillway, Ethiopia. *Water*, 11(82), 2019.
- [8] T. Bagatur and F. Onen. Computation of design coefficients in ogee-crested spillway structure using GEP and regression models. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(2):951–959, 2016.
- [9] J. Yang, P. Andreasson, P. Teng, and Q. Xie. The Past and Present of Discharge Capacity Modeling for Spillways A Swedish Perspective. *Fluids*, 4(1):10–11, 2019.
- [10] F.W. Blaisdell. *Hydraulics of Closed Conduit Spillways Part 1. Theory and Its Application*. St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory. University of Minnesota Digital Conservancy, 1952.
- [11] A. Yıldız and A. Yazar. Physical modeling of flow over an ogee spillway and investigation of scale effects by using froude similarity. In *International Symposium “The Environment and the Industry”, SIMI 2018*, pages 105–110, 2018.
- [12] M.K. Beirami. *Water Conveyance Structures*. Center of Publication for Isfahaan University of Technology, 2016.
- [13] C.H. Yang, Y.H. Cheng, L.Y. Chuang, and H.W. Chang. Confronting two-pair primer design for enzyme-free SNP genotyping based on a genetic algorithm. *BMC Bioinformatics*, 11(509), 2010.
- [14] H.R. Saba, M. Kamalian, and I. Raeisizadeh. Determining impending slip of slop and optimized embankment operation volume of earth dams using a combination of neural networks and genetic algorithms (GA). *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(4):233–234, 2018.
- [15] V. Kotu and B. Deshpande. *Predictive analytics and data mining: concepts and practice with RapidMiner*. Morgan Kaufmann-Elsevier, 2015.
- [16] D.C. Montgomery, E.A. Peck, and G.G. Vining. *Introduction to linear regression analysis*, volume 821. John Wiley & Sons, 2012.
- [17] B. Balan, S. Mohaghegh, and S. Ameri. State-of-art-in permeability determination from well log data: Part 1-A comparative study, Model Development. Technical Report 30978, Society of Petroleum Engineers, 1995.
- [18] D.M. Bates and D.G. Watts. *Nonlinear regression analysis and Its applications*. Wiley-Interscience Publication, 1988.
- [19] H.A. Anders. *History of Mathematical Statistics*. John Wiley and Sons, New York, 1998.
- [20] M. Asghari-Jafarabadi and M. Mohammadi-Seyede. Statistical series: Common non-parametric methods. *Iranian Journal of Diabetes and Metabolism*, 14(3):145–162, 2016.

Preliminary study of the process of nitrate removal optimization from aqueous solutions using Taguchi method.

Hedieh Ahmadpari^a, Seyyed Ebrahim Hashemi Garmdareh ^{*,b}, Amir Afarinandeh^c

^a M.Sc. Graduate of Irrigation and Drainage, Department of Irrigation and Drainage, College of Aburaihan, University of Tehran, Iran.

^b Assistant Professor, Department of Irrigation and Drainage, College of Aburaihan, University of Tehran, Iran.

^c M.Sc. Student of Environmental Engineering, Payam Noor University (PNU), Tehran, Iran.

Abstract.- One of the most common pollutants in the water is nitrate. High nitrate concentration in water can cause methemoglobinemia in children, and also the formation of carcinogenic nitrosamines. The aim of this study was to optimize the process of nitrate removal from aqueous solutions using the Taguchi method. In this study, the effect of five parameters including adsorbent type, adsorbent amount, contact time, pH and initial concentration of nitrate on nitrate removal efficiency were investigated. The adsorbents used include crushed leaves of palm trees, crushed wheat straw and beech tree wood chips. The range of adsorbents amount used was 1 to 50 g, pH was 5 to 12, the contact time was 1 to 8 hours, and the initial nitrate concentration was 1 to 50 mg/L. The results showed that maximum removal of nitrate was happened with 20 mg/L of initial nitrate concentration at pH = 7, adsorbent mass 30 g and contact time 6 hours. Also, the results showed that nitrate removal efficiency increased with increasing adsorbent mass, initial concentration of nitrate, acidity and contact time to the optimum level, and then decreasing. Also, from the studied adsorbents, crushed leaves of the palm tree have a higher nitrate removal efficiency than other adsorbents.

Keywords: nitrate removal; Taguchi method; palm tree leaves; wheat straw; beech tree wood chips.

Estudio preliminar de la optimización del proceso de remoción de nitrato de soluciones acuosas utilizando el método de Taguchi.

Resumen.- Uno de los contaminantes más comunes en el agua es el nitrato. La alta concentración de éste puede causar metahemoglobinemia en los niños y también la formación de nitrosaminas cancerígenas. El objetivo de este estudio fue optimizar el proceso de eliminación de nitratos de soluciones acuosas utilizando el método de Taguchi. En tal sentido, se investigó el efecto que sobre la eliminación o remoción de nitrato tienen cinco parámetros que incluyen: el tipo de adsorbente, la cantidad del mismo, el tiempo de contacto, el pH y la concentración inicial de nitrato. Los adsorbentes utilizados fueron hojas trituradas de palmas, espigas de trigo triturada y astillas de madera de haya. El rango de cantidad de adsorbentes utilizados fue de 1 a 50 g, el pH fue de 5 a 12, el tiempo de contacto fue de 1 a 8 horas y la concentración inicial de nitrato fue de 1 a 50 mg/l. Los resultados mostraron que la eliminación máxima de nitrato se consiguió con 20 mg/l de concentración inicial a pH = 7, una masa adsorbente de 30 g y un tiempo de contacto de 6 horas. Además, los resultados mostraron que la eficiencia de eliminación de nitrato aumentó con el incremento de la masa adsorbente, la concentración inicial de nitrato, la acidez y el tiempo de contacto hasta el nivel óptimo, y luego disminuyó. Además, a partir de los adsorbentes estudiados, las hojas trituradas de la palmera tienen una mayor eficiencia de remoción de nitratos que otros adsorbentes.

Palabras clave: Remoción de nitrato; método de Taguchi; hojas trituradas de palmas; espigas de trigo trituradas; astillas de madera de haya.

Received: April 05, 2019.

Accepted: July 18, 2019.

1. Introduction

One of the most common environmental pollutants in groundwater and surface water is nitrate [1]. High nitrate concentration in water caused methemoglobinemia in children, and also the formation of carcinogenic nitrosamines

* Correspondence author:

e-mail: sehashemi@ut.ac.ir (S.E. Hashemi)

[2]. Rupert [3] studies in the United States, showing that in more than 20 % of rural wells, nitrate nitrogen concentrations are higher than the drinking standard. Jackson *et al.* [4] reported rapid movement of nitrate in the soil and rapid leaching of soil profile and contamination of groundwater, followed by surface waters. Increasing the concentration of nitrate in water resources due to excessive use of chemical fertilizers and pesticides and irrigation with sewage has now become a serious problem around the world [5]. Nitrate pollution of groundwater in developing countries has been reported as a consequence of increasing levels of fertilization [6].

There are different physical, chemical and biological methods to remove nitrate from urban, industrial and agricultural wastewater, and even water resources, which may include physical method processes, membrane processes such as reverse osmosis and nanofiltration. These methods, usually are costly and require high pretreatment wastewater. Due to the high cost of activated carbon as a physical method, researchers are constantly looking for an alternative to this issue, so the use of natural carbon resources that can adsorb nitrates has been considered in recent decades. So far, many studies have been conducted on the adsorbent of harmful ions from water using cheap agricultural waste such as cedar tree wood chips [7], coconut skin powder [8], lentil husk [9], rice husk [10], pine tree wood chips [11] and oak charcoal [12]. Demiral [13] investigated the removal of nitrate from aqueous solutions by activated carbon prepared from sugar beet bagasse. In this research, activated carbons were prepared from sugar beet bagasse by chemical activation and were used to remove nitrate from aqueous solutions. In chemical activation, $ZnCl_2$ was used as chemical agent. The effects of impregnation ratio and activation temperature were investigated. The produced activated carbons were characterized by measuring their porosities and pore size distributions. The microstructure of the activated carbons was examined by scanning electron microscopy (SEM). The maximum specific surface area of the activated carbon was about $1826 \text{ m}^2/\text{g}$ at $700 \text{ }^\circ\text{C}$ and impregnation ratio of 3:1. The

effects of pH, temperature and contact time were investigated. Farasati *et al.* [14] investigated the effect of sugarcane straw and *Phragmites australis* anion exchanger nano adsorbents for removal of nitrate from aqueous solutions. Also, the effects of operating conditions such as pH, contact time, adsorbent loading, initial anion concentration, and the presence of competitive ions on the adsorption performances were examined. The results showed that the equilibrium time was 2 hours and the pH was 6. With pH of the solution varying from 2 to 10, the nitrate removal efficiency for sugarcane straw and *Phragmites australis* nano adsorbent increased up to maximum of 45 % to 76 % and 60 % to 86 % reached at pH 6. With an increase in the nitrate concentration from 5 to 120 mg/L, the removal efficiency decreased from 86 % to 66 % and 90 % to 67 % for sugarcane straw and *Phragmites australis* nano adsorbent, respectively. For *Phragmites australis* nano adsorbent, with an increase in the adsorbent dosage from 0,1 to 0,3 grams, the removal efficiency increased from 60 % to 85 %, but remained almost unchanged when adsorbent dosage ranged from 0,3 to 1 grams. For sugarcane straw nano adsorbent as the adsorbent dosage increased from 0,1 to 0,5 grams, the removal efficiency of nitrate increased from 45 % to 75 %, but remained almost unchanged for the increase of 0,5 to 1 grams. Adsorption kinetics of nitrate ions could most successfully be described by Freundlich isotherm. This study indicated that sugarcane straw and *Phragmites australis* nano adsorbents could be used for the removal of nitrate ions in water treatment and *Phragmites australis* nano adsorbent has higher adsorption than sugarcane straw nano adsorbent for nitrate removal.

Divband Hafshejani *et al.* [15] compared of biochar and vermicompost sugarcane bagasse performance on nitrate removal from contaminated water and determine the optimum conditions for adsorption process. In this research, after providing of sugarcane bagasse biochar and vermicompost and determining their characteristics, the effect of different parameter such as initial pH (2-11), dosage of adsorbent (1-10 g/L), solution temperature (10, 22 and $30 \text{ }^\circ\text{C}$), the presence of

competing ions (phosphate, sulphate, carbonate and chloride) and contact time (0-180 min), were investigated on the efficiency of adsorbent. The results of this study showed that the optimum pH of nitrate adsorption by sugarcane bagasse biochar and vermicompost was 4,64 and 3,78, respectively. Also, optimum adsorbent dosage was obtained (2 g/L). Among the competing anions, carbonate and chloride had the highest and the lowest impact on the reduction of nitrate removal and nitrate removal efficiency was increased as the temperature increases. According to kinetic of experiment, equilibrium time for nitrate adsorption by biochar and vermicompost was obtained (60 and 120 min, respectively). The higher removal of nitrate by biochar (73,7 %) in compare to vermicompost (48 %) was due to specific surface area, the amount of carbon and anion-exchange capacity of sugarcane bagasse biochar is higher than vermicompost.

Norisepehr *et al.* [16] compared the chitosan function as adsorbent for nitrate removal using synthetic aqueous solution and drinking water. Also, effects of parameters such as pH, contact time, initial concentration and adsorbent concentration of nitrate on nitrate removal from aqueous solution was studied. Function of chitosan in synthetic aqueous solution and drinking water according to the slurry system results, the optimum condition was obtained at pH = 4, 20 min contact time and increasing the initial concentration of nitrate enhance the adsorption capacity of chitosan. Also optimum dosage of adsorbent was obtained at 0,5 g/l. Although efficiency of nitrate removal in synthetic aqueous solution was better than drinking water, adsorption process using chitosan as an option for the design and selection nitrate removal should be considered in order to achieve environmental standards. Bafkar and Baboli [17] investigated the efficiency of nitrate removal from aqueous solution using oak leaf nanostructure adsorbent. In this research, oak leaf adsorbent was first crushed against a relatively dry sunshine by household grinder and then passed through the sieve 200 to prepare adsorbent nanomaterials. After being washed with distilled water in an oven at 70 °C for 24 hours. In this study, the

effects of factors such as pH, adsorbent mass, contact time and initial concentration of nitrate were tested. The results showed that for the adsorbent, the equilibrium time after 120 min and the maximum nitrate adsorbent at pH = 5 were obtained. By increasing the adsorbent mass from 0,3 to 0,7 grams, the removal efficiency ranged from 88,93 to 93,82 percent, however, with increasing adsorbent content from 0,7 to 1,6 g, the adsorbent efficiency almost reduced. By increasing the concentration of dissolved nitrate (5-120 mg/L), the removal efficiency decreased from 94,41 to 89,35 %. Therefore, it can be stated that oak leaf can be used as a suitable and cost effective adsorbent with the least technology in nitrate removal.

Safdari *et al.* [18] investigated the efficacy of date kernel ash on removal of nitrate from aqueous solutions. In this research, the effect of initial nitrate concentration (50, 100, and 150 mg/L), initial pH (3, 5, 7, and 9), time (15, 30, 60, 120, and 180 minutes), and adsorbent weight (0,4, 0,6, and 0,8 g) were investigated. The increase of adsorbent dose from 0,4 g to 0,8 g in 100 mL nitrate solution with concentrations of 50 and 100 mg/L caused increase in adsorbent efficiency respectively from 75 % to 91 % and from 53 % to 65 %. Increase in solution's initial pH from 3 to 9 caused decrease in the adsorbent efficiency from 52 % to 8 %. The palm kernel ash is a natural and inexpensive adsorbent that can be used to remove environmental pollutants. Marezi *et al* [19] investigated the use of date palm fiber in the production of adsorbent material for nitrate sorption from aqueous solution. In this research, palm fibers were burned at temperatures of 450, 600 and 750 °C in a limited supply of oxygen condition. The produced biochar at temperature of 600 °C was chosen due to its high ability in removal of the nitrate from aqueous solution. Biochar made from these fibers washed with hydrochloric acid 0,5 N and then with distilled water to increase performance. The FTIR (Fourier transform infrared spectroscopy) method was used to investigate groups of the adsorbent. Additional studies were performed to measure the effects of pH, adsorbent dose, time and temperature on nitrate sorption. The optimal conditions for removal

of nitrate were found (0,5 g of adsorbent in 20 ml solution, temperature of 10 °C, 30 min and neutral pH). Under these conditions, the nitrate removal efficiency was over 96 %. The general objective of this research was to study the ability of wheat straw, Beech wood chips and palm date leaf as an adsorbent to remove nitrate from aqueous solutions and determine the effect of different parameters (type and amount of adsorbent, initial concentration of nitrate, pH and contact time) on the process of remove nitrate and determination of optimum points for the adsorption process.

2. Materials and methods

Palm tree leaves were collected from palm trees on the Aburaihan college, University of Tehran. Then, the leaves were washed four times with water and twice with distilled water to remove the dust and dried in an oven at 80°C for 24 hours. After drying, the leaves were separated from the middle stem and divided by hands into very small pieces. Beech wood chips after being prepared from carpenters in Tehran province, was first washed with plenty of water and then washed well with the use of grease cleaners. It was then washed four times with water and twice with distilled water and dried in an oven at 80°C for 24 hours. Wheat straw was obtained from farms of Tehran province and in order to increase the accuracy of the experiment, weed straw was removed from the straw. After clearing the wheat straw, the grass was washed four times with water and twice with distilled water and dried in an oven at 80°C for 24 hours. Storage solutions (1000 mg/L) were prepared using potassium nitrate salt (1,645 g). Then solutions were made at concentrations of 1, 5, 20 and 50 mg/L of the storage solution. In all experiments, the volume of the solution used was 500 ml. The pH of the solutions was adjusted to 5, 7, 9 and 12 by NaOH and HCl 0,1 M. The pH adjustment of the nitrate solution was performed using a pH-meter device. After preparing the adsorbent and preparing a solution of nitrate, 1, 5, 30 and 50 g of all adsorbents were poured into beakers and the nitrate solution was added to them, and after completion of the specified

contact time, the solutions were passed through the whatman filter paper 42 and were flattened. The final concentration of nitrate of the samples was measured by micro Kjeldahl device.

In experimental design, the relative importance of Taguchi's capabilities is ease of use, decreasing the number of tests, determining interactions and optimization [20]. In the Taguchi method, the inputs variable of the process are deliberately changed, so that the effect of that in the process response is detected and identified. In other words, the Taguchi method is a useful way to identify the key variables that affect the parameter of the process [21][22]. By using this method, controllable input factors can be systematically changed and their effects evaluated on output parameters [23][24]. In Taguchi design, the results are presented in terms of average standards or the signal-to-noise ratio (S/N) [25]. However, in order to provide noise-to-noise results, at least trials must be repeated two or three times. The higher the ratio (S/N) for a larger factor, the more effective the response to the response [23]. Today, there are softwares developed to test the design by Taguchi method and after taking the results of the experiments, analyze the data and determine the optimal conditions and the importance of each of the variables. One of these software is Qualitek-4, which is used in this research. To optimize nitrate removal test by Taguchi method, five factors were considered: adsorbent type, contact time, adsorbent mass, pH and initial concentration of nitrate. Table 1 shows each of the factors tested and their levels.

If we want to do all possible combinations without having to repeat the test, then there should be 768 tests for crushed adsorbents. This is not economically feasible and time-consuming. As a result, was used the Qualitek-4 software, with Taguchi's test design. After giving the variables to software, according to Table 2, a 16-array is provided for performing the tests. It should be noted that all experiments are repeated three times.

Finally, after performing these tests, the results were submitted to Qualitek-4 software to analyze the data and to obtain optimal conditions and importance of each variable.

Table 1: Variables and selective levels for designing tests

| adsorbent | Retention Time (h) | Adsorbent mass(g) | pH | Initial concentration of nitrate (mg/L) |
|-----------|--------------------|-------------------|----|---|
| A | 1 | 1 | 5 | 1 |
| B | 4 | 5 | 7 | 5 |
| C | 6 | 30 | 9 | 20 |
| - | 8 | 50 | 12 | 50 |

A: Palm leaves

B: Beech wood chips

C: Wheat straw

3. Results and discussion

After performing the tests predicted by Qualitek-4 software, the percentage of removal efficiency was entered as the test response in the result section of the software and results were analyzed in the analysis section. In the ANOVA analysis, the total observed changes in cells were called ANOVA, and the share of changes in each factor in the total dispersion of responses was observed. Finally, the following results were deduced from this method:

1. Effect of different factors (adsorbent mass, initial nitrate concentration, acidity, contact time and type of adsorbent) on nitrate removal efficiency.
2. Optimal conditions for maximum removal efficiency.
3. Percentage of the contribution of various factors (adsorbent mass, initial concentration of nitrate, acidity, contact time and type of adsorbent) on nitrate removal efficiency (sensitivity analysis).

It should be noted, that output charts and analyzes are based on the signal-to-noise ratio (S/N), which indicates that the higher the signal-to-noise ratio at each level than the parameters, the disturbance of other factors to achieve the desired target (The highest nitrate removal efficiency) is less in the test, and that level of the parameter is the optimum level. Figure 1 shows the changes in the efficiency of the removal of nitrate relative to the type of adsorbent. Crushed leaves of

palm tree, crushed wheat straw and beech wood chips have the highest S/N rates, respectively. So, investigating changes in the efficiency of nitrate removal compared to adsorbent type showed that crushed leaves of palm tree, crushed wheat straw and beech woodchips, respectively, were the optimum adsorbent for nitrate removal from aqueous solutions.

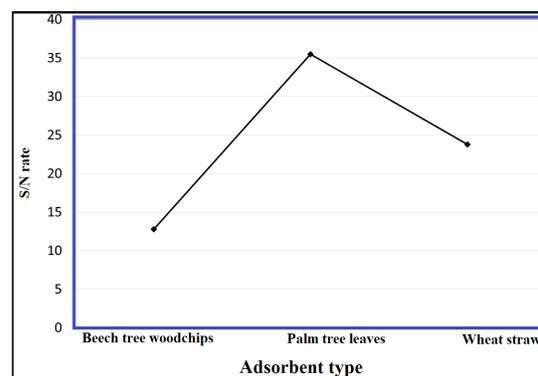


Figure 1: Changes in the efficiency of nitrate removal relative to adsorbent type

Figure 2 shows the changes in nitrate removal efficiency relative to the initial nitrate concentration. Changes in the efficiency of nitrate removal compared with the initial concentration of nitrate showed that by increasing the initial concentration of nitrate from 1 to 20, the rate of S/N increased, indicating that the removal rate had a rising concentration of 1 to 20 mg/L. After concentrations of 20 mg/L, the S/N rate is declining, indicating a reduction in removal efficiency. With increasing initial concentration of nitrate, the thrust force increases, which increases the nitrate removal efficiency [26]. The efficiency of nitrate removal is greater in the first moments. This phenomenon is due to the presence of large vacant places in the early moments on the adsorbent. Over time, these sites are occupied by nitrate molecules. As a result, nitrate removal will be reduced over time [27]. Therefore, it can be said that in concentrations of 1 to 20 mg/L nitrate, the number of active sites for adsorption on the surface of crushed leaves of palm tree, crushed wheat straw and beech woodchips more than when the concentration of nitrate in the range of 20 to 50 mg/L. This conclusion is consistent with

Table 2: Experiments determined by Qualitek-4 software

| Test number | adsorbent type | Retention time (h) | Adsorbent mass (g) | pH | Initial concentration of nitrate (mg/L) |
|-------------|----------------|--------------------|--------------------|----|---|
| 1 | B | 1 | 1 | 5 | 1 |
| 2 | C | 1 | 5 | 7 | 5 |
| 3 | A | 1 | 30 | 9 | 20 |
| 4 | B | 1 | 50 | 12 | 50 |
| 5 | B | 4 | 1 | 7 | 20 |
| 6 | A | 4 | 5 | 5 | 50 |
| 7 | C | 4 | 30 | 12 | 1 |
| 8 | B | 4 | 50 | 9 | 5 |
| 9 | C | 6 | 1 | 9 | 50 |
| 10 | B | 6 | 5 | 12 | 20 |
| 11 | B | 6 | 30 | 5 | 5 |
| 12 | A | 6 | 50 | 7 | 1 |
| 13 | A | 8 | 1 | 12 | 5 |
| 14 | B | 8 | 5 | 9 | 1 |
| 15 | B | 8 | 30 | 7 | 50 |
| 16 | C | 8 | 50 | 5 | 20 |

A:Palm leaves
 B:Beech wood chips
 C:Wheat straw

the results of Akhtar *et al* [28] and Malakootian *et al* [29]. Malakootian *et al*[29] reported the lack of active sites the cause of decreased nitrate adsorption in high concentrations. The researchers reported that with increasing initial concentration of nitrate, the number of anions increases to be in adsorption sites, and adsorbent active sites are saturated, thereby reducing the nitrate uptake. Akhtar *et al* [28] also showed that in high concentrations, adsorption through surface binding due to saturation of adsorbent sites is negligible. Therefore, it can be said that at high concentrations, it is difficult to occupy adsorbent empty surfaces. Because there is a repulsion between the adsorbed molecules on the solid surface and the molecules that are in the solution phase.

Figure 3 shows the changes in the efficiency of nitrate removal relative to pH. Changes in efficiency of nitrate removal compared to pH showed that with increasing acidity, the rate of S/N increased, indicating that the rate of removal of nitrate also increased in pH 5 to 7, and after pH 7, the rate of S/N takes downward trend, which indicates a reduction in the removal efficiency after pH 7. This result can be explained by the fact that, the nitrate ion has a negative charge, in acidic pHs ($5 < \text{pH} < 7$), the nitrate adsorbent rate increases due to the electrostatic interaction

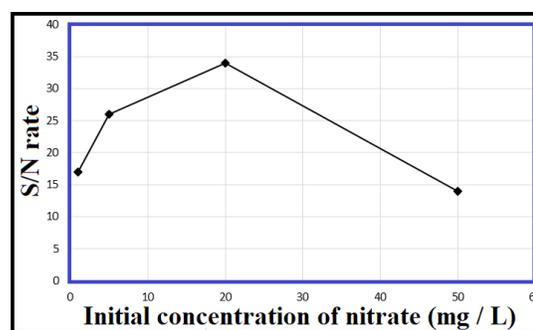


Figure 2: Changes in the efficiency of nitrate removal relative to initial concentration of nitrate

between positive surface charge and anions occur (Olgun *et al*, 2013). However, increasing the amount of hydroxide ions in high pH causes competition between hydroxide ion and nitrate in the adsorbed process and prevents more nitrate adsorbent.

Figure 4 shows the changes in nitrate removal efficiency relative to the retention time (duration of the contact). The changes in the efficiency of nitrate removal compared to the duration of the contact showed that by increasing the duration of contact from 1 to 6 hours, the S/N rate increased, indicating that the rate of removal of nitrate also increased in the duration of contact from 1 to 6 hours. After contact time of 6 hours, the S/N rate goes down

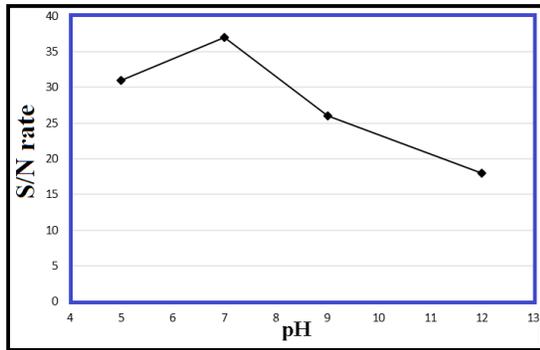


Figure 3: Changes in the efficiency of nitrate removal relative to pH

that indicate a reduction in the removal efficiency after that value. This result can be explained by the fact that, the high nitrate removal efficiency in the first 6 hours for crushed leaves of palm tree, crushed wheat straw and beech woodchips is due to the available space for adsorbent. By filling these spaces after 6 hours, the nitrate removal efficiency also decreases. This result is consistent with the results of Naseri [30]. The researchers showed that nitrate adsorbent was carried out at high speed in the early minutes and, as time went on, the adsorption decreased.



Figure 4: Changes in the efficiency of nitrate removal relative to retention time

Figure 5 shows the changes in the efficiency of nitrate removal relative to the adsorbent mass. Changes in the efficiency of nitrate removal, compared to the adsorbent mass, showed that with increase the mass adsorbent, the S/N rate increase and it indicates that the rate of removal of nitrate increased with increase of adsorbent

mass to 30 g, and after the adsorbing mass of 30 g, the S/N rate has a downward trend, that indicate a decrease in the removal efficiency after the adsorbent mass takes that value. This result can be explained by the fact that, as the adsorbent mass increases, the adsorption surface also increases, and the continuation of this process causes the adsorbent particles to join together and find the agglomeration state, thereby reducing the adsorbent surface, which produces decreasing on nitrate removal efficiency. Other research results also confirm the theory that by increasing the amount of adsorbent, adsorption capacity increases (Jaafarzadeh [31]; Tehrani-Bagha [32]) and by increasing the amount of adsorbent over the optimal amount, efficiency of nitrate removal, is reduced (due to the reduction of the effective surface of adsorbent)(Janos [33]).

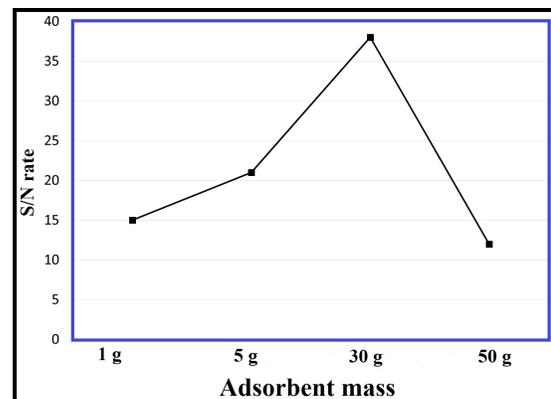


Figure 5: Changes in the efficiency of nitrate removal relative to adsorbent mass

According to Table ??, the optimum conditions for nitrate removal using Taguchi analysis shows that all the factors studied in this research play an important role in the process and optimal values to achieve maximum efficiency Nitrate removal.

Table 3: Optimal levels of parameters examined

| Factor | Best answer |
|---|-------------|
| adsorbent type | Palm leaves |
| Retention time (h) | 6 |
| Adsorbent mass (g) | 30 |
| pH | 7 |
| Initial concentration of nitrate (mg/L) | 20 |

Qualitek-4 software uses the sensitivity analysis technique to determine the effect of parameters studied on the process of nitrate removal from treated water. Table 4 shows the percent contribution of each agent to the nitrate removal efficiency. According to Table 4, the type of adsorbent used has the most effect on the process of nitrate removal from aqueous solutions and acidity in this process has the least effect.

Table 4: Determination of the percentage of each agent's contribution to the nitrate removal efficiency

| Factor | Factor's impact (%) |
|---|---------------------|
| adsorbent type | 28,3 |
| Retention time(h) | 24,6 |
| Adsorbent mass (g) | 21,6 |
| pH | 12,3 |
| Initial concentration of nitrate (mg/L) | 13,2 |

4. Conclusion

The results of this study showed that the process of nitrate removal from aqueous solutions is affected by adsorbent mass, initial concentration of nitrate, acidity, contact time and type of adsorbent. By increasing the adsorbent mass, initial concentration of nitrate, acidity, contact time to optimum, the nitrate removal efficiency also increases. After crossing the optimum point, with increase of adsorbent mass, the initial concentration of nitrate, acidity, the contact time, the decreasing in nitrate removal efficiency. Also, from the studied adsorbents, broken leaves of palm trees have a higher nitrate removal efficiency than other adsorbents. Therefore, the leaves of palm tree can be used as an economic adsorbent and with the lowest technology in the removal of nitrate from aqueous solutions.

5. Bibliography

- [1] S.J. Jafari, G. Moussavi, and K. Yaghmaeian. High-rate biological denitrification in the cyclic rotating-bed biological reactor: Effect of COD/NO₃⁻, nitrate concentration and salinity and the phylogenetic analysis of denitrifiers. *Bioresource technology*, 197:482–488, 2015.
- [2] J.A. Camargo and Á. Alonso. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: a global assessment. *Environment international*, 32(6):831–849, 2006.
- [3] M.G. Rupert. Decadal-scale changes of nitrate in ground water of the united states, 1988-2004. *Journal of Environmental Quality*, 37(5Supplement):S–240, 2008.
- [4] W.A. Jackson, L.E. Asmussen, E.W. Hauser, and A.W. White. Nitrate in surface and subsurface flow from a small agricultural watershed. *Journal of Environmental Quality*, 2(4):480–482, 1973.
- [5] S. Ghafari, M. Hasan, and M.K. Aroua. Bio-electrochemical removal of nitrate from water and wastewater-a review. *Bioresource technology*, 99(10):3965–3974, 2008.
- [6] R.F. Spalding and M.E. Exner. Occurrence of nitrate in groundwater-a review. *Journal of environmental quality*, 22(3):392–402, 1993.
- [7] R. Djeribi and O. Hamdaoui. Sorption of copper (II) from aqueous solutions by cedar sawdust and crushed brick. *Desalination*, 225(1-3):95–112, 2008.
- [8] A.T. Paulino, L.B. Santos, and J. Nozaki. Removal of Pb₂⁺, Cu₂⁺, and Fe₃⁺ from battery manufacture wastewater by chitosan produced from silkworm chrysalides as a low-cost adsorbent. *Reactive and functional polymers*, 68(2):634–642, 2008.
- [9] H. Aydın, Y. Bulut, and Ç. Yerlikaya. Removal of copper (ii) from aqueous solution by adsorption onto low-cost adsorbents. *Journal of Environmental Management*, 87(1):37–45, 2008.
- [10] U.S. Orlando, A.U. Baes, W. Nishijima, and M. Okada. Preparation of agricultural residue anion exchangers and its nitrate maximum adsorption capacity. *Chemosphere*, 48(10):1041–1046, 2002.
- [11] A. Keränen, T. Leiviskä, O. Hormi, and J. Tanskanen. Removal of nitrate by modified pine sawdust: Effects of temperature and co-existing anions. *Journal of environmental management*, 147:46–54, 2015.
- [12] Z. Wang, H. Guo, F. Shen, G. Yang, Y. Zhang, Y. Zeng, and S. Deng. Biochar produced from oak sawdust by lanthanum (la)-involved pyrolysis for adsorption of ammonium (NH₄⁺), nitrate (NO₃⁻), and phosphate (PO₄³⁻). *Chemosphere*, 119:646–653, 2015.
- [13] H. Demiral and G. Gündüzoğlu. Removal of nitrate from aqueous solutions by activated carbon prepared from sugar beet bagasse. *Bioresource technology*, 101(6):1675–1680, 2010.
- [14] M. Farasati, N. Jafarzadeh, S. Boroomand, H. Moazed, J. Abedi-Kupae, and M. Seyedian. Use of agricultural nano adsorbents for nitrate removal from aqueous solutions. *Iran Water Resources Research*, 8(3):28–38, 2013.
- [15] L. Divband-Hafshejani, A. Hooshmand, A. Naseri,

- A. Soltani-Mohammadi, and F. Abbasi. Compare of biochar and vermicompost sugarcane bagasse performance on nitrate removal from contaminated water and determine the optimum conditions for adsorption process. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 10(1):104–116, 2016.
- [16] M. Norisepehr, S. Golbaz, and S. Jarghi. Comparison of chitosan function as adsorbent for nitrate removal using synthetic aqueous solution and drinking water. *Journal of Environmental Health Engineering*, 1(1):11–19, 2013.
- [17] A. Bafkar and N. Baboli. Investigation of the efficiency of nitrate removal from aqueous solution using oak leaf nanostructure adsorbent. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(5):233–247, 2018.
- [18] M. Safdari, M.T. Qhaneian, M.H. Ehrampoush, A.R. Babaee, M.M. Emamjomeh, and S. Zareii. Study of efficacy of date kernel ash on removal of nitrate from aqueous solutions (isothermic and kinetic study). *Journal of Shahrekord University of Medical Sciences*, 16(6):48–56, 2015.
- [19] M. Marezi, M. Farahbakhsh, and S. Kheial. Kinetics and isotherm of nitrate sorption from aqueous solution using biochar. *Water and Soil Science*, 26(1-1):145–158, 2016.
- [20] G. Taguchi. *System of experimental design: Engineering methods to optimize quality and minimize costs*, volume 1? UNIPUB/Kraus International Publications, 1987.
- [21] G. Taguchi, S. Chowdhury, and S. Taguchi. *Robust engineering*. McGraw-Hill, New York, 1987.
- [22] R.K. Roy. *Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement*. John Wiley & Sons, 2001.
- [23] G. Taguchi, S. Konishi, and S. Konishi. *Taguchi methods: orthogonal arrays and linear graphs. tools for quality engineering*. Dearborn, MI: American Supplier Institute, 2000.
- [24] R.K. Roy. *A primer on the Taguchi method, competitive manufacturing series*. Van Nostrand Reinhold International, New York, 1990.
- [25] S. Park. *Robust design and analysis for quality engineering*. Boom Koninklijke Uitgevers, 1996.
- [26] S. Azizian. Kinetic models of sorption: a theoretical analysis. *Journal of colloid and Interface Science*, 276(1):47–52, 2004.
- [27] X. Song, X. Cheng, X. Yang, D. Li, and R. Linghu. Correlation between the bond dissociation energies and impact sensitivities in nitramine and polynitro benzoate molecules with polynitro alkyl groupings. *Journal of hazardous materials*, 150(2):317–321, 2008.
- [28] K. Akhtar, M.W. Akhtar, and A.M. Khalid. Removal and recovery of uranium from aqueous solutions by trichoderma harzianum. *Water Research*, 41(6):1366–1378, 2007.
- [29] M. Malakootian, K. Yaghmaian, and M. Tahergorabi. The efficiency of nitrate removal in drinking water using iron nano-particle: determination of optimum conditions. *The Journal of Toloo-e-behdasht*, 10(2):35–44, 2011.
- [30] S. Naseri, B. Heibati, A. Asadi, F.H. Gholrستاني, and A. Dargahi. Performance evaluation of modified pumice on removal nitrate from aqueous solution: kinetic studies and adsorption isotherm. *The Journal of Toloo-e-behdasht*, 12(1):143–154, 2013.
- [31] N. Jaafarzadeh, H. Amiri, and M. Ahmadi. Factorial experimental design application in modification of volcanic ash as a natural adsorbent with fenton process for arsenic removal. *Environmental technology*, 33(2):159–165, 2012.
- [32] A.R. Tehrani-Bagha, H. Nikkar, N.M. Mahmoodi, M. Markazi, and F.M. Menger. The sorption of cationic dyes onto kaolin: Kinetic, isotherm and thermodynamic studies. *Desalination*, 266(1-3):274–280, 2011.
- [33] P. Janoš, H. Buchtová, and M. Rýznarová. Sorption of dyes from aqueous solutions onto fly ash. *Water research*, 37(20):4938–4944, 2003.

Hydraulic evaluation of energy dissipation in four types of buffer basins, under variable flow conditions

Luis Vásquez^{*,a}, Nelson Terrones^b

^aFacultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cajamarca, Perú.

^bFacultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú.

Abstract.- The present investigation is focused on experimentally determining the dissipation of hydraulic energy for different types of buffer basins. For this purpose, a series of tests were developed in the laboratory under six flow conditions, so that six experimental data per bowl were obtained. The structures under study are type I, II, III and IV bowls according to the classification of the U.S. Bureau of Reclamation; bowls that dissipate energy mainly by the formation of the hydraulic shoulder and secondly by the presence of deflector dies, impact blocks and exit thresholds. Each bowl has been designed and sized according to the characteristics of the variable slope channel, for flow conditions tested with Froude numbers between 4,08 and 5,99. Finding that the type III damper bowl is the one that best dissipates the energy with the shortest bowl length for flows close to the design, with the disadvantage that the length of the hydraulic shoulder for flow rates far beyond exceeds the length of the bowl; while for all the flow rates tested, the type IV damping bowl presents the highest values of energy dissipation with hydraulic projections formed inside the bowl, with a better return of flow downstream.

Keywords: hydraulic jump; energy dissipation; specific energy; stilling basin.

Evaluación hidráulica de la disipación de energía en cuatro tipos de cuencos amortiguadores, bajo condiciones de flujo variable

Resumen.- La presente investigación está enfocada en determinar de manera experimental la disipación de energía hidráulica para diferentes tipos de cuencos amortiguadores. Para tal propósito, se desarrolló en laboratorio una serie de ensayos bajo seis condiciones de flujo, de manera que se obtuvieron seis datos experimentales por cuenco. Las estructuras en estudio son los cuencos tipo I, II, III y IV según la clasificación de la U.S. Bureau of Reclamation; cuencos que disipan la energía principalmente por la formación del resalto hidráulico y en segunda medida por la presencia de dados deflectores, bloques de impacto y umbrales de salida. Cada cuenco ha sido diseñado y dimensionado de acuerdo a las características del canal de pendiente variable, para las condiciones de flujo ensayadas con números de Froude entre 4,08 y 5,99. Se encontró que el cuenco amortiguador tipo III es el que disipa mejor la energía con menor longitud de cuenco para caudales cercanos al de diseño, con la desventaja que la longitud del resalto hidráulico para caudales alejados de este supera la longitud del cuenco; mientras que para todos los caudales ensayados el cuenco amortiguador tipo IV presenta los mayores valores de disipación de energía con resaltos hidráulicos formados dentro del cuenco, restituyendo mejor el flujo aguas abajo.

Palabras clave: resalto hidráulico; disipación de energía; energía específica; cuenco amortiguador.

Recibido: 07 de diciembre, 2018.

Aceptado: 09 de mayo, 2019.

1. Introducción

En el mundo existen miles de estructuras hidráulicas tipo vertedero de pared gruesa (rebosadero) que cumplen la función de regular o derivar flujos de agua, en las que su ubicación

genera una energía potencial que tiene que ser disipada, aguas abajo, para devolver al sistema sus condiciones naturales de flujo en su posterior recorrido. En un inicio, el ingeniero tenía que hacer uso del sentido común en el diseño de presas ya que carecía de los conocimientos más indispensables para prever las consecuencias de su emplazamiento como elemento obstructor del flujo y, desde luego, para proyectar la solera o el pie de aquella. El conocimiento del fenómeno del resalto hidráulico y las posteriores investigaciones

* Autor para correspondencia:

Correo-e: luvasram@hotmail.com (L. Vásquez)

realizadas por Gibson, Riegel y Bebe (1917), Safranzen (1927) y otros muchos a partir de la década de los treinta fueron fundamentales en la concepción y diseño hidráulico [1]. Investigadores como Peterka [2] en la década de los sesenta, presentan estudios experimentales orientados a la disipación de energía a partir del resalto hidráulico controlado, planteándose cuatro tipos de cuencos amortiguadores (I, II, III y IV) según la clasificación de la U.S. Bureau of Reclamation.

En la actualidad, investigadores como Ead y Rajaratnam [3], Chanson [4], Alikhani y Fathi [5], orientan sus trabajos experimentales al estudio del resalto hidráulico y la disipación de energía para estructuras con cuencos amortiguadores no convencionales, conscientes que el conocimiento general es insuficiente a la hora de diseñar estructuras singulares. Así mismo, Nasiri, Kavianpour y Haghighi [6], encuentran que debido a la característica fluctuante inherente del salto hidráulico, el piso del cuenco amortiguador está sujeto a variaciones de presión, lo que resulta en una inestabilidad de dicha estructura debido a las fuerzas de levantamiento. Liu y Zhu [7], cuando estudian la estructura del resalto hidráulico para números de Froude en el intervalo (2; 3,32), encuentran que la energía cinética de turbulencia máxima en cada sección disminuye linealmente con la distancia longitudinal dentro del salto y gradualmente se nivela en la región de transición, en contraposición con Gualtieri y Chanson [8] quienes, al experimentar con números de Froude altos en el intervalo (5, 2; 14, 3), llegaron a la conclusión que las capas de difusión de aire se estabilizan a longitudes mucho más grandes.

Manrique [9], en su investigación determina que la relación entre la pérdida de energía y la energía inicial ($\Delta E/E_1$) varía en proporción directa con el número de Froude. Esta aseveración permitirá evaluar la disipación de energía respecto a diversas condiciones de flujo en el canal de pendiente variable de manera que se logre demarcar dos aspectos: la disipación que genera el cuenco en función del número de Froude y el caudal.

Por otro lado, Ortega [10] determina que el porcentaje de disipación está entre un 65 % y un 86 % para los caudales representativos de

la estructura, observando que la disipación es inversamente proporcional al caudal. Adicionalmente, se realizaron modificaciones a este tipo de disipador colocando una viga intermedia que permitió sumergir el resalto hidráulico y de este modo disminuir su longitud, llegando a obtener disipaciones entre un 68 % y un 87 % conservando la relación inversa entre caudal y disipación. Las dos estructuras disipadoras propuestas en la investigación generan una considerable disipación cumpliendo con los requerimientos del flujo a la salida de la estructura, confirmando la eficiencia de estas en las obras de control y restitución de flujo.

Nasiri [6], Hassanpour [11] y Abbas [12], han investigado el efecto de los parámetros geométricos e hidráulicos en el resalto hidráulico y su influencia en la disipación de la energía en los cuencos amortiguadores utilizando bloques amortiguadores con diferentes configuraciones, teniendo como base los cuencos convencionales; estos resultados generan nuevas incógnitas que tienden a profundizar el conocimiento, ya que si se tiene en cuenta que se está variando la rugosidad general, según el tamaño y ubicación de cada bloque, es lógico pensar que se tendrán condiciones de flujo particulares en cada distribución analizada. Por ello Shahid [13] y Mortazavi [14] investigan los efectos del flujo en dos fases agua-aire y la presión interna en el resalto hidráulico enfocándolo a la estabilidad del cuenco amortiguador. En [15] intentan, a partir de una ecuación semi-analítica, estimar la longitud del resalto hidráulico, la cual es limitada, pues a pesar de sus 387 series de datos utilizadas para su calibración y validación, no se puede generalizar, limitando su aplicación a condiciones de flujo validadas.

La disipación de energía en la descarga de vertederos sobre cuencos amortiguadores a partir del resalto hidráulico ha recibido mucha atención en los últimos años, pues según Palermo y Pagliara [16], la importancia del tema aún requiere importantes esfuerzos por parte de la comunidad científica. A saber, la predicción de las longitudes principales del salto hidráulico y la disipación de energía sigue siendo una pregunta abierta, ya que el conocimiento real sobre el tema no cubre

todas las configuraciones posibles y condiciones de contorno que generalmente se pueden encontrar en aplicaciones prácticas. En particular, los efectos de la rugosidad del lecho, la pendiente de este, la geometría del canal y la concentración del aire en la relación de las profundidades del conjugado aún no se comprenden completamente.

La presente investigación busca ampliar el conocimiento sobre la predicción de las longitudes principales del salto hidráulico y la disipación de energía, analizando la relación funcional entre dichas variables a través de la experimentación en cuatro tipos de cuencos amortiguadores comunmente utilizados, según la U.S. Bureau of Reclamation (USBR), que por la naturaleza de uso deben funcionar bajo condiciones de flujos variable, dado que, en la realidad, la gran mayoría de cuencos amortiguadores de estructuras de almacenamiento o derivación descargan sus flujos en lechos naturales compuestos por materiales de rigidez mucho menor a la del material utilizado en la construcción del cuenco amortiguador, lo que conlleva a problemas de erosión y socavación aguas abajo de la descarga, que genera la desestabilización estructural del cuenco, comprometiendo en muchos casos también la estabilidad del rebosadero.

2. Aspectos teóricos

2.1. Resalto hidráulico

El resalto o salto hidráulico es un fenómeno local que se presenta en flujo rápido variado, el cual siempre va acompañado por un aumento súbito del tirante y una pérdida de energía bastante considerable (disipada principalmente como calor), en un tramo relativamente corto. Ocurre en el paso brusco de régimen supercrítico (rápido) a régimen subcrítico (lento).

En un resalto se pueden realizar las siguientes observaciones:

1. Antes del resalto, cuando el agua todavía escurre en régimen rápido, predomina la energía cinética de la corriente, parte de la cual se transforma en calor (pérdida de energía) y parte en energía potencial (incremento del

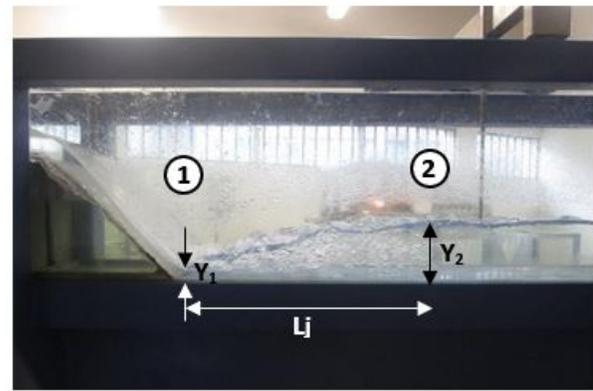


Figura 1: Elementos del resalto hidráulico.

tirante); siendo ésta la que predomina después de efectuado el fenómeno.

2. En la Figura 1 las secciones 1 y 2 marcan esquemáticamente el principio y el final del resalto. Los tirantes y_1 y y_2 se denominan tirantes conjugados, donde:
 - y_2 : tirante conjugado mayor.
 - y_1 : tirante conjugado menor.
3. E_1 es la energía específica antes del resalto y E_2 es la energía específica que posee la corriente después de él. Pues la energía específica en la sección 2 es menor que en 1 debido a las fuertes pérdidas de energía útil que el fenómeno ocasiona; esta pérdida o disipación se presenta como: $\Delta E = E_1 - E_2$.

2.2. Ecuación general del resalto hidráulico

Ya que la pérdida de energía asociada con el resalto hidráulico se desconoce al inicio, la aplicación de la ecuación de energía antes y después del resalto no proporciona un medio adecuado de análisis, siendo más adecuada la aplicación de la cantidad de movimiento en el estudio del fenómeno, debido a la gran variación de la velocidad media entre los dos extremos del resalto y al hecho de que no se requiere conocer los cambios de energía interna [17]. Aplicando la ecuación de la cantidad de movimiento, considerando que se satisfacen las siguientes condiciones:

1. El canal es horizontal y de sección constante, pudiendo desprejarse la componente del peso del fluido.

2. Se deprecia la resistencia de fricción originada en la pared del canal, debido a la poca longitud del tramo en que se desarrolla el resalto.
3. Se considera que la distribución de velocidades en las secciones 1 y 2 de la Figura 1, es prácticamente uniforme y que los coeficientes de Boussinesq son: $\beta_1 = \beta_2 = 1$.

Resulta la ecuación (1).

$$\delta Q(V_1 - V_2) = F_{P_1} - F_{P_2} \quad (1)$$

Donde:

- ρ : Densidad del fluido [kg/m³].
- Q : Flujo volumétrico [m³/s].
- V_1, V_2 : Velocidades de flujo [m/s].
- F_{P_1}, F_{P_2} : Fuerzas hidrostáticas [N].

A partir de la ecuación (1) se logra determinar la ecuación (2) de la energía específica, de la cual se deduce la ecuación general del resalto hidráulico, ecuación (3).

$$\frac{Q^2}{gA_1} + \bar{y}_{G_1}A_1 = \frac{Q^2}{gA_2} + \bar{y}_{G_2}A_2 \quad (2)$$

$$\bar{y}_{G_2}A_2 - \bar{y}_{G_1}A_1 - \frac{Q^2}{g} \left(\frac{A_2 - A_1}{A_1A_2} \right) = 0 \quad (3)$$

Donde:

- g : aceleración de la gravedad [m/s²].
- A_1, A_2 : Áreas de sección transversal [m²].
- $\bar{y}_{G_1}, \bar{y}_{G_2}$: Profundidad de centros de gravedad [m].

Para el caso de la sección rectangular, utilizada en la presente investigación, \bar{y}_{G_1} y \bar{y}_{G_2} están representadas por la mitad del tirante y_1 y y_2 respectivamente, resultando la ecuación (4).

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{8(F_{r1})^2 + 1} - 1 \right) \quad (4)$$

Ecuación que permite calcular el tirante conjugado mayor en un canal de sección rectangular, conocido el tirante menor y el número de Froude (F_{r1}) indicado en la ecuación (5).

$$F_{r1} = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}} \quad (5)$$

2.3. Estabilidad de resalto hidráulico

Lo que determina el sitio de formación del resalto y la estabilidad de este resulta de la comparación entre las energías que se tengan en las secciones 2 y n . Se pueden presentar tres casos [18]:

1. $E_2 > E_n$: en este caso la energía en la sección 2 es mayor que la existente en n , por lo que puede pensarse fácilmente que para que no exista discontinuidad en las energías a lo largo del canal, el resalto tendrá que ser barrido, como se muestra en la Figura 2.

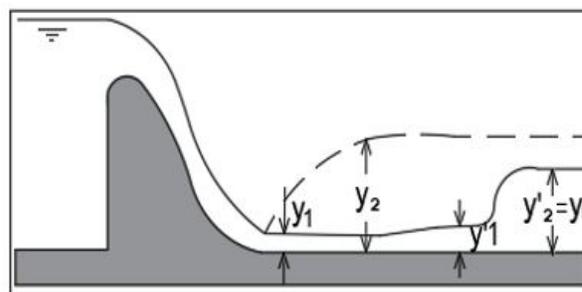


Figura 2: Resalto barrido ($E_2 > E_n$) [18].

2. $E_2 = E_n$: representado en la Figura 3, es el caso más conveniente y el más estable, ya que se genera el resalto justamente en el lugar deseado (al pie de la estructura o del canal de llegada); sucede que las pérdidas generadas en el resalto son exactamente las deseadas para igualar la energía en n y el flujo no precisa barrerse para generar más energía. Por lo que el resalto será claro.

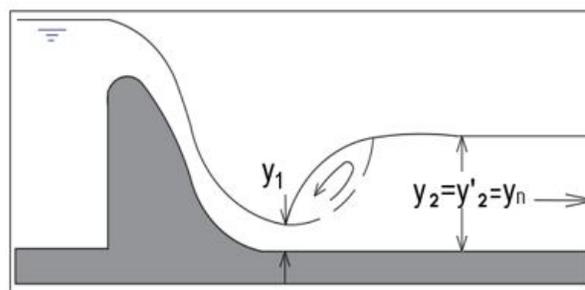


Figura 3: Resalto claro ($E_2 = E_n$) [18].

3. $E_2 < E_n$: cuando ocurre esto, como se aprecia en la Figura 4, la energía en la sección n por

ser mayor que la energía remanente del resalto en 2, y por estar determinada la energía de la sección en su mayor parte por la altura de presión (tirante) se presentará un resalto ahogado.

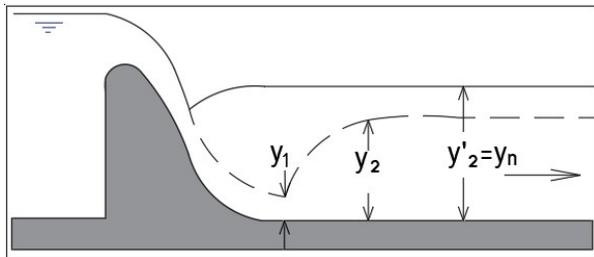


Figura 4: Resalto ahogado ($E_2 < E_n$) [18].

2.4. Disipación de energía hidráulica

Con el objetivo de minimizar los efectos debido a las perturbaciones introducidas en el régimen natural por la ejecución de un aprovechamiento hidráulico, se hace necesario que la restitución de los caudales se haga en condiciones que se aproximen lo más posible a las condiciones naturales. Siendo así, se requiere que el exceso de energía, creada por la ejecución del aprovechamiento, se disipe sin que se verifiquen erosiones significativas en el lecho del río, aguas debajo de las obras, las cuales podrían poner en peligro su estabilidad [19].

2.5. Resalto hidráulico como disipador de energía

Chow [18] define la importancia del resalto hidráulico como disipador de energía y menciona que su mérito está en prevenir la posible erosión aguas abajo de un vertedero, rápidas o compuertas deslizantes, debido a que reducen rápidamente la velocidad del flujo sobre un piso protegido hasta un punto donde el flujo pierde su capacidad de socavar el lecho del canal natural aguas abajo. El resalto hidráulico utilizado como disipador de energía a menudo se confina parcial o totalmente en un tramo del canal que se conoce como cuenco de disipación, cuyo fondo se recubre para resistir la socavación. El cuenco disipador rara vez se construye para confinar toda la longitud de un resalto hidráulico libre sobre la zona revestida, debido a que sería

muy costoso. A menudo se instalan accesorios para controlar el resalto dentro del cuenco. El control tiene ventajas adicionales, debido a que mejora la función de disipación del cuenco, estabiliza la acción del resalto y, en algunos casos, incrementa el factor de seguridad [18].

2.6. Pérdida o disipación de Energía (ΔE)

La pérdida de energía en el resalto hidráulico es igual a la diferencia de las energías específicas antes y después del resalto. La pérdida se calcula a partir de la ecuación (6).

$$\Delta E = \left(y_1 + \frac{(v_1)^2}{2g} \right) - \left(y_2 + \frac{(v_2)^2}{2g} \right) \quad (6)$$

Operando esta ecuación se tiene la ecuación (7).

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(y_1 - y_2)^3}{4y_1y_2} \quad (7)$$

Para French [20], la relación $\Delta E/E_1$ representa generalmente la pérdida o disipación de energía relativa, así como E_2/E_1 , define la eficiencia de disipación.

2.7. Cuencos amortiguadores de resalto hidráulico

La gran mayoría de las obras evacuadoras de crecidas, así como las presas derivadoras, utilizan este tipo de disipador de energía. La extensa experimentación desarrollada por USBR, entre 1952 y 1954, permitió entregar recomendaciones para diseñar estas obras con gran seguridad. Como se ha indicado, el número de Froude del torrente caracteriza el tipo de resalto en el tanque. Algunos diseños consultan bloques de impacto, para acortar la longitud del tanque, bloques dispersores del chorro en la entrada para dispersar mejor el torrente entrante, y umbrales de salida con bloques para asegurar la altura de aguas abajo y el control del resalto dentro del tanque [21].

2.8. Descarga en vertederos de pared gruesa tipo cimacio

La descarga en vertederos de pared gruesa como se muestra en la Figura 5, se puede determinar

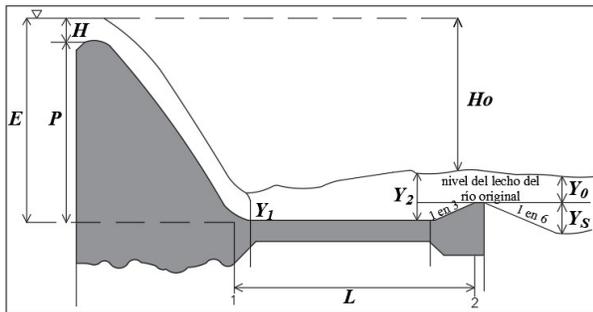


Figura 5: Esquema de rebosadero con cuenco de amortiguación de resalto hidráulico [22].



Figura 6: Rebosadero de doble curvatura y cuenco amortiguador por resalto hidráulico.

a partir de la ecuación (8), denominada ecuación general de vertederos.

$$q = C_d(H)^{\left(\frac{3}{2}\right)} \quad (8)$$

Donde:

- q : Caudal unitario (Q/B) [m^2/s].
- B : Ancho del canal [m].
- H : Carga hidráulica [m].
- C_d : Coeficiente de descarga.

3. Desarrollo de la Investigación

La investigación consta de tres fases:

3.1. Concepción, diseño y construcción de estructuras de disipación

Las estructuras de disipación seleccionadas en la presente investigación fueron los cuencos tipo I, II, III y IV según la clasificación de la USBR, por la presencia común en la gran mayoría de estructuras hidráulicas importantes, que deben funcionar bajo condiciones de flujo diferentes.

Los cuencos amortiguadores tipo I, II, III y IV fueron dimensionados con la metodología del USBR, en el canal de pendiente variable con sección rectangular de 25 cm \times 30 cm y 6 m de largo, limitados por la altura útil en el canal sobre el rebosadero, por lo que se trabajó con un rebosadero de doble curvatura (tipo Creager), de acrílico, con una altura $P = 15$ cm con radios de curvatura de 2,5 cm y 1 cm y una longitud de base total de 12 cm en la posición que se muestra en la Figura 6, dimensiones ideales para conseguir cargas hidráulicas H que generen en la sección

comprimida números de Froude (F_r) típicos de resaltos estables.

Se dimensionaron los cuencos amortiguadores para una misma condición de flujo con cargas hidráulicas sobre el rebosadero, limitadas por la altura del canal de pruebas en el rango de 0 a 10 cm, tomando por conveniencia como carga teórica de diseño $H = 5$ cm, que generaría en la descarga un caudal teórico de $0,00612 \text{ m}^3/s$, un tirante comprimido ($y_1 = 1,21$ cm), y un número de Froude de 5,9 que encaja dentro de la clasificación de resaltos estables ($4,5 < F_r < 9$). El diseño de los cuencos amortiguadores tipo I, II, III y IV, quedaron definidos con sus elementos (dientes, bloques y umbrales) indicados en cada una de las Figuras 7, 8, 9 y 10 respectivamente, con las dimensiones siguientes:

- Tipo I: con una longitud $L = 57,27$ cm y una altura de umbral $h = 1,51$ cm.
- Tipo II: con una longitud $L = 37,87$ cm, $w_1 = h_1 = e_1 = 1,21$ cm, $w_2 = 1,42$ cm, $h_2 = 1,89$ cm y $e_2 = 1,42$ cm.
- Tipo III: con una longitud $L = 23,00$ cm, $w_1 = 1,21$ cm, $h_1 = 2,42$ cm, $e_1 = 3,02$ cm, $w_3 = 1,45$ cm, $h_3 = 1,94$ cm, $e_3 = 1,45$ cm y $h_4 = 1,63$ cm.
- Tipo IV: con una longitud $L = 56,80$ cm, $w = 1,21$ cm, $h = 2,42$ cm, y $e = 3,02$ cm.

Para generar condiciones de flujo variable, se seleccionaron seis caudales de prueba para cada

tipo de cuenco, que fueron para cargas hidráulicas H próximas a 4,5; 5,0; 5,5; 6,0; 6,5 y 7,0 cm limitados por las ondas generadas por las fluctuaciones antes de conseguir el caudal de prueba, ya que la altura máxima disponible (sin generar desborde) en el canal de experimentación fue de 10 cm.

1. Cuenco amortiguador tipo I: la Figura 7 muestra el cuenco tipo I, donde la disipación de energía se da a través de un resalto hidráulico que ocurre en una superficie plana sin elementos de disipación adicionales.

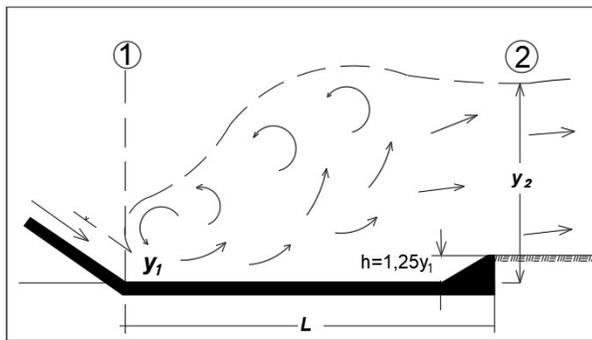


Figura 7: Cuenco de amortiguamiento tipo I [2].

2. Cuenco amortiguador tipo II: es mostrado en la Figura 8, compuesto por dados en la entrada del cuenco (aguas arriba) y un umbral dentado en la salida (aguas abajo).

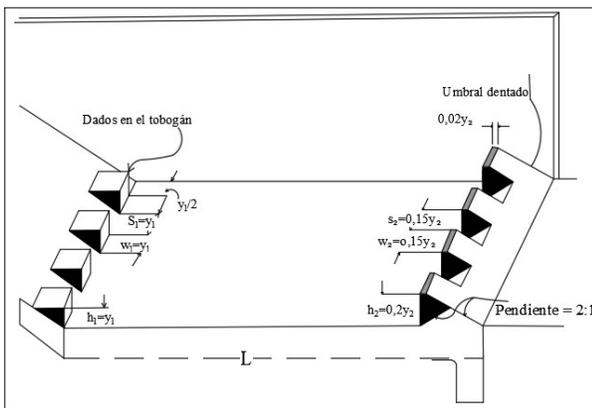


Figura 8: Dimensiones del cuenco tipo II [23].

3. Cuenco amortiguador tipo III: cuencos más cortos que los del tipo II, y poseen un umbral de salida y bloques de impacto aguas abajo de

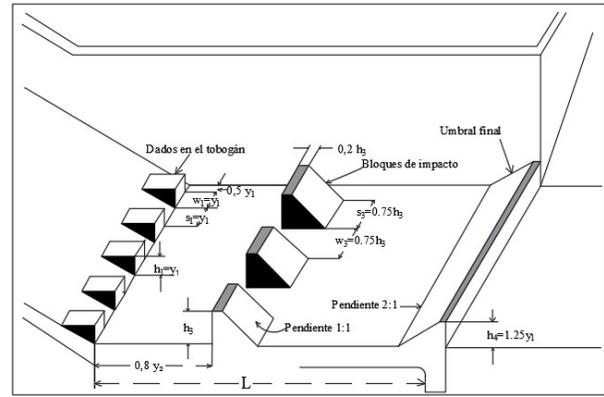


Figura 9: Dimensiones del cuenco tipo III [23].

los dados de caída, cuya distribución se ilustra en la Figura 9.

4. Cuenco amortiguador tipo IV: como puede visualizarse en la Figura 10, este cuenco amortiguador utiliza grandes dados en la rápida. Algunas veces es necesario emplear amortiguadores de ondas para asegurar una corriente tranquila, aguas abajo.

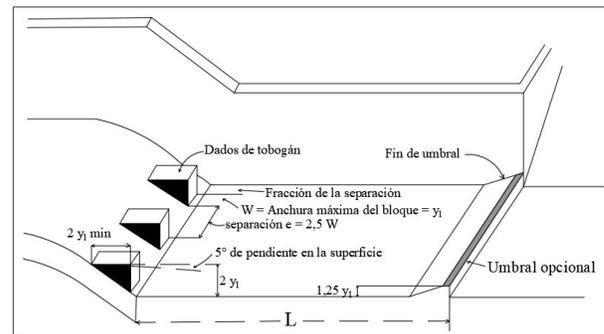


Figura 10: Dimensiones del cuenco tipo IV [23].

3.2. Experimentación y recolección de datos

Una vez construidos los cuencos amortiguadores, se puso en marcha el estudio experimental en cada una de las 4 estructuras de disipación así como en la condición sin cuenco amortiguador; pues cada una de ellas fueron ensayadas en laboratorio bajo las 6 condiciones de flujo, midiéndose en forma directa para cada uno de los 30 ensayos:

- La carga hidráulica H sobre el rebosadero, como se muestra en la Figura 11.

- Los tirantes conjugados mayor y_2 , menor y_1 y la longitud del resalto L en cada cuenco amortiguador.

Para poder estimar con caudales en cada condición de flujo se calibró el rebosadero de doble curvatura tipo Creager, con el método volumétrico para siete caudales diferentes con un ajuste gráfico, relacionando la carga hidráulica H y el caudal unitario q .



Figura 11: Medición de tirantes en modelo de laboratorio.

3.3. Procesamiento de datos

Los datos experimentales obtenidos en los 30 ensayos de laboratorio fueron registrados mediante las fichas de observación permitiendo determinar a partir de ellos, las principales variables físicas, como:

- Caudales volumétricos Q , a partir del caudal unitario q obtenido por medio de la ecuación de ajuste experimental en función de la carga hidráulica H medida.
- Velocidades de flujo (V_1 , V_2), calculadas con los caudales Q obtenidos en el ítem anterior y los tirantes y_1 y y_2 medidos en cada ensayo.
- Energías específicas (E_1 , E_2), calculadas a partir de las variables medidas y calculadas, utilizando las ecuaciones (6) y ((7)).

En el proceso experimental se han identificado como variables independientes el caudal de flujo

volumétrico Q y el tipo de cuenco amortiguador; mientras que como variables dependientes se tiene: la disipación de energía ($\Delta E = E_1 - E_2$) y la longitud del resalto hidráulico L_j . El procesamiento estadístico de datos es del tipo descriptivo y los resultados para su interpretación serán presentados en gráficos de barras y de dispersión, relacionando las variables independientes y dependientes en estudio.

4. Análisis y discusión de resultados

4.1. Ajuste experimental de la ecuación del caudal de descarga en rebosadero de doble curvatura.

En todo estudio experimental es importante la precisión, por lo que las descargas fueron obtenidas para cada cuenco amortiguador luego de un ajuste experimental para la ecuación (8), con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,998$, resultando la ecuación (9):

$$q = 3,1587(H)^{1,6539} \quad (9)$$

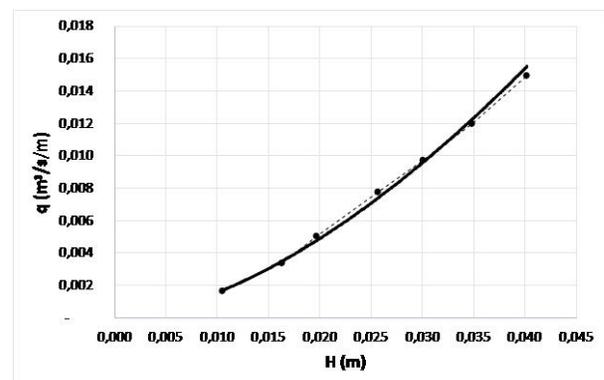


Figura 12: Ajuste experimental de la relación caudal unitario (q) contra la carga hidráulica (H).

En la Figura 12, se muestra la curva de ajuste que permitió encontrar los caudales de prueba para las seis condiciones de carga ensayadas para cada cuenco amortiguador.

4.2. Relación entre la disipación de energía (ΔE) y el caudal (Q)

El comportamiento de la disipación de energía en función de los caudales experimentales se muestra

en la Figura 13, pues en ella se puede observar que la mayor disipación se produjo para el caudal de 0,00562 m³/s llegando a disipaciones de: 60,09 %; 60,10 %; 54,86 %; 59,93 % y 61,70 % para el rebosadero sin cuenco de amortiguamiento, cuenco tipo I, II, III, y IV respectivamente.

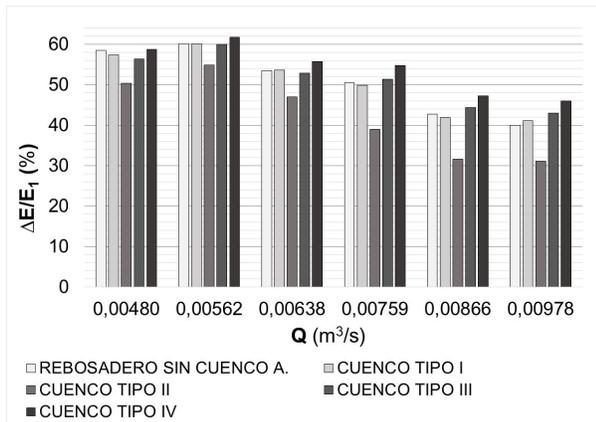


Figura 13: Relación de la disipación de energía relativa ($\Delta E/E_1$) contra el caudal (Q).

Para el caudal experimental menor a 0,00562 m³/s el porcentaje de disipación disminuye al igual que para los caudales mayores a dicho valor; esto implica que las estructuras de amortiguamiento cumplen mejor su función de disipación bajo este caudal, valor obtenido con la carga hidráulica de ($H = 0,05$ m), poniendo en evidencia el mejor funcionamiento de las estructuras para valores cercanos al caudal teórico de diseño ($Q = 0,00612$ m³/s). También se puede observar que, a medida que el caudal incrementa, la disipación de energía disminuye, estableciéndose una relación inversa entre estas dos variables, lo que concuerda con lo encontrado por Ortega [10].

4.3. Relación entre la disipación de energía (ΔE) y el número de Froude (F_r)

En la Figura 14, se observa el comportamiento de la disipación de energía en función del número de Froude, notándose un aumento en la disipación a medida que el número de Froude va creciendo, generándose una relación directa entre estas dos variables.

Por otro lado, se puede apreciar que el número de Froude en el proceso experimental está comprendido en el intervalo (4,08; 5,99),

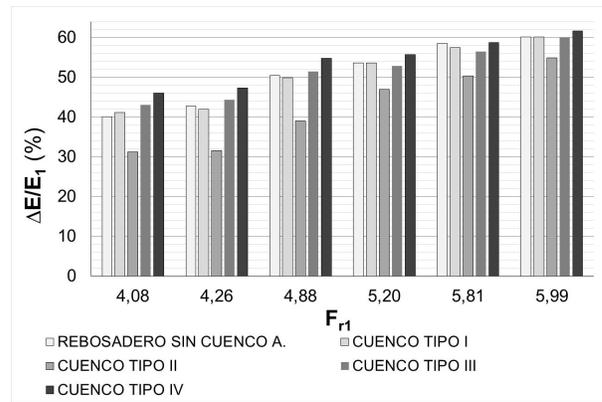


Figura 14: Relación de la disipación de energía relativa ($\Delta E/E_1$) contra el número de Froude (F_{r1}).

valores que entran en una clasificación de resalto estable. Teóricamente la disipación de energía por resalto hidráulico estable está entre 40 % y 50 %; experimentalmente se puede apreciar que los valores de la disipación de energía generados solo por resalto hidráulico (ensayo en rebosadero sin cuenco de amortiguamiento) están comprendidos entre 40,07 % y 60,09 %, porcentajes cercanos a los valores teóricos.

4.4. Relación entre la longitud del resalto hidráulico (L_j) y el caudal (Q)

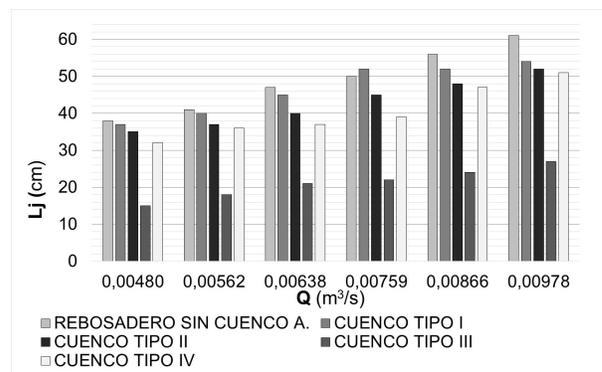


Figura 15: Relación de la longitud de resalto (L_j) contra el caudal (Q).

En la Figura 15 se puede observar que el máximo control sobre el resalto lo genera el cuenco tipo III, logrando una longitud de resalto mínima de 15,00 cm para un caudal de 0,00480 m³/s y una longitud de resalto máxima de 27,00 cm para un caudal de 0,0978 m³/s, esto en comparación

con los 38 cm y 62 cm de longitud mínima y máxima de resalto para el rebosadero sin cuenco de amortiguamiento bajo las mismas condiciones de flujo, evidencia un control mucho mayor del cuenco tipo III en comparación a las demás estructuras. Además, se puede notar que la longitud del resalto se incrementa a mayor caudal, evidenciando una relación directa entre estas dos variables.

4.5. Relación entre la longitud del resalto hidráulico (L_j) y la disipación de energía (ΔE)

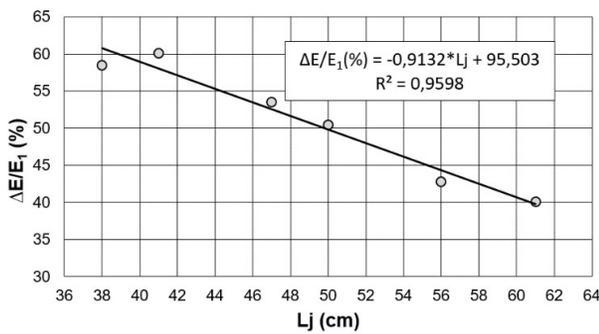


Figura 16: Relación de la longitud de resalto hidráulico (L_j) contra la disipación de energía relativa ($\Delta E/E_1$) en rebosadero sin cuenco amortiguador.

En la Figura 16 se observa una línea de tendencia con pendiente negativa, de la que se puede inferir que a medida que se aumenta la longitud del resalto, se reduce la disipación de energía considerando que el coeficiente de determinación es cercano a uno. Esto implica que la mejor disipación lograda por el cuenco corresponde a una longitud donde el resalto es claro, estable y contenido dentro del cuenco; además, a medida que el resalto va ganando distancia, la disipación disminuye, formando un resalto con ondulaciones muy marcadas que se desplazan a una gran distancia aguas abajo.

En la Figura 17 se observa una línea de tendencia con pendiente negativa, de la que se puede inferir que a medida que se aumenta la longitud se reduce la disipación de energía en virtud que el coeficiente de determinación es cercano a uno. Además, para este cuenco tipo I la longitud del resalto va desde 37 cm a 54 cm, manteniendo en todo momento el

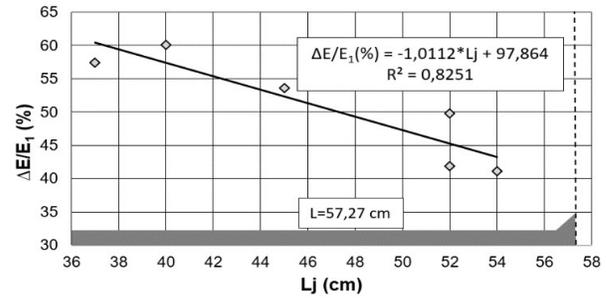


Figura 17: Relación de la longitud de resalto hidráulico (L_j) contra la disipación de energía relativa ($\Delta E/E_1$) en cuenco tipo I.

resalto dentro de su estructura, ya que la longitud de diseño del cuenco amortiguador es de 57,27 cm.

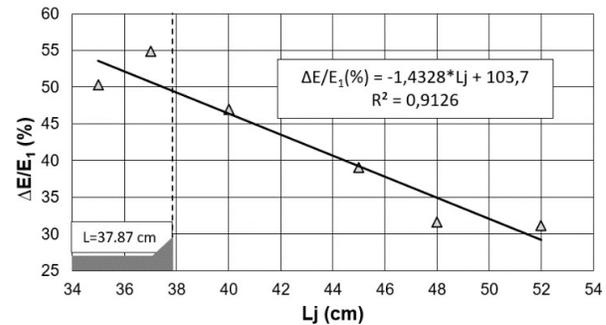


Figura 18: Relación de la longitud de resalto hidráulico (L_j) contra la disipación de energía relativa ($\Delta E/E_1$) en cuenco tipo II.

Para el cuenco tipo II de la Figura 18, la longitud de resalto va desde 35 cm hasta 52 cm disminuyendo la longitud en función del cuenco tipo I, sin embargo, para caudales mayores o iguales a $0,00638 \text{ m}^3/\text{s}$ el resalto se genera fuera del cuenco (longitud de diseño de cuenco de 37,87 cm), lo que significa que el dissipador ya no cumple su función de contener el resalto dentro de su estructura.

Para el cuenco tipo III, cuyos resultados se muestran en la Figura 19, se infiere que a medida que se aumenta la longitud del resalto se reduce la disipación de energía en virtud que el coeficiente de determinación para la línea de tendencia es cercano a uno. Además, se puede notar que es la estructura de mayor control sobre el resalto generando longitudes que van desde los 15 cm a los 27 cm, sin embargo, para caudales mayores o iguales a $0,00866 \text{ m}^3/\text{s}$, parte del resalto se genera

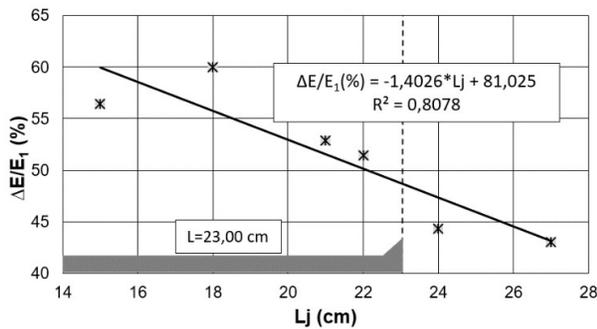


Figura 19: Relación de la longitud de resalto hidráulico (L_j) contra la disipación de energía relativa ($\Delta E/E_1$) en cuenco tipo III.

fuera del cuenco por lo que no cumple con su función de retener el resalto ya que la longitud de diseño del cuenco es de 23 cm.

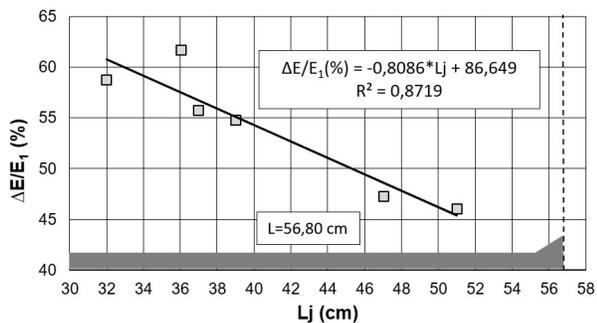


Figura 20: Relación de la longitud de resalto hidráulico (L_j) contra la disipación de energía relativa ($\Delta E/E_1$) en cuenco tipo IV.

Para el cuenco tipo IV (Figura 20), las longitudes del resalto que van desde 32 cm para el caudal menor hasta 51 cm para el caudal mayor, todos los resaltos se desarrollan dentro de la longitud de diseño del cuenco de 56,80 cm.

5. Conclusiones.

Para las condiciones de flujo ensayadas con números de Froude en el intervalo (4,08; 5,99), el cuenco amortiguador tipo III es el que disipa mejor la energía con menor longitud de cuenco para caudales cercanos al de diseño con la desventaja que la longitud del resalto hidráulico para caudales alejados de éste supera la longitud del cuenco, mientras que para todos los caudales ensayados el cuenco amortiguador tipo IV presenta los

mayores valores de disipación de energía con resaltos hidráulicos formados dentro del cuenco, restituyendo mejor el flujo, aguas abajo.

La disipación de energía y la longitud del resalto hidráulico claramente indican una fuerte tendencia decreciente, con coeficientes de determinación (R^2) que superan el 80 % para todas las condiciones de flujo ensayadas tanto para el rebosadero sin cuenco amortiguador como en los cuencos tipo I, II, III y IV (según la USBR).

6. Referencias

- [1] J. Díez-Cascón y F. Bueno. *Ingeniería de presas: presas de fábricas*. Universidad de Cantabria, 2001.
- [2] A. Peterka. *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*. Engineering Monograph N° 25, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, United States, 1964.
- [3] S. Ead and N. Rajaratnam. Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(7):656–663., 2002.
- [4] H. Chanson. *Hidráulica del flujo en canales abiertos*. McGraw-Hill, 2002.
- [5] A. Alikhani, R. Behrozi-Rad, and M. Fathi-Moghadam. Hydraulic jump in stilling basin with vertical end sill. *International journal of physical sciences*, 5(1):25–29, 2010.
- [6] K. Nasiri, M. Kavianpour, and S. Haghghi. The baffle blocks effects of pressure characteristics on USBR III basin floor. In *Advances in Hydrology and Hydraulic Engineering*, volume 212-213 of *Applied Mechanics and Materials*, pages 821–825. Trans Tech Publications Ltd, 10 2012.
- [7] M. Liu, N. Rajaratnam, and D. Zhu. Turbulence structure of hydraulic jumps of low froude numbers. *Journal of hydraulic engineering*, 130(6):511–520., 2004.
- [8] C. Gualtieri and H. Chanson. Experimental analysis of froude number effect on air entrainment in the hydraulic jump. *Environmental Fluid Mechanics*, 7(3):217–238., 2007.
- [9] V. Manrique. *Comportamiento del resalto hidráulico en canales con pendiente y sección rectangular*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2013.
- [10] B. Ortega. *Análisis experimental para la optimización de la disipación de energía a la salida del túnel de desvío del proyecto hidroeléctrico sopladora*. Trabajo Especial de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2012.
- [11] N. Hassanpour, A. Hosseinzadeh, D. Farsadizadeh, and C. Gualtieri. An experimental study of hydraulic jump

- in a gradually expanding rectangular stilling basin with roughened bed. *Water*, 9(12), 2017.
- [12] A. Abbas, H. Alwash, and A. Mahmood. Effect of baffle block configurations on characteristics of hydraulic jump in adverse stilling basins. In *MATEC Web of Conferences*, volume 162, 2018.
- [13] I. Shahid. Investigation of hydraulic jump due to two phase air - water flow in a rectangular duct. *International Journal on Design & Manufacturing Technologies*, 9(2):12–18, 2015.
- [14] M. Mortazavi, V. Le Chenadec, P. Moin, and A. Mani. Direct numerical simulation of a turbulent hydraulic jump: turbulence statistics and air entrainment. *Journal of Fluid Mechanics*, 797:60–94., 2016.
- [15] S. Movahed, J. Mozaffari, D. Davoodmaghami, and M. Akbari. A semi-analytical equation to estimate hydraulic jump length. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(4):1001–1006, 2018.
- [16] M. Palermo and S. Pagliara. A review of hydraulic jump properties on both smooth and rough beds in sloping and adverse channels. *Acta Sci. Pol. Formatio Circumiectus*, 16(1):91–105, 2017.
- [17] G. Sotelo. *Hidráulica de canales*. UNAM, México, 2002.
- [18] V. Chow. *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw Hill, Bogotá, Colombia, 1994.
- [19] A. Coutinho y C. Robles. *Manual de Ingeniería Hidráulica*. Universidad Pública de Navarra, España, 1998.
- [20] R. French. *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw Hill, México, 1988.
- [21] H. Mery. *Hidráulica aplicada al diseño de obras*. Ril Editores, Santiago de Chile, Chile, 2013.
- [22] P. Novak, A. Moffat, C. Nalluri y R. Narayanan. *Estructuras hidráulicas*. McGraw Hill, Bogotá, Colombia, 2001.
- [23] E. Martínez, P. Batanero, I. Martínez, E. Martínez y E. González. *Diseño de pequeñas presas*. Editorial Bellisco, Madrid, España, 2007.

Comparison of different methods with lysimeter measurements in estimation of rice evapotranspiration in Sari Region

Maryam Babae^a, Ahmad Shokat-Naghadeh^b, Hedieh Ahmadpari^a, Mohammad Nabi-Jalali^{*,c}

^a M.Sc. Graduate of Irrigation and Drainage, University of Tehran, Iran.

^b M.Sc. Graduate of Irrigation and Drainage, University of Tarbiat Modarres, Iran.

^c Young Researchers Club and elites, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Abstract.- One of the important parts of the hydrological cycle is water requirement of plants. Evapotranspiration of plant is an important parameter in irrigation planning. Estimation of evapotranspiration for each vegetation is very necessary action. All of the empirical equations are not suitable for estimating potential evapotranspiration in a region, so the choice of the best method for estimating potential evapotranspiration in each region is necessary. Lysimetric measurements were conducted in 2015 year (during the rice cultivation season (May-September)) in the Khazar Abad area of Sari county. Using lysimetric data, evapotranspiration of rice plant (early maturity variety of *Tarom Hashemi*) was estimated in Sari county. The Ref-ET software was used to estimate potential evapotranspiration by Penman-Monteith, Penman, Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle, Makkink and Turc methods. The actual evapotranspiration (rice evapotranspiration) represents potential evapotranspiration multiplied by crop coefficients (K_c) at different stages of growth. The efficiency of all methods was evaluated using Root Mean Square Error ($RMSE$), Mean Absolute Error (MAE) and Coefficient of Determination (R^2) statistic parameters. The results showed that the Blaney-Criddle method with $RMSE = 0,54 \text{ mm}$, $MAE = 0,42$ and $R^2 = 0,728$ has the most consistent with lysimetric data. so the Blaney-Criddle method is the most suitable method for estimating the evapotranspiration of the rice plant in Sari region.

Keywords: rice evapotranspiration; lysimeter measurements; estimation methods.

Comparación de diferentes métodos con mediciones lisimétricas en la estimación de la evapotranspiración del arroz en la región Sari

Resumen.- Una de las partes importantes del ciclo hidrológico es el requerimiento de agua de las plantas. En tal sentido, la evapotranspiración es un parámetro importante en la planificación del riego, cuya estimación para cada vegetación es una acción muy necesaria. Existen diversos modelos empíricos para estimar la evapotranspiración potencial, sin embargo no todos se adecuan a diferentes regiones, de allí la importancia de seleccionar el más idóneo. En el presente estudio, se estimó la evapotranspiración de la planta de arroz (variedad de maduración temprana de *Tarom Hashemi*) en el condado de Sari, específicamente en el área de Khazar Abad, a través de mediciones lisimétricas durante la temporada de cultivo (mayo-septiembre 2015). Se usó el software Ref-ET, para estimar la evapotranspiración potencial por medio de los métodos Penman-Monteith, Penman, Hargreaves-Samani, Blaney - Criddle, Makkink y Turc. A partir de cuyos valores se obtuvo la evapotranspiración real del arroz, multiplicando por los coeficientes de cultivo (K_c) en las diferentes etapas de crecimiento. La eficiencia de todos los métodos se evaluó utilizando los parámetros estadísticos de error cuadrático medio ($RMSE$), error absoluto medio (MAE) y coeficiente de determinación (R^2). Los resultados mostraron que el método Blaney - Criddle con $RMSE = 0,54 \text{ mm}$, $MAE = 0,42$ y $R^2 = 0.728$ es el más consistente con los datos lisimétricos por lo tanto, y por ende es más adecuado para estimar la evapotranspiración de la planta de arroz en la región de Sari.

Palabras clave: evapotranspiración de arroz; mediciones lisimétricas; métodos de estimación.

Received: April 05, 2019.

Accepted: June 14, 2019.

1. Introduction

Demand for food due to high population growth and the share of agricultural sector in food production and water consumption, has increased the necessity of pay attention to management and

* Correspondence author:
e-mail:mohamad.jalali@srbiau.ac.ir (M. Nabi-Jalali)

increasing water productivity [1]. Rice in a large part of the Asian continent supplies more than 80 percent of the consumer calories for people [2]. Determining the amount of requirement water for evapotranspiration is one of the main factors in irrigation planning, and the exact estimation of this parameter is very difficult due to the environmental factors affecting it (such as air temperature, wind speed and solar radiation). Methods of evapotranspiration measurement are divided into three groups: direct methods, indirect methods (computational) and modern methods. In the past five decades, most studies by researchers have focused on developing methods for estimating evapotranspiration and improving the performance of existing methods. However, lysimeter is still the most accurate method for estimating the evapotranspiration of the reference plant [3], so that the accuracy of other methods is measured with it. A lysimeter is a measuring device which can be used to measure the actual evapotranspiration which is released by plants. By recording the amount of precipitation that an area receives and the amount lost through the soil, the amount of water lost to evapotranspiration can be calculated. Lysimeters are of two types: weighing and non-weighing [4]. There are different methods for estimating potential evapotranspiration (indirect methods), but the choice of the best methods for each region requires evaluating the performance of these methods using the lysimeter method [5].

Onnabi Milani and Neyshabouri [6] compared some empirical estimating methods of reference evapotranspiration in Tabriz plain using lysimeter and proposed a model for its determination from climatic data. Comparison between the measured and estimated E_{To} by various methods showed that the pan evaporation (class A) and Hargreaves methods had the highest and lowest correlation with lysimetric data, respectively. Based on the statistical analysis, Penman-Monteith method had the closest estimates to lysimetric measurement. In general, Penman-Monteith was introduced as a suitable method for estimating reference evapotranspiration in Tabriz plain. Zareabayneh *et al.* [7] compared Penman-Monteith FAO method and a class pan

evaporation with lysimeter measurements for estimation of rice evapotranspiration in Amol region. Obtained results by lysimeter showed, rice evapotranspiration in the first and second year of 578,5 (Tarom variety) and 481,6 mm (Khazar variety), respectively. This is due to a higher being during growth of Tarom variety in the first year than Khazar variety in the second year. However, a Tarom variety is long-term with tall plants. Increased during growth, and tall plant height, is effective in the amount of water. The maximum amount of K_c in the third stage of rice plant growth, for both years was 1,2. The minimum in the fourth stage, for both first and second years was 0,9. In the present study for both farming year, the value of K_c in the initial stage of growth, was 1,09 and 1,13 respectively. Two-year results showed that FAO method overestimate calculated crop evapotranspiration values by 4-5% in comparison of lysimeter measurements. Results showed that Eshnaider method is suitable for E_{To} estimation of pan coefficient and evaporation pan estimated E_{To} well in the study region. Estimation of E_{Tc} on the basis of pan evaporation data, Eshnaider pan coefficient and FAO modified crop coefficient showed only on the average 1,5% underestimation in comparison with actual ET (E_{Tc}). Therefore, this method is suitable and practical in the study region. Overall, the results showed that using appropriate methods for estimating reference crop evapotranspiration and the crop coefficient, evapotranspiration of rice can be calculated with good accuracy.

Applications and is suitable for different regions. Pouryazdankhah *et al.* [8] determined crop coefficient of Binam and Khazar cultivars of rice by lysimeter and controlled basins in Rasht region. In this study, evapotranspiration data for grass and rice i.e. Binam and Khazar cultivars were collected in Rice Research Institute of Rash, by using drainable lysimeter at ten-day periods during three consecutive crop seasons. The reference evapotranspiration was calculated and compared with 16 empirical equations results included in Ref-ET software. Significant differences of them have been evaluated using SPSS software. Also, the crop coefficient values were calculated for

each variety of rice. In all three equations i.e. Hargreaves, Priestley-Taylor and Penman (FAO 24) have not shown any significant differences. Among three methods, Hargreaves equation is recommended for Rasht region because, this equation as compared with others is a temperature-based method and would consider global warming phenomenon. Also, the average of crop coefficient (K_c) for Khazar and Binam in three consecutive crop seasons were 1,10 and 1,09 respectively.

Pirmoradian *et al.* [9] extracted the crop coefficients of three rice varieties based on ETo estimation method in Rasht region. This study was conducted to derivate K_c for three rice varieties, Hashemi as a local cultivar, Khazar as an improved cultivar and Bahar as a Hybrid cultivar, in paddy fields of Rice Research Institute of Iran in 2009 and 2010. The values of crop evapotranspiration (ETc) were measured with installing three cylindrical mini-lysimeter for each cultivar. Derivation of K_c were done based on five ETo estimation methods including FAO Penman-Monteith, Radiation, Blaney-Criddle, Pan Evaporation and Hargreaves. As a result, water requirements for Khazar (526 mm) and Bahar (490 mm) varieties were 14,6 and 6,8 percent higher than Hashemi (459 mm) cultivar, respectively. The crop coefficients were varied between 0,76 to 1,09 for initial stage; 1,15 to 1,48 for mid-season and 0,91 to 1,21 for late-season based on ETo estimation method and rice cultivar. Difference between the gained K_c in this study with the recommended values by FAO shows that derivation of crop coefficient based on local conditions is necessary. The obtained K_c based on different ETo methods can increase estimation accuracy of water requirement in availability limitation to meteorological data. Jensen *et al.* [10] estimated the evapotranspiration and irrigation water requirements by 20 methods in different regions and compared them with the results of lysimeter. The results showed that Penman-Monteith method has the best estimate. Due to lack of rainfall and inappropriate temporal and spatial distribution of rainfall, Iran is in the category of dry and semi-arid countries of the world [11]. Iran is a very large country with different climates.

Therefore, it is necessary to select the best indirect method for estimating evapotranspiration in each region according to meteorological data and to be used to formulate irrigation programs and apply them properly. Of course, proper studies have been conducted in some parts of Iran and specific methods have been proposed for those areas. But the number of studies have been conducted for estimate evapotranspiration in the paddy fields of Mazandaran province is very low. The purpose of this study was to investigate the best method for estimating rice evapotranspiration in situation the lack of lysimetric data in Khazar Abad area of Sari county.

2. Materials and methods

This research was conducted during a crop year in Mazandaran province, Sari county, in Hamid Abad village paddy fields. The research area is located in the northern part of Sari county (Khazar Abad region) with a longitude and latitude of $53^{\circ} 6'$ and $36^{\circ} 46'$, respectively. This area has a semi-mediterranean climate. Figure 1 shows the location of the paddy field. Table 1 presents the geographical and climatic characteristics of the study area. Physical and chemical characteristics of this field is presented in Tables 2 and 3.

Table 1: Geographical and climatic characteristics of the study area.

| Characteristic | Unit | Value |
|-----------------------------|------------------------------------|-------|
| Temperature | ($^{\circ}\text{C}$) | 17,9 |
| Relative humidity | (%) | 78 |
| Pressure | (kPa) | 101,4 |
| Wind speed at 10 m height | ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 1,92 |
| Altitude from the sea level | (m) | 23 |

Rice was cultivated in a farm of one hectare (1ha) in 2015 year (May-September). Rice cultivar in this research was Tarom Hashemi which is the dominant cultivation of the region. The amount of evapotranspiration of rice plant was measured using lysimeter during this period. In this research, used from three lysimeter with dimensions of $50 \times 50 \times 50$ cm. The depth of placement of the lysimeters

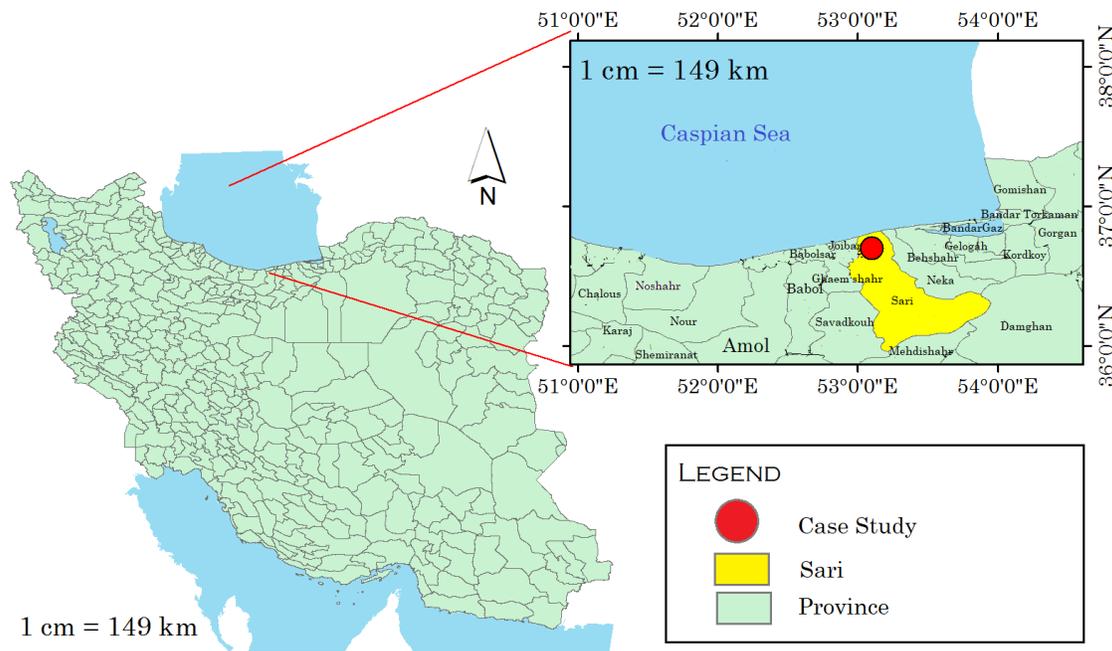


Figure 1: Location of the study area in Iran

Table 2: Physical characteristics of the studied farm soil

| Characteristic | Value |
|-----------------------------------|-------|
| Soil texture | Silt |
| Clay(%) | 44 |
| Silt(%) | 39 |
| Sand(%) | 17 |
| Bulk density($g \cdot cm^{-3}$) | 1,32 |
| Sampling depth | 0-30 |

Table 3: Characteristics of studied farm soil fertility

| Characteristic | Value |
|--|-------|
| EC($ds \cdot m^{-1}$) | 355 |
| PH saturated soil paste($mg.l^{-1}$) | 11,4 |
| OC($mg.l^{-1}$) | 0,17 |
| Total N | 2,07 |
| P ($mg.l^{-1}$) | 7,59 |
| K($mg.l^{-1}$) | 2,85 |

in the ground is 24 cm and height of the upper part of the lysimeters was 26 cm on the surface of the earth (according to the standard Japanese lysimeters). The first lysimeter used (Lysimeter A)

was without the floor plate and has plant bushes inside it. This lysimeter estimates the amount of evapotranspiration and deep percolation. The second lysimeter used (Lysimeter B) was without the floor plate, and was in contact from the up with air and water and from the down with soil. There is no plant in this lysimeter. The deep percolation and evaporation from free water surface are measured by this lysimeter. The third lysimeter used (Lysimeter C) has a metal floor, and its connection with the soil under the metal floor is interrupted and there is no plant inside it. This lysimeter estimates the amount of evaporation from free water surface. Figure 2 shows the apparent characteristics of the A, B, and C lysimeters.

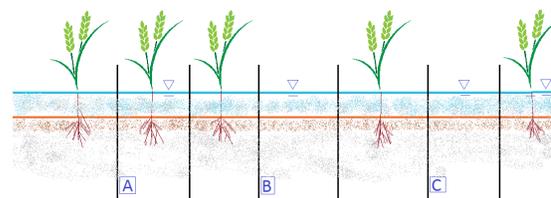


Figure 2: Apparent characteristics of the A, B, and C lysimeters.

Lysimetric data was measured at 7 o'clock in the morning every day. Meteorological data (daily)

was received from the nearest weather station (Dashte Naz) in the studied area in 2015 year (May-September) to estimate evapotranspiration of reference plant (ET₀). The Ref-ET software was used to estimate potential evapotranspiration by Penman-Monteith, Penman, Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle, Makkink and Turc methods. The crop coefficients (*K_c*) is a factor for considering the characteristics of the plant under study, such as leaf area, plant height, green cover percentage and plant canopy resistance. Table 4 shows the amount of crop coefficient at early stage, middle stage and final stage.

Table 4: Amount of crop coefficient at early stage, middle stage and final stage.

| early stage | middle stage | final stage |
|-------------|--------------|-------------|
| 1,05 | 1,20 | 1,05 |

The actual evapotranspiration (rice evapotranspiration) represents potential evapotranspiration multiplied by crop coefficients (*K_c*) at different stages of growth according to equation (1).

$$ET_c = ET \cdot K_c \quad (1)$$

The efficiency of all methods was evaluated using Root Mean Square Error (*RMSE*), Mean Absolute Error (*MAE*) and Coefficient of Determination (*R*²) statistic parameters. The statistical indices *RMSE*, *MAE* and *R*² are defined as equations (2), (3) and (4). The *RMSE* value indicates how much the predictions have estimated the measurements more or less and the *MAE* value represents the accuracy of the method and the mean value of the error. Whatever the value of the indicators is closer to zero, the better (the difference between the predicted and measured values is lower) [12]. The well-known *R*² statistic, or the (multiple) coefficient of determination, pertains to the proportion of variance in the response variable explained by a fitted model relative to simply taking the mean of the response. In other words, it describes how well the model fits the data. An *R*² close to 1 implies an almost perfect relationship

between the model and the data, whereas an *R*² close to 0 implies that just fitting the mean is equivalent to the model fitted [13].

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (s_i - o_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |s_i - o_i|}{n} \quad (3)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})(s_i - \bar{s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2 \sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2}} \right)^2 \quad (4)$$

In the above relations, *s* is the predicted value, *o* the observed value and *n* is the number of data.

3. Results and discussion

Excessive consumption of water in various sectors, especially agriculture, has caused water scarcity to be a serious crisis that threatens human life worldwide. To solve this problem is necessary to manage water resources. One of the most important factors in water resources management is the accurate estimation of water balance to be based on there could be proper planning for water resources and various uses. One of the important parameters in water balance is evapotranspiration. The accurate estimation of evapotranspiration in a region and on an annual scale is very difficult and requires a lot of time and cost [14]. Therefore, in this study, we have tried to use the lysimetric method for estimation of rice evapotranspiration in the Khazar Abad region and then, using its results, we can select the best method for the Khazar Abad region. The Ref-ET software was used to estimate potential evapotranspiration by Penman-Monteith, Penman, Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle, Makkink and Turc methods. The actual evapotranspiration (rice evapotranspiration) represents potential evapotranspiration multiplied by crop coefficients (*K_c*) at different stages of growth. Figure 3 shows the amount of rice evapotranspiration by different methods. The evapotranspiration estimates by all methods

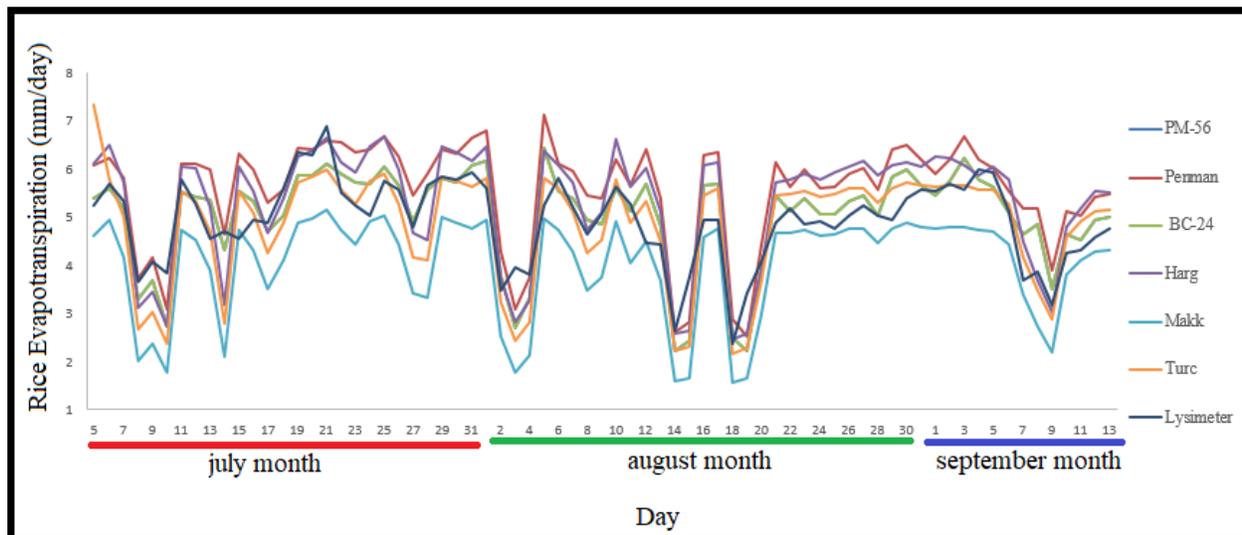


Figure 3: Comparison of rice evapotranspiration by different methods

shows the same trend throughout the crop year. Penman and Hargreaves-Samani methods give the highest estimation of evapotranspiration. The Makkink method give lowest estimation of evapotranspiration. The Makkink method estimate lower values of evapotranspiration with significant difference among different method. Makkink method is significantly different from lysimetric method. According to Figure 3, Blaney–Criddle method has the most conformity with the lysimetric method.

Figure 4 shows the amount of potential evapotranspiration by different methods. All methods were compared with lysimetric method.

According to Figure 4, the Penman-Monteith, Penman, Hargreaves-Samani, Blaney–Criddle, Makkink and Turc gave R^2 0,761; 0,701; 0,717; 0,728; 0,698 and 0,671 respectively. Comparisons of the selected methods against the lysimetric method showed that 4 methods have fairly good R^2 . Methods Turc and Penman-Monteith have the lowest and highest R^2 , respectively. Table 5 shows the values of statistical indices for different methods compared with lysimetric method. According to Table 5, the Blaney–Criddle method with $RMSE = 0,54$ mm, $MAE = 0,42$ and $R^2 = 0,728$ has the most consistent with lysimetric data. So the Blaney–Criddle method is the most suitable method for estimating the

evapotranspiration of the rice plant in Sari region. This conclusion is contradictory with the results of many research studies.

Many studies have confirmed the Penman-Monteith method as the most appropriate method in comparison with the lysimetric method. Nandarian *et al.* [15] compared of the FAO Penman-Monteith method and class A evaporation pan with lysimeter data in estimating evapotranspiration (*Cicer arietinum L.*) in Khorramabad. The aim of this research was to determine the crop coefficients of chickpea in a research field in Lorestan agriculture faculty in 2013 to find (*Cicer arietinum L.*) water requirement and different crop coefficients. For that, 4 drainable lysimeter was selected in which diameter and height were 0,45 and 0,8 m, respectively. The crop density was 50 plant per m^2 . The water requirement of chickpea was estimated equal to 438mm. The potential evapotranspiration also was estimated equal to 554,2mm. More ever, the best pan coefficient also was determined by comparing with lysimetric results. Different parameters such as $RESE$, MBE , MAE and R^2 were used to determine chickpea evapotranspiration. Finally, the results showed that the FAO model with error $RMSE$ 0,174 is an optimum model for this region and Snyder method was modified in the second accurately. The FAO Penman Monteith method

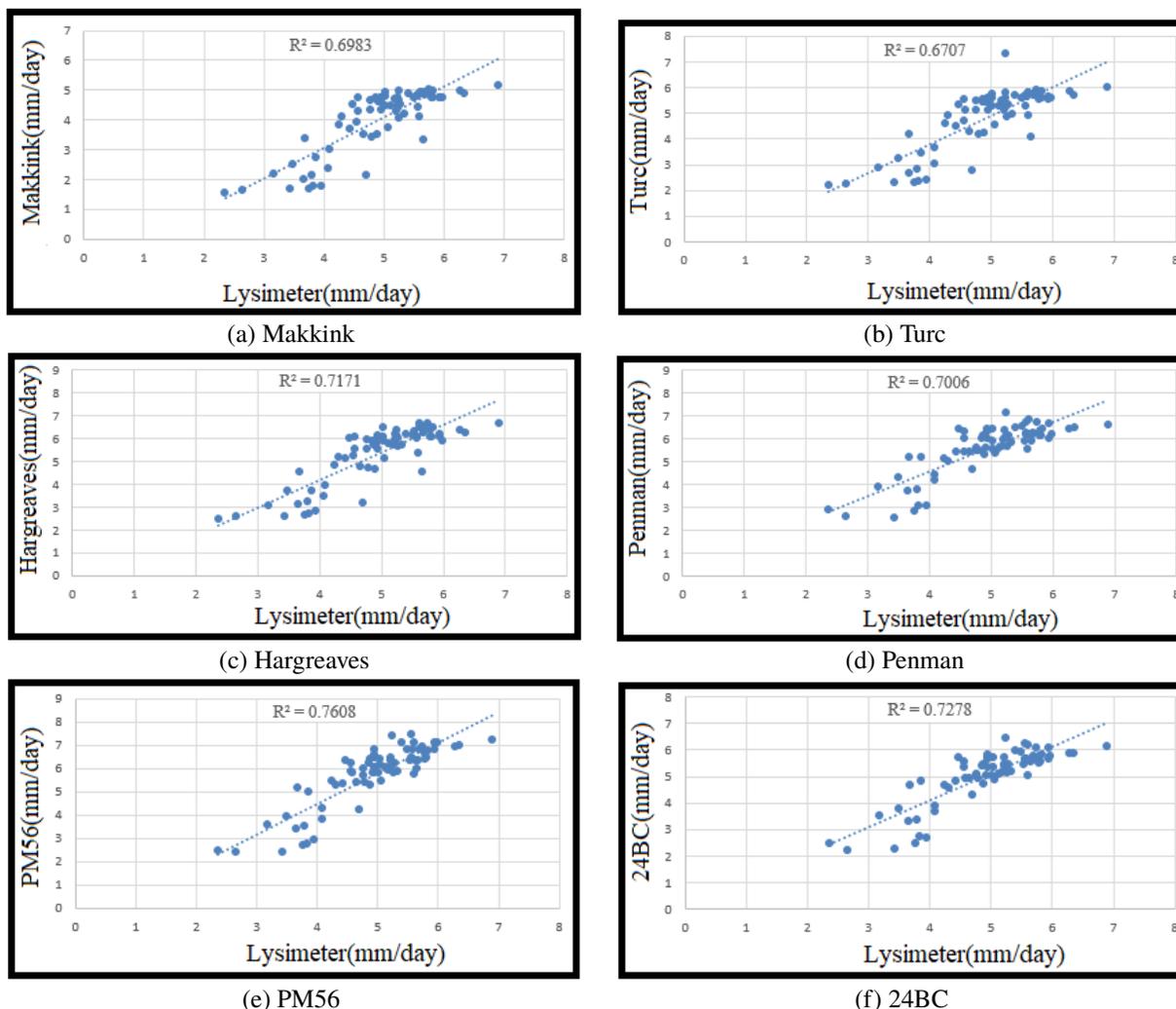


Figure 4: Estimation of potential evapotranspiration by different methods and comparison with lysimetric method

for calculating reference evapotranspiration in the region of 4,8 % less than the amount of the lysimeters. Raouf and Azizi Mobaser [16] evaluated of eighteen reference evapotranspiration models under the Ardabil climate condition. This study was conducted in Hangar research station of the University of Mohagheghe Ardabili, Ardabil. For this purpose, grass was planted in 3 lysimeters and around the lysimeters. Grass evapotranspiration measured by volumetric lysimeters based on water balance equation components (input and output water volume, save moisture and evapotranspiration), was estimated. To estimate reference evapotranspiration 18 models, including models such as temperature, radiation, and the combination was chosen. The meteorological

synoptic station of Ardabil was used to prepare the information needed to model. Besides the results of lysimeters, evapotranspiration obtained by the FAO Penman-Monteith model also was used as a reference for comparing the performance model. Evapotranspiration estimation models using statistical indices, root mean square error (*RMSE*), mean absolute error (*MAE*), the estimated margin of error (*PE*), the ratio (*MR*) and spearman's rho coefficient is calculated as follows to cross they were evaluated. The results showed that for all models, high dispersion of points around the line one to one, or answer them consistent with the results of lysimeters answer is not good. Moreover, some of these models overestimated and underestimated some of them

to calculate evapotranspiration. Using statistical indicators may be compared with the results of lysimeters, at the most proper research models, respectively Blaney–Criddle, Ravazzani and the Rn and the weakest models respectively Irmak and Valiantzas. Overall fit the model results against the results of the FAO Penman-Monteith model compared to its results compared to the results of lysimeters, was more suitable. Also according to the statistical criteria in this study, the FAO Penman-Monteith model, the most appropriate models were Turk, Berti and the Trajkovic, and the weakest models, modified Hargreaves-Samani, Irmak and Scandal were determined. Conclusion of this research conformity with the results of many research studies. Many studies have confirmed the Blaney–Criddle method as the most appropriate method in comparison with the lysimetric method. Piri [17] evaluated of different methods potential evapotranspiration in Sistan plain. In this study compares the evapotranspiration calculated by the Blaney–Criddle, Jensen Hayes, reform Jensen Hayes and Hargreaves-Samani to FAO Penman-Monteith method and lysimeter in Sistan plain than the way has been identified to be most correlated with the FAO Penman-Monteith. The results shown that Blaney–Criddle has maximum correlation coefficient (0,973 and 0,971) and Hargreaves-Samani method has minimum correlation coefficient (0,75 and 0,69) than other methods of calculating evapotranspiration. Ebrahimipak and Ghalebi [18] determined of evapotranspiration and crop coefficient (k_c) of sugar beet using lysimeter and compared it with experimental methods in Shahrekord. This study aimed at determining the evapotranspiration and crop coefficient (Kc) of sugar beet during the plant growth using drainage lysimeter by using water balance and experimental methods for three years in Shahrekord. After sugar beet planting and out of lysimeter, evapotranspiration was measured weekly and monthly by measuring the factors of the water- balance equation. Results showed that the total evapotranspiration of sugar beet was 1016,6 mm during the growing season and the rate of water drainage and the soil moisture content were 73,9 and 66,1 mm, respectively. The

amount of evaporation from class A pan was 1364,5 mm. Evapotranspiration of the reference plant was measured by using drainage lysimeter and estimated by using the experimental methods. Results showed that the evapotranspiration rate of the reference plant was 1123,03 mm and among the experimental methods, the Blaney- Criddle FAO24 and Penman-Monteith FAO 56 method had more accuracy. Crop coefficient at early stage, development stage, middle stage, and final stage was 0,72; 0,81; 1,04; and 0,7 with an average of 0,89 for the whole growing period of sugar beet. The average pan evaporation coefficient (Kp) was 0,83; and the average water requirement coefficient ($Kc.p$) was 0,73 for the growing season of sugar beet. so the Blaney–Criddle method is the most suitable method for estimating the evapotranspiration of the rice plant in Sari region.

Table 5: The values of statistical indices for different methods compared with lysimetric method

| Evapotranspiration equations | RMSE | MAE | R^2 |
|------------------------------|-------|------|-------|
| Penman-Monteith | 1,042 | 0,93 | 0,761 |
| Penman | 0,86 | 0,73 | 0,701 |
| Blaney–Criddle | 0,54 | 0,42 | 0,728 |
| Hargreaves-Samani | 0,76 | 0,60 | 0,717 |
| Makkink | 1,079 | 0,91 | 0,698 |
| Turc | 0,68 | 0,51 | 0,671 |

4. Conclusion

The Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture (Mazandaran province) seeks answers to the question of how freshwater resources can be developed and managed to feed the world's population and reduce poverty, while at the same time promoting environmental security. The Mazandaran province pays particular attention to rice as this crop is the most common staple food of the largest number of people on Earth (about 3 billion people). Climate change will affect rice water requirement through changes in rice physiology and phenology, soil water balance, evapotranspiration, and green water. Adapting with this major environmental challenge

is necessary to maintain or improve the current level of rice production in the future. The correct estimation of ET in the water balance equation allows for improved water management in rice cultivation. Evapotranspiration is a major factor affecting dry matter production, and hence, the agricultural production potential of a given region. Realistic evapotranspiration estimates are important to irrigation engineers, agronomists, and others involved in agricultural planning. Six evapotranspiration estimation methods (Penman-Monteith, Penman, Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle, Makkink and Turc) were compared with lysimetric method, in the Khazar Abad region. The evapotranspiration estimates by all methods shows the same trend throughout the crop year. Penman and Hargreaves-Samani methods give the highest estimation of evapotranspiration. The Makkink method give lowest estimation of evapotranspiration. The Makkink method estimate lower values of evapotranspiration with significant difference among different method. Makkink method is significantly different from lysimetric method. The Penman-Monteith, Penman, Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle, Makkink and Turc gave R^2 0,761; 0,701; 0,717; 0,728; 0,698 and 0,671 respectively. Comparisons of the selected methods against the lysimetric method showed that 4 methods have fairly good R^2 . All other methods, which tend to overestimate evapotranspiration were not suitable. The Blaney-Criddle method with $RMSE = 0,54$ mm, $MAE = 0,42$ and $R^2 = 0,73$ has the most consistent with lysimetric data. The Blaney-Criddle is the best method to estimate evapotranspiration in the study area. The Blaney-Criddle method can be used to get somewhat reasonable estimates.

5. Bibliography

- [1] C.M. Burt. The irrigation sector shift from construction to modernization: What is required for success? *Irrigation and drainage*, 62(3):247–254, 2013.
- [2] P.S. Gunnell and R.K. Webster, editors. *Compendium of rice diseases*. APS Press, Saint Paul, Minnesota, USA, 1992.
- [3] H. Ahmadpari, S.E. Hashemi-Garmdareh, and K. Ghalehkohne. Comparison of different methods of estimating potential evapotranspiration by FAO Penman Monteith (Case Study: Sepidan Region). *Nivar*, 41:13–22, 2017.
- [4] T. Davie. *Fundamentals of hydrology*. Routledge, 2008.
- [5] H. Zare-Abayneh, M. Bayat-Varkeshi, A. Sabziparvar, S. Marofi, and A. Ghasemi. Evaluation of Different Reference Evapotranspiration Methods and their Zonings in Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 42(4):95–109, 2011.
- [6] A. Onnabi-Milani and M. Neyshabouri. Comparison of Some Empirical Estimating Methods of Reference Evapotranspiration in Tabriz Plain Using Lysimeter and Proposing a Model for its Determination from Climatic Data. *Water and Soil Science*, 28(1):41–54, 2018.
- [7] H. Zare-Abayneh, H. Noori, A. Liaghat, H. Noori, and V. Karimi. Comparison of Penman-Monteith FAO Method and a Class Pan Evaporation with Lysimeter Measurements in Estimation of Rice Evapotranspiration in Amol Region. *Physical Geography Research Quarterly*, 43(76):71–83, 2011.
- [8] H. Pouryazdankhah, T. Razavipour, M.R. Khaledian, and M. Rezaei. Determining crop coefficient of Binam and Khazar cultivars of rice by lysimeter and controlled basins in Rasht region. *Agroecology*, 6(2):238–249, 2014.
- [9] N. Pirmoradian, F. Zekri, M. Rezaei, and V. Abdollahi. Derivation of crop coefficients of three rice varieties based on ETo estimation method in Rasht region. *Cereal Research*, 3(2):95–106, 2013.
- [10] M.E. Jensen, R.D. Burman, and R.G. Allen. Evapotranspiration and irrigation water requirements. Manual of Practice 70, American Society of Civil Engineers, New York, USA, 1990.
- [11] P. Mahmoudi, T. Tavousi, and A. Shahozaei. Drought and Its Effects on Groundwater Resources Quality in Sistan and Baluchestan Province. *Journal of Water Research in Agriculture*, 29(1):21–35, 2015.
- [12] H. Ahmadpari, E. Shokoohi, B. Falahpour-Sichani, E. Namdari-Gharghani, and B. Rigi-Ladez. Evaluation of the most appropriate statistical distribution for monthly rainfall prediction in the Zarrineh river watershed. *Specialty Journal of Biological Sciences*, 5(1):12–23, 2019.
- [13] L.J. Saunders, R.A. Russell, and D.P. Crabb. The coefficient of determination: what determines a useful R^2 statistic? *Investigative ophthalmology & visual science*, 53(11):6830–6832, 2012.
- [14] H. Ahmadpari, E. Shokoohi, N. Mohammadi-Lalabadi, M. Safavi-Gerdini, and M. Ebrahimi. Assessment of potential evapotranspiration estimation methods in the Fasa region. *Specialty Journal of Agricultural Sciences*, 5(2):56–66, 2019.
- [15] K. Namdarian, A. Naseri, Z. Izadpanah, and A. Maleki. Comparison of the FAO Penman-Monteith method and class A evaporation pan with lysimeter data in estimating evapotranspiration (*Cicer arietinum* L.) in

- Khorrarnabad. *Iranian Journal of Pulses Research*, 1394(1):92–99, 2015.
- [16] M. Raof and J. Azizi-Mobaser. Evaluation of Eighteen Reference Evapotranspiration Models under the Ardabil Climate Condition. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(6):227–241, 2018.
- [17] H. Piri. Assessment and comparison of estimating potential evapotranspiration in Sistan plain. *Journal of Physical Geography*, 6(19):99–114, 2013.
- [18] N.A. Ebrahimipak and S. Ghalebi. Determination of evapotranspiration and crop coefficient of sugar beet using lysimeter and its comparison with experimental methods in Shahrekord, Iran. *Journal of Sugar Beet*, 30(1):23–32, 2014.

Rolling friction of AISI 4140 steel in a ring on ring tribometer

J. E. Romero C.*^a, E. Rondón^b

^aCentro de Investigación en Materiales (CIM), Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

^bLaboratorio de Predicciones de la Escuela de Mecánica, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Abstract.- This paper shows the work done for the characterization of the behavior against rolling friction by AISI 4140 steel. Tests were performed of friction on rolling contact with a lubricant (R&O mineral ISO46), into a tribometer type ring on ring, using an experimental design based on an arrangement of Taguchi. The selected parameters, were: normal load (50 and 100 N), speed ratio (10-30 %) ratio and the time ($2,5 \times 10^5$ and $1,0 \times 10^6$ cycles). The result of the average friction coefficient is $\mu_{with\ lubricant} = 0,098536$ for assessed conditions. Of the three evaluated parameters, speed ratio turned out to be the most influential parameter for lubricated rolling friction by AISI 4140 steel.

Keywords: rolling friction; AISI 4140 steel; Taguchi method; tribology.

Fricción por rodamiento del acero AISI 4140 en tribómetro anillo sobre anillo

Resumen.- En el presente artículo se muestra el trabajo realizado para la caracterización del comportamiento ante la fricción por rodamiento del acero AISI 4140. Se realizaron ensayos de fricción por contacto rodante con un lubricante (mineral R&O ISO46), en un tribómetro tipo anillo sobre anillo, empleando un diseño experimental basado en un arreglo de Taguchi. Los parámetros seleccionados, fueron: La carga normal (50 y 100 N), la relación de velocidades (10 y 30 %) y el tiempo ($2,5 \times 10^5$ y $1,0 \times 10^6$ ciclos). El resultado del coeficiente de fricción promedio es $\mu_{con\ lubricante} = 0,098536$ para las condiciones evaluadas. De los tres parámetros evaluados, la relación de velocidades resultó ser el parámetro más influyente para la fricción por rodamiento con lubricante del acero AISI 4140.

Palabras clave: fricción por rodamiento; acero AISI 4140; método Taguchi; tribología.

Recibido: 01 de noviembre, 2018.

Aceptado: 16 de julio, de 2019.

1. Introducción

El acero AISI 4140, está entre los materiales empleados para el diseño de distintos elementos de máquinas como árboles de levas, engranajes y otros; pero la información de sus propiedades tribológicas es escasa y poco disponible.

Por este motivo se realizó un proyecto experimental [1], con el fin de obtener las características tribológicas, principalmente fricción y desgaste, del acero en cuestión y adicionalmente, incrementar el nivel de confianza de la base de datos que

provee el tribómetro anillo sobre anillo diseñado y fabricado por Heredia y Ledo [2].

El comportamiento friccional es afectado por una amplia lista de factores [3], como por ejemplo, la cinemática de las superficies en contacto y la aplicación externa de carga o el desplazamiento, lo que indica que el coeficiente de fricción no es una propiedad del material. Para la comprensión del comportamiento friccional de los materiales se han planteado distintas teorías: el modelo de adhesión, el modelo de energía de superficie, modelo de deformación plástica, el modelo de rugosidad, el modelo combinado adhesión-surcado-rugosidad y el modelo deformación-surcado-adhesión [3]. Este último, demuestra una mejor correlación entre el coeficiente de fricción teórico y el experimental [4].

La fricción se considera como la fuerza de

* Autor para correspondencia:

Correo-e: joromer@uc.edu.ve (J. Romero)

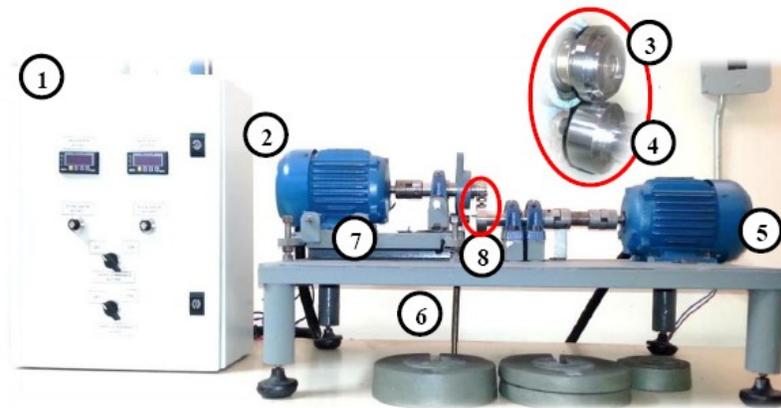


Figura 1: Arreglo general del tribómetro tipo anillo sobre anillo.

resistencia tangencial, en la frontera común entre dos cuerpos cuando, bajo la acción de una fuerza externa, un cuerpo se mueve o tiende a desplazarse con respecto a la superficie de la otra. Se distinguen principalmente dos clases de fricción, por deslizamiento y por rodamiento. La fricción por rodamiento implica a las superficies no concordantes, mientras que las superficies correspondientes al deslizamiento son concordantes. La razón entre la fuerza tangencial, F , y la carga normal aplicada, W , se conoce como el coeficiente de fricción (CoF) y es, $\mu = F/W$.

En el presente artículo se reportan los resultados de la caracterización realizada de la fricción por rodamiento en especímenes de acero AISI 4140 sin tratamiento térmico, con lubricación y a temperatura, presión y humedad normal de un laboratorio.

2. Metodología Experimental

En esta sección se describe el material de los especímenes de prueba, la configuración experimental y las técnicas utilizadas para medir las variables seleccionadas.

2.1. Especímenes de prueba

La fabricación de las probetas o especímenes de prueba se realizó mediante un mecanizado en torno, de acuerdo a la geometría y dimensiones especificadas por León y Pinto [5] en su investigación, a partir de un tocho de sección circular de 0,5715 m de diámetro y 0,5 m de

longitud de acero al cromo molibdeno AISI 4140 adquirido de un distribuidor local. Se obtuvieron 10 probetas con 20 mm de espesor y 50,8 mm de diámetro. En cuanto a la preparación, las probetas fueron limpiadas en un baño ultrasónico con alcohol y acetona, con la finalidad de eliminar en lo posible todo residuo en la superficie debido a la mecanización, se secaron con aire caliente y luego almacenadas para cada ensayo.

2.2. Ensayo de rugosidad y dureza

Se realizó una caracterización inicial del acero en estudio, al medir la rugosidad promedio, R_a , en sentido circunferencial, ya que éste corresponde al sentido del movimiento, donde se utilizó un rugosímetro de punta de diamante. Igualmente, se midió la dureza HRC en un durómetro tipo Rockwell. Ambas mediciones se realizaron en equipos disponibles en el Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.

2.3. Ensayo de fricción por rodamiento

Los ensayos de fricción por rodamiento se llevaron a cabo en un tribómetro tipo anillo sobre anillo (ring on ring or twin disc rig en inglés), ampliamente utilizado para evaluar las condiciones de contacto en engranajes [6, 7]. El tribómetro empleado es un desarrollo propio [2, 5] que se encuentra disponible en el Laboratorio de Predicciones de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo. El arreglo de tribómetro se muestra en la Figura 1 [2], el cual

consiste en dos ejes alineados, en planos paralelos, con un sistema de carga donde son colocadas las probetas.

La carga y la velocidad de rotación pueden ser variadas permitiendo ensayos flexibles. En este tribómetro, los discos son presionados uno contra otro para obtener la presión de contacto (Figura 1) y al energizar el aparato mediante su caja de control (1), se tiene el arranque del motor 1 (5) accionando el eje que contiene la probeta tipo B (4), mientras que el motor 2 (2) hace girar el eje de la probeta tipo A (3), siendo este último eje el que posee el sistema de la carga normal (6) aplicada sobre los especímenes y estando la probeta tipo B en contacto con el lubricante que se encuentra en el recipiente (8).

Los parámetros que se pueden controlar en el tribómetro descrito son la carga normal, velocidad de deslizamiento, la relación de velocidades y la duración (tiempo o ciclos) del ensayo. Los datos de la fricción se obtuvieron de manera indirecta, por medio de las variaciones de corriente (amperaje) en vacío y con carga del motor 1, mediante el equipo de variación de frecuencia, esto debido a que el equipo no dispone de un sensor para el torque axial, tal como sería un torquímetro de reacción (sensor del par de torsión dinámico) [2].

2.4. Diseño experimental

La matriz de ensayo se planificó en función de evaluar el comportamiento friccional en consideración de los tres parámetros antes mencionados: carga normal, relación de velocidad y tiempo, en dos niveles cada uno, para una aplicación en elementos de máquinas y tomando en cuenta las limitaciones del equipo de ensayo.

Los porcentajes de la relación de velocidades se ajustaron a situaciones promedio de deslizamiento que puedan estar sometidos elementos de máquinas tales como en dientes de engranajes rectos y helicoidales, considerando las velocidades de operación del tribómetro disponible. Para una relación de 10% se empleó 2000 rpm para el motor 1 y 2200 rpm para el motor 2 y para una relación de 30% se usó 2000 rpm y 2600 rpm, para el motor 1 y motor 2, respectivamente. La duración del ensayo escogida, hace referencia a la

posibilidad de reproducir el fenómeno de la fatiga superficial que podría presentarse a partir de 10^5 y 10^6 ciclos, en superficies de aceros altamente pulidas [8], seleccionando los valores de $2,5 \times 10^5$ y $1,0 \times 10^6$.

Así mismo, tomando en cuenta limitaciones de valores operacionales permisibles por el tribómetro, se optó por dos niveles de estudio para la carga normal aplicada: 50 N y 100 N. Los parámetros y niveles seleccionados son mostrados en la Tabla 1. En cuanto a las pruebas, se realizaron en condiciones de lubricación con aceite mineral con protección contra la herrumbre y la oxidación (R&O) de viscosidad ISO46 (cifras típicas disponibles en www.incaoil.net) y a temperatura ambiente, presión y humedad normal en laboratorio.

Se desarrolló un diseño experimental basado en la metodología de arreglos ortogonales de Taguchi (DET), debido a la limitación en la cantidad de material. El DET permitió optimizar las probetas disponibles y además, del análisis de la relación señal a ruido (S/N) que permite estadísticamente determinar la influencia en los resultados de los parámetros seleccionados. El procedimiento general de la aplicación de la metodología DET se describe en Roy [9]. Al aplicar esta metodología tomando como base los parámetros de ensayo se obtuvo la matriz ortogonal L_4 la cual se presenta en la Tabla 2.

Tabla 1: Parámetros y niveles del ensayo de fricción por rodamiento.

| Parámetros | Niveles | |
|---------------------------|-------------------|-------------------|
| | Bajo | Alto |
| Carga (N) | 50 | 100 |
| Relación de Velocidad (%) | 10 | 30 |
| Tiempo (Ciclos) | $2,5 \times 10^5$ | $1,0 \times 10^6$ |

2.5. Análisis de la relación señal a ruido (S/N)

Una vez ejecutada las pruebas prevista en el diseño experimental y obtenido los resultados para cada ensayo realizado, éstos pueden ser utilizados para determinar el efecto de los parámetros y los

Tabla 2: Matriz de ensayos.

| Experimento | Carga (N) | Relación de Velocidad (%) | Tiempo (Ciclos) |
|-------------|-----------|---------------------------|-------------------|
| 1 | 50 | 10 | $2,5 \times 10^5$ |
| 2 | 50 | 30 | $1,0 \times 10^6$ |
| 3 | 100 | 10 | $1,0 \times 10^6$ |
| 4 | 100 | 30 | $2,5 \times 10^5$ |

niveles en el comportamiento friccional del acero estudiado.

Para determinar la influencia de cada factor o parámetro en los resultados se cuenta con el análisis de la relación S/N [9]. La relación S/N combina tanto el nivel medio (señal) del carácter y su variación en torno a esta media (ruido). Tres funciones de pérdida de la relación S/N están disponibles dependiendo del tipo de característica, es decir, más pequeño es mejor, nominal es mejor y más grande es mejor [9]. De estas funciones, más pequeña es la mejor característica, es la más adecuada para describir la fricción mínima y por lo tanto seleccionada para identificar el parámetro más influyente que afecta el acero en estudio.

La relación S/N como más pequeño es mejor característica puede ser calculado como la transformación logarítmica de la función de pérdida que describe en la ecuación (1) [9].

$$S/N = -10 \log \frac{\sum y_i^2}{n} \quad (1)$$

Donde:

n : es el número de observaciones

y_i : son los datos observados, es decir el coeficiente de fricción por rodamiento.

Una vez obtenido el valor de la relación S/N para cada parámetro y nivel, se calcula el valor de rango Δ ($S/N_{mayor} - S/N_{menor}$) del S/N de cada parámetro. A medida que este Δ sea mayor, mayor será la influencia del parámetro en el desempeño de la característica en evaluación [9].

Los cálculos de la relación S/N fueron logrados a través de una herramienta comercial dedicada al diseño de experimento y análisis de datos estadísticos.

3. Resultados y Discusión

3.1. Caracterización superficial de los especímenes estudiados

Una de las propiedades de superficie evaluadas del material en estudio fue la rugosidad, la cual se conoce que afecta la fuerza de fricción en su componente de rugosidad [3]. Los resultados de los ensayos de rugosidad reportaron un valor promedio, luego de cinco repeticiones, de $R_a = 0,0878 \mu\text{m}$ con desviación estándar de 0,01801.

La otra propiedad de superficie evaluada fue la dureza del material en estudio, la cual se conoce que contribuye a la fricción en su componente de adhesión y surcado (plowing en inglés) [3]. El resultado del ensayo realizado en escala Rockwell C con una carga de 150 kg y cinco repeticiones, correspondió a un valor promedio de HRC 29,4 con desviación estándar de 1,41751.

3.2. Respuesta del material evaluado a la fricción por rodamiento

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del coeficiente de fricción, CoF, a partir del ensayo tribológico, siguiendo el procedimiento indicado en Heredia y Ledo [2] y León y Pinto [5].

Se ejecutó la matriz de experimentos en el acero AISI 4140 con la metodología descrita en la sección anterior. El tribómetro, proporcionó los datos necesarios para la determinación del CoF para las condiciones evaluadas en intervalos de tiempo aproximadamente regulares. En la Figura 2 se presentan una serie de curvas de los resultados del CoF en función de los ciclos ensayados.

Al observar los gráficos de la Figura 2, del comportamiento general de la CoF del acero AISI 4140, se apreciaron tres etapas, una de coeficiente máximo, una de transición y una etapa de estabilidad, similar a las reportadas por Suh y Sin [4]. En la primera etapa, se logra apreciar un periodo de resistencia al corte hasta alcanzar un punto máximo ($\mu_{\text{máx}} = 0,116859$) a los 26000 ciclos para experimento 1 y a 40000 ciclos para experimento 4; atribuible a tener una superficie con material removido, incremento de las interacciones de las asperezas y posibles partículas de desgaste atrapadas, permitiendo de esta manera dicho

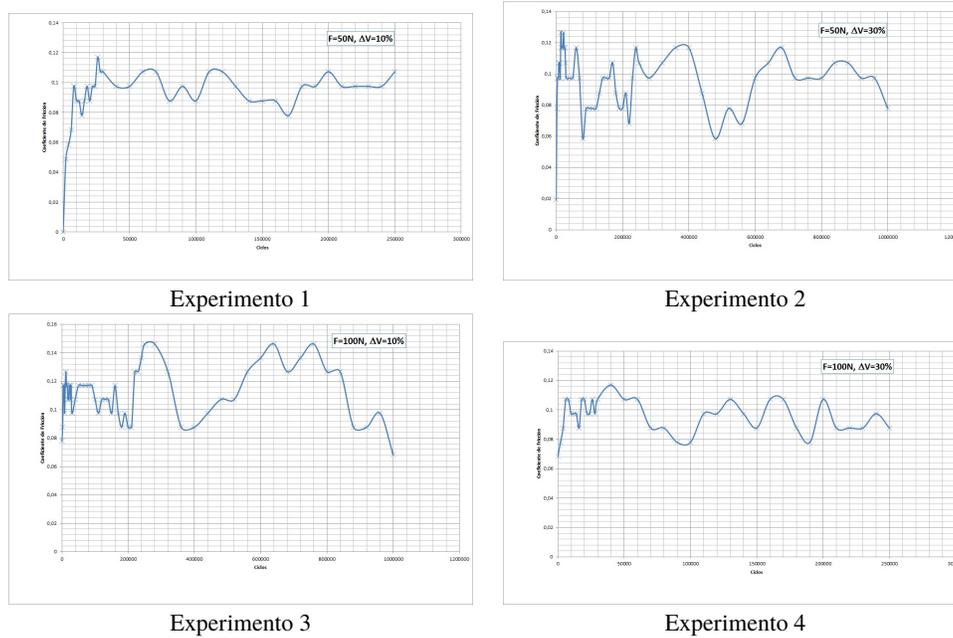


Figura 2: Resultados de CoF de cada experimento en función del tiempo.

incremento en el coeficiente de fricción en ambos casos.

Sin embargo, luego de este periodo, se presentan variaciones en el coeficiente de fricción para ambas probetas, por lo que no se logra obtener una etapa de estabilidad en las curvas para la duración del ensayo presente, pero se observan ciertos picos de altos y bajos, en forma constante, resultando ser parte de la etapa de transición con presencia de lubricación.

Las curvas de las probetas en experimento 2 y experimento 3, muestran en toda la duración del ensayo, cambios altos y bajos del coeficiente de fricción que se atribuyen a la influencia del contacto directo la probeta (B1) con el lubricante. En los 14000 y 20000 ciclos, la probeta del experimento 2 obtiene el coeficiente de fricción máximo ($\mu_{m\acute{a}x} = 0,126705$); la probeta del experimento 3 tiene su mayor coeficiente de fricción ($\mu_{m\acute{a}x} = 0,146198$) en $2,5 \times 10^5$, $2,8 \times 10^5$, $6,4 \times 10^5$ y $7,6 \times 10^5$ ciclos, pero se considera que están en una etapa de transición, atribuyendo ese aumento del coeficiente de fricción, a residuos de material que pudieron haber estado sobre los especímenes en el momento de su contacto metal-metal, haciendo esos cambios altos de dicho coeficiente.

En la Tabla 3 se muestran los resultados

para cada experimento logrado, donde los valores del CoF promedio resultaron entre 0,092879 a 0,111814 para las condiciones evaluadas, lo cual se considera un comportamiento friccional leve.

Tabla 3: Resumen de resultados para CoF del AISI 4140.

| Experimento | Promedio | Desviación |
|-------------|-------------|-------------|
| 1 | 0,096318669 | 0,008357582 |
| 2 | 0,093133528 | 0,015178942 |
| 3 | 0,111814380 | 0,021031628 |
| 4 | 0,092878716 | 0,010405106 |

En la Figura 3, se muestra la respuesta de fricción por rodamiento para el acero AISI 4140 considerando la carga, la relación de velocidad o el tiempo como una constante. De la Figura 3, al analizar el efecto de la carga normal evaluada considerando la relación de velocidad y el tiempo como fija se observó, que el CoF de fricción promedio aumenta a medida que la carga aumenta. De los datos de la Tabla 3, se obtiene que los valores promedio del CoF para 50 N y 100 N fueron 0,094726 y 0,102347, respectivamente.

De igual manera, en la Figura 3, se reseña el comportamiento de la fricción respecto a la

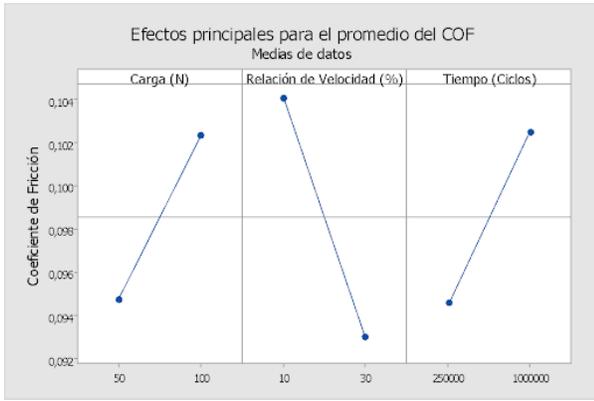


Figura 3: Respuesta de COF promedio en función de la carga normal, relación de velocidad y tiempo o ciclos.

relación de velocidad considerando la carga normal y el tiempo como fijos, se puede destacar que el CoF disminuye con el aumento de la relación de velocidad tangencial a razón de 11,83 %. De la Tabla 3, para la relación de velocidad de 10 % y 30 %, se tiene un CoF promedio de 0,104067 y 0,093006, respectivamente.

Respecto al comportamiento de la fricción con la variación del tiempo, al observar la Figura 3, se determina una tendencia a aumentar el coeficiente de fricción cuando aumenta el tiempo, obteniéndose un valor promedio del CoF de 0,094599 para $2,5 \times 10^5$ ciclos y de 0,102474 para 1×10^6 ciclos.

A manera de comparación se realizaron dos pruebas adicionales sin lubricante (fricción seca) donde se obtuvo un valor promedio de CoF de 0,373373, lo cual demuestra una disminución del CoF con el empleo de lubricante de alrededor de un 78 %. La temperatura del aceite lubricante en los ensayos lubricados fue en promedio aproximadamente 46,8 C.

3.3. Relación Señal a Ruido- S/N

Como se expuso en la sección anterior, la metodología Taguchi presenta un análisis que permite identificar aquellos parámetros que tienen mayor influencia en los resultados de fricción de manera más eficiente. Los valores S/N obtenidos con la aplicación Minitab®, para los factores y niveles evaluados se muestran en la Tabla 4 y en la Figura 4 (considerando el más pequeño es mejor).

De las gráficas de la Figura 4, se observa que los efectos la relación de velocidad y el tiempo son los que más afectan a la razón S/N; es decir, los parámetros, relación de velocidad y tiempo son los que más influyen sobre la variación del CoF del acero AISI 4140. Al observar el valor de posición, obtenido para cada parámetro (mostrado en la Tabla 4), se destaca que el CoF para el acero AISI 4140 fue más afectado por la relación de velocidad de deslizamiento, al mostrar una mayor proporción S/N (es la mayor diferencia en las relaciones de S/N), seguido por la duración del ensayo y menos influenciado por la carga normal, al ser este S/N el valor menor.

Ahora para optimizar con eficacia la respuesta a la fricción por deslizamiento, se seleccionan los niveles con el valor S/N mayor, logrando el CoF con la mínima variación. Así que, el conjunto de parámetros seleccionado entre los evaluados es: una carga normal de 29 N, una velocidad de deslizamiento de 2 m/s y una distancia de 1000 m.

Tabla 4: Análisis S/N para CoF del AISI 4140.

| Nivel | Carga (N) | Relación Velocidad (%) | Tiempo (ciclos) |
|----------|-----------|------------------------|-----------------|
| 1 | 20,47 | 19,68 | 20,48 |
| 2 | 19,84 | 20,63 | 19,82 |
| Δ | 0,64 | 0,95 | 0,66 |
| Posición | 3 | 1 | 2 |

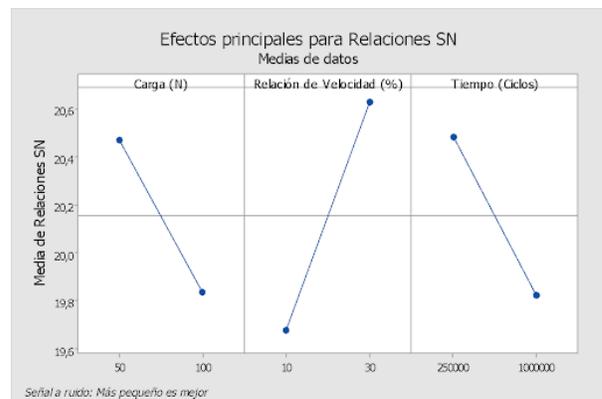


Figura 4: Gráficas de efectos para la relación señal a ruido (S/N) del CoF del ANSI 4140.

4. Conclusiones

El acero AISI 4140 obtuvo un coeficiente de fricción promedio de 0,098536 para las condiciones evaluadas.

El coeficiente de fricción disminuye al aumentar la relación de velocidad de deslizamiento en una proporción de 11,83 % en promedio.

El coeficiente de fricción disminuyó un 78 % respecto de la fricción seca con el empleo de un lubricante.

La relación de velocidad resultó ser el parámetro más influyente y la carga normal, el de menor influencia para el acero AISI 4140 en los niveles estudiados.

Agradecimiento

El autor desea expresar su especial agradecimiento a docentes, técnicos y auxiliares de investigación del Laboratorio de Materiales y del Laboratorio de Predicciones de la Escuela de Ingeniería Mecánica, UC, por su valiosa colaboración en la realización de las mediciones y ensayos. Al Centro de Investigación de Materiales de la Facultad de Ingeniería, UC, por el financiamiento parcial del proyecto y a la empresa INCAOIL por proveer el lubricante empleado en la investigación.

5. Referencias

- [1] E. Rondón. Evaluación experimental de las propiedades tribológicas por contacto rodante del acero AISI 4140. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2014.
- [2] L. Heredia y A. Ledo. Tribómetro para la simulación de la fricción y el desgaste bajo condición de contacto rodante. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2011.
- [3] N. Suh. *Tribophysics*. Prentice-Hall, 1986.
- [4] N. Suh and H. Sin. The genesis of friction. *Wear*, 69(1):91–114, 1981.
- [5] J. León y M. Pinto. Elaboración de una metodología para detectar fallas subsuperficiales en condiciones de contacto rodante mediante el uso de ultrasonido. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2013.
- [6] M. Tokuda, M. Nagafuchi, N. Tsushima, and H. Muro. Observations of the peeling mode of failure and surface-originated flaking from a ring-to-ring rolling contact fatigue test rig. In J. Hoo, editor, *Rolling Contact Fatigue Testing of Bearing Steels*. ASTM International, 1982.
- [7] T. Ahlroos, H. Ronkainen, A. Helle, R. Parikka, J. Virta, and S. Varjus. Twin disc micropitting tests. *Tribology International*, 42(10):1460–1466, 2009.
- [8] R. Norton. *Diseño de Máquinas: Un enfoque integrado*. Pearson Educación, 4^{ta} edición, 2011.
- [9] R. Roy. *A primer on the Taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers, 2^{da} edición, 2010.

Identification and quantification of (+) - Catechins and Procyanidins in Cocoa from Ocumare de la Costa, Venezuela

Eduardo Lujano^a, Lisbeth Manganiello^{*,b,c}, Ana Contento^d, Ángel Ríos^d

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

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

^cGerencia de Proyectos de Investigación, Desarrollo e Innovación, Centro Nacional de Tecnología Química, Caracas, Venezuela.

^dDepartamento de Química Analítica y Tecnología de Alimentos, Facultad de Ciencias y Tecnologías Químicas, Universidad de Castilla la Mancha, Ciudad Real, España.

Abstract.- Cocoa has a high polyphenol content, distinguishing the group of flavonoids, within this classification are the flavanols, formed by monomeric species as is the case of the (+)- catechin and its oligomeric forms such as the procyanidin B2 dimer. Due to their antioxidant activity, these substances have therapeutic properties for the treatment of cardiovascular diseases, cancer and other conditions associated with the action of free radicals. The concentration of these compounds can vary depending on their geographical origin and the post-harvest processes. For its identification and quantification, the study analytes of cocoa almonds from Ocumare de la Costa - Venezuela, previously submitted to the roasting process, were extracted. Two extraction cycles were carried out with agitation in different mixtures of organic solvents with acidified water. The extract obtained was evaluated by High Performance Liquid Chromatography (HPLC), the calibration range of the method used was [0.10 – 1.00] mg/L from pure standards. The real samples showed maximum values of (11.44 ± 1.74) mg/g of procyanidin B2 and (1.75 ± 0.16) mg/g of (+)- catechin, the results obtained are in agreement with the values reported in the literature.

Keywords: cocoa; (+)- catechin; procyanidin B2; antioxidant activity; HPLC

Identificación y cuantificación de (+) - Catequinas y Procianidinas en cacao procedente de Ocumare de la Costa, Venezuela

Resumen.- El cacao presenta un alto contenido polifenoles, distinguiéndose el grupo de los flavonoides, dentro de esta clasificación se encuentran los flavanoles, formado por especies monoméricas como es el caso de la (+)- catequina y sus formas oligoméricas como es el caso del dímero Procianidina B2. Debido a su actividad antioxidante, estas sustancias presentan propiedades terapéuticas para el tratamiento de enfermedades cardiovasculares, cáncer y otras afecciones asociadas a la acción de radicales libres. La concentración de estos compuestos puede variar dependiendo de su origen geográfico y de los procesos de poscosecha. Para su identificación y cuantificación se procedió a extraer los analitos de estudio de almendras de cacao procedentes de Ocumare de la Costa – Venezuela, sometidas previamente al proceso de tostado. Se realizaron dos ciclos de extracción con agitación en diferentes mezclas de solventes orgánicos con agua acidificada. El extracto obtenido se evaluó mediante Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC), el rango de calibración del método empleado fue de [0,10 – 1,00] mg/L a partir de patrones puros. Las muestras reales arrojaron valores máximos de (11,44 ± 1,74) mg/g de procianidina B2 y (1,75 ± 0,16) mg/g de (+)- catequina, los resultados obtenidos guardan concordancia con los valores reportados en la literatura.

Palabras clave: cacao; (+)- catequina; procianidina B2; actividad antioxidante, HPLC.

Recibido: 01 de abril, 2019.

Aceptado: 19 de julio, 2019.

1. Introducción

El cacao se viene utilizando con una finalidad curativa desde hace más de dos mil años, desde las antiguas civilizaciones maya y azteca y tras su introducción en Europa en la edad media, se han registrado más de 100 usos medicinales del cacao y el chocolate, entre los que se

* Autor para correspondencia:

Correo-e: lisbethmanganiello@gmail.com (L. Manganiello)

encuentran tratamientos para el cansancio, la delgadez extrema, la fiebre, la angina y los problemas cardíacos, la anemia, la falta de aliento y los problemas renales e intestinales, entre otros. Gran parte de las propiedades terapéuticas pueden atribuirse a unos compuestos, denominados flavonoides, presentes en grandes cantidades en los granos de cacao.

Los flavonoides constituyen una de las subfamilias de polifenoles naturales a las que la comunidad científica ha dedicado más atención en los últimos años. Sus múltiples propiedades biológicas observadas experimentalmente y su abundancia en la dieta, junto con su presencia en numerosos remedios de la medicina tradicional, los convierten en posibles candidatos a explicar la asociación encontrada entre el consumo de determinados productos de origen vegetal y la disminución del riesgo de presentar determinadas enfermedades crónicas. La búsqueda de principios activos dentro de los flavonoides tiene, desde el punto de vista farmacológico, algunas ventajas respecto a otros grupos de compuestos naturales. Quizá la más importante es la uniformidad de la configuración química de toda la familia, de modo que las relaciones entre estructura y actividad son más fáciles de establecer. Por otro lado, la disponibilidad de las moléculas flavónicas y la relativa facilidad de su obtención favorecen la evaluación de sus propiedades. A pesar de esto, la mayor parte de la investigación biomédica acerca de los flavonoides se ha venido realizando de forma poco coordinada por laboratorios de distintas áreas de todo el mundo [1].

Álvarez y Orallo [1] indicaron que los resultados experimentales sugieren la posible actividad anticancerígena de diversos compuestos naturales, unido a la estimación de que más del 70% de los cánceres pueden deberse a la dieta, este hecho ha generado un creciente interés en los estudios epidemiológicos que examinan la relación entre los alimentos y la incidencia del cáncer.

Willett [2] resalta que su etiología es multifactorial y se ha descrito que algunos elementos de la alimentación, pueden influir en la probabilidad de su ocurrencia. En este sentido, los antioxidantes han ganado importancia por su posibilidad de

disminuir el riesgo de aparición de la patología. Al respecto, D'Archivio, et al. [3] indican que la ingesta de los polifenoles mediante la dieta han llamado la atención debido a su capacidad para actuar como agentes quimiopreventivos y quimioterapéuticos altamente efectivos. De hecho, se sugiere que son capaces de afectar el proceso general de carcinogénesis, ya sea por limitación de la sobreexpresión de enzimas prooxidantes, por inhibición de genes objetivo implicados en la proliferación celular o por inducir apoptosis. Resulta oportuno acotar que diversos estudios han mostrado que después del consumo de chocolate, tanto el contenido de flavanoles en plasma como la capacidad antioxidante total, aumentan.

Quiñones y colaboradores [4] en su investigación encontraron que los efectos de los polifenoles son fundamentalmente consecuencia de sus propiedades antioxidantes. Estos compuestos presentaron efectos vasodilatadores, son capaces además de mejorar el perfil lipídico y atenúan la oxidación de las lipoproteínas de baja densidad (LDL), presentando claros efectos antiinflamatorios, además son capaces de modular los procesos de apoptosis en el endotelio vascular.

En su investigación Maskarinec [5] destacó que aunque las procianidinas han sido evaluadas en sistemas experimentales, para una variedad potencial de efectos anticancerígenos que incluyen inhibición de proliferación de células de cáncer de mama, actividad antioxidante local en el tracto gastrointestinal, regulación de las vías de transducción de señales, supresión de oncogenes, inducción de apoptosis, modulación de actividad de enzimas relacionadas con detoxificación, estimulación del sistema inmune, angiogénesis y regulación del metabolismo hormonal, la mayoría de estos mecanismos no han sido investigados en estudios con humanos.

Osakabe en su trabajo indicó que los polifenoles del cacao, catequinas y procianidinas han despertado el interés por su posible efecto sobre la salud cardiovascular [6]. Las catequinas del cacao muestran una alta biodisponibilidad, y aproximadamente el 25-30% de catequinas ingeridas son detectables en la orina. Por otro lado, la ingestión de productos de cacao aumentó el

nivel de HDL. La regulación de HDL mostró un efecto antioxidante. Por lo tanto, los polifenoles del cacao pueden reducir el riesgo de enfermedad cardiovascular.

Gil [7] estandarizó una metodología analítica HPLC en fase reserva para la determinación simultánea de catequina, epicatequina, cafeína y teobromina en granos de cacao colombianos provenientes de la región santandereana. Durante la etapa de validación, la metodología demostró ser precisa, lineal, reproducible y selectiva frente a los metabolitos primarios presentes en los granos de cacao, especialmente frente a las grasas. Estas características la hacen adecuada y confiable para el objetivo propuesto, permitiendo la cuantificación simultánea de los analitos catequinas, epicatequinas, cafeína y teobromina, solos o en mezcla, en muestras proveniente de todos los estadios de los procesos de preindustrialización del cacao.

Cartaya y Reynaldo [8] mostraron las principales características estructurales de los flavonoides y sus métodos de separación e identificación como la cromatografía líquida de alta resolución. Esta técnica (HPLC) puede ser usada para la separación, determinación cuantitativa e identificación de flavonoides, la cual muestra niveles de resolución y sensibilidad mucho mayor que la cromatografía de papel o de capa fina, por lo que es usada para chequear la homogeneidad de las muestras aisladas por otras técnicas.

Gutiérrez [9] destacó que el chocolate y los productos derivados del cacao se han reconocido como fuentes de compuestos fitoquímicos con potenciales efectos favorables a la salud. El chocolate está entre los alimentos concentrados en polifenoles, particularmente en flavonoides como procianidinas, catequinas y epicatequinas. Un grupo creciente de evidencias sugirió que el consumo regular de los productos del cacao o el uso de sus principios activos como agentes terapéuticos podrían influir favorablemente en la lucha contra las enfermedades cardiovasculares e incluso en otras patologías como el cáncer.

Además cabe destacar que en la última década, el chocolate ha sido objeto de numerosas investigaciones científicas que han aportado evidencia

para afirmar que, por el tipo de grasa y los antioxidantes que contiene, puede ser incluido en una alimentación balanceada sin representar un riesgo para la salud e incluso, puede tener efectos benéficos en los procesos asociados con el estrés oxidativo [10]. Dentro de esta perspectiva, Arlorio *et al.* [11] exponen que en el grupo de polifenoles, se ha identificado a los flavonoides como los principales antioxidantes del cacao y el chocolate oscuro o amargo. El principal grupo de flavonoides presente en el chocolate es el de los flavanoles, el cual comprende estructuras monoméricas como (-)-epicatequina y (+)-catequina, además de sus formas diméricas, oligoméricas y poliméricas, entre las que destacan las procianidinas. Los flavonoides han sido identificados por su capacidad antioxidante y sus posibles implicaciones benéficas en la salud humana. A la luz de los antecedentes descritos, se destaca la importancia de la identificación y cuantificación de las +(-)catequinas y procianidinas B2 en almendras de cacao provenientes de la región central costera del país, después de haber sido sometidas al proceso de tostado, etapa determinante en la producción del chocolate, mediante la técnica de HPLC, dada su precisión. Esta investigación contribuye en la verificación de la calidad del cacao procedente de esa zona, corroborando la presencia de +(-) catequinas y procianidinas B2, incrementando de esta manera el valor agregado de este importante rubro de exportación.

2. Materiales y métodos

2.1. Reactivos y equipos

Reactivos

Procianidina B2, grado de pureza 90 %, Sigma Aldrich (USA), (+)-Catequina hidratada, grado de pureza 98 %, Sigma Aldrich (USA), Acetonitrilo, grado LC-MS, Fisher Scientific (Leicester, Reino Unido), Metanol, grado LC-MS, Fisher Scientific (Leicester, Reino Unido), Agua desionizada – sistema MilliQ®, Waters, Acetona, grado analítico, AppliChem PanReac, (Illinois, USA), Ácido Fórmico al 98 %, LabKem, (Barcelona, España).

Equipo

Cromatógrafo Líquido modelo Agilent serie 1200, equipado con, Desgasificador modelo G1379B, Bomba cuaternaria modelo G1376A que cuenta con dos pistones conectados a los canales “A” y “B” para los disolventes acuosos y orgánicos respectivamente y un rango de presión de trabajo (0–400) bar, un Micro WPS modelo G1377A con un rango de trabajo de (0–40) μL equipada con dos bandejas para una capacidad de 54 viales cada una, un horno modelo G1316A y un detector DAD modelo G1315. Para la separación de los analitos se utilizó la Columna analítica: Agilent 5 TC–C18® de dimensiones (250 mm \times 4,6 mm) con relleno de un tamaño de partícula de 5 μm .

2.2. Muestra

Procedencia

Materia prima cacao criollo (almendras), provenientes de la comunidad de Cumboto productores de cacao Cumbe, genotipos del tipo 60 y 61. Previamente sometida a los procesos de fermentación y secado en el Central de Beneficio de Ocumare de La Costa.

Obtención del extracto polifenólico

Se tomaron como muestras de estudio almendras de cacao tostada tratadas a diferentes condiciones de temperatura, tiempo de tostado y la posición del horno en la que fueron sometidas al proceso de tostado en la Escuela de Chocolatería. Se tomó como referencia la optimización del método de extracción de Calderón *et al.* [12], el cual se llevó a cabo de la siguiente manera, las almendras fueron molidas con un mortero de manera uniforme para obtener un mejor contacto con los solventes de extracción, se pesaron (0,5000 \pm 0,0001) g. La muestra una vez molida fue homogenizada a temperatura ambiente con (5,0 \pm 0,5) mL de una mezcla (50; 50; 0,2) metanol–agua–ácido fórmico. Se agitó la mezcla durante 2 horas a temperatura ambiente y a una velocidad de agitación moderada, luego la mezcla se centrifugó durante 15 minutos a 4500 rpm a fin de retener la mayor cantidad de sólido posible, posteriormente se separó por gravedad el sobrenadante del sólido.

Los sobrenadantes se añadieron en balones de 50 mL y sobre los residuos se añadieron (5,0 \pm 0,5) mL de una mezcla de acetona–agua–ácido acético (70; 30; 0,2) en un vaso de precipitado donde por una hora constante se agitó y se procedió con la centrifugación y separación por gravedad de la misma manera, obteniéndose un segundo sobrenadante que se combinó con el anterior en balones aforados de 50 mL, se llevaron hasta el aforo con una mezcla 50:50 de las dos soluciones extractivas (metanol–agua) y (acetona–agua). Luego de la preparación del extracto, fueron almacenados en una nevera para su posterior análisis cromatográfico, el procedimiento se repitió para cada una de las 5 muestras de cacao analizadas.

3. Discusión de resultados

3.1. Optimización de variables experimentales

Composición de la fase móvil

La fase móvil empleada para la separación de la mezcla de los analitos estudiados se obtuvo a través de un gradiente de concentración aumentando la composición del disolvente orgánico.

La programación del gradiente utilizado se inicia con una composición de fase móvil de 100 % (H_2O : 0,2 % ácido fórmico) durante los dos primeros minutos, a partir de allí comienza a variar la composición de la fase móvil en el tiempo, a razón de 4,44 % Acetonitrilo/min hasta alcanzar una composición final de la fase móvil (80 % acetonitrilo: 20 % agua) para un tiempo total de análisis de 20 minutos.

- *pH de la fase móvil.* La acidificación de la fase móvil, utilizando ácidos como acético, fórmico, y fosfórico, es una estrategia común con el fin de suprimir la ionización de los grupos hidroxilos para favorecer la forma no iónica de los flavonoles. Esto se realiza debido a que la forma molecular, se retiene más favorablemente en fase reversa mejorando la resolución y reproducibilidad de las características de retención [13, 14].
- *Elección del gradiente.* La elección del gradiente se basó en la polaridad que presentan

los compuestos estudiados. La (+)- catequina y procianidina B2 se caracterizan por la presencia de grupos OH en su estructura molecular lo cual les otorga una naturaleza altamente polar, por ese motivo se hace necesario variar la composición de la fase móvil en el tiempo a fin de facilitar la separación de los analitos basándonos en sus distintas afinidades entre la fase móvil y el soporte cromatográfico.

Longitud de onda de trabajo (λ)

El equipo HPLC modelo Agilent 1200, posee un detector DAD (arreglo de diodos), con el cual se registró el espectro de cada soluto conforme eluye en la columna [15], se seleccionó una longitud de onda de trabajo con la cual se pudiera observar la aparición del espectro para la identificación de los compuestos con una alta sensibilidad a concentraciones bajas, preparadas a partir de los patrones madre de 100 mg/L, siendo así 280 nm la longitud de onda empleada en el estudio con una alta sensibilidad. Otras investigaciones realizadas para la separación de las especies de estudio, demuestran que la longitud de onda empleada en esta investigación es la más conveniente [16, 17, 18].

Flujo de la fase móvil

La velocidad de flujo es un parámetro que influye en la forma de los picos debido a que es inversamente proporcional a la cantidad de tiempo que el analito queda retenido en la columna analítica, es decir, que al tener un flujo alto, se tiene un tiempo de retención rápido y con un flujo bajo el tiempo de retención es más lento. En el caso de la separación de la mezcla de compuestos (+)- catequina y procianidina B2 se obtuvo con una fase móvil mayormente acuosa con gradiente de elución, lo cual generó una mayor presión en el sistema. Este hecho obliga a trabajar a flujos bajos para contrarrestar la sobre presión, dado que el sistema cromatográfico empleado está diseñado para operar a presiones por debajo de 400 bares, el flujo de trabajo seleccionado fue 0,5 mL/min. Klein [17] en su investigación coincide con el

mismo flujo de fase móvil para la separación de la mezcla de los analitos en estudio.

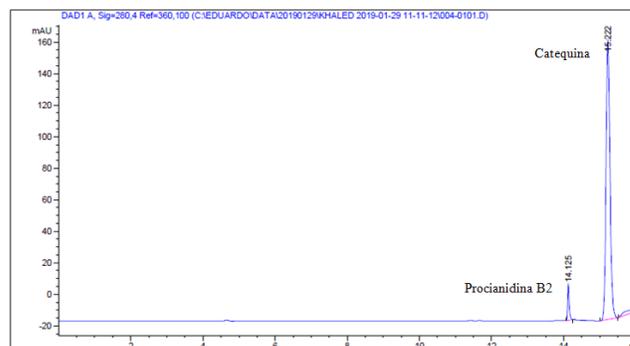


Figura 1: Cromatograma correspondiente a la separación de (+)- catequina y procianidina B2. Fase móvil (100 % H₂O + 0,2 % ácido fórmico) con gradiente de elución hasta un 80 % de acetonitrilo a razón de 4,44 % de acetonitrilo/min, columna Zorbax Agilent 5 TC, C18, 250×4.6 mm, 5 μ m, flujo 0,5 mL/min, longitud de onda de trabajo 280 nm, volumen de inyección 20 μ L y concentración 0,3 mg/L del patrón mezcla de ambos compuestos

Volumen de inyección

Se tomó como volumen de trabajo 20 μ L como punto medio del rango de trabajo para este procedimiento experimental. La elección se basó en investigaciones previas que emplearon un sistema de separación similar [16, 18, 15]. La Tabla 1 recoge las condiciones instrumentales optimizadas y el cromatograma obtenido para la separación de (+)- catequina y procianidina B2 se muestra en la Figura 1.

3.2. Parámetros de calidad para la validación del método empleado para la separación de (+)- catequina y procianidina B2

A partir de las condiciones de operación establecidas en la Tabla 1, se procedió a la construcción de las curvas de calibración para (+)-catequina y procianidina B2, para ello se prepararon mezclas patrones de las dos especies estudiadas en concentraciones de 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 1,0 mg/L (ppm) diluidos en agua con 0,2 % de

Tabla 1: Parámetros instrumentales para la separación de la mezcla de (+)- catequina y procianidina B2

| Parámetros | Valores | | | |
|------------------------------|--|---|--------------------|----|
| Flujo de trabajo | 0,5 mL/min | | | |
| Volumen de inyección | 20 μ L | | | |
| Longitud de onda | 280 nm | | | |
| Columna cromatográfica | Zorbax Agilent 5 TC, C18, 250 \times 4.6 mm, 5 μ m | | | |
| Solventes para la fase móvil | A | | B | |
| | 100 % H ₂ O + 0,2 ácido fórmico | | 100 % acetonitrilo | |
| Fase móvil (gradiente) | t (min) | 0 | 20 | 30 |
| | % B (adim) | 0 | 80 | 0 |

Tabla 2: Validación del método propuesto en la determinación de procianidina B2 y (+)- catequina utilizando soluciones patrones

| Parámetros globales | Procianidina B2 | (+)- Catequina |
|--------------------------------------|----------------------|-------------------------|
| Ecuación | $y = 27,99x + 72,84$ | $y = 2608,13x + 414,86$ |
| R ² | 0,9926 | 0,9849 |
| Rango de trabajo (mg/L) | 0,100 – 1,00 | 0,100 – 1,00 |
| Desviación de la pendiente (S_m) | 1,39 | 186,42 |
| Desviación del intercepto (S_L) | 0,84 | 113,09 |
| Error típico ($S_{y,x}$) | 0,97 | 130,23 |
| Límite de detección (mg/L) | 0,09 | 0,13 |
| Límite de cuantificación (mg/L) | 0,30 | 0,43 |

ácido fórmico. La señal del blanco fue determinada de forma gráfica tomando el intercepto de la ecuación de la recta, teniendo en cuenta que se filtraron cada uno de los patrones de la misma forma que se realizó en el acondicionamiento de las muestras reales, empleando membranas de disco Nylon (0,45 μ m tamaño de poro, 47 mm de diámetro, Sigma Aldrich). Se inyectaron cada una de las concentraciones de los patrones mencionados anteriormente por duplicado a fin de ahorrar tiempo de análisis y solvente orgánico. Las áreas de pico obtenidas fueron similares para cada concentración de patrón inyectado.

El valor de determinación (R²) y la ecuación para cada una de las especies estudiadas, muestran una buena correlación entre las concentraciones de patrones y áreas encontradas para ambos compuestos estudiados. Se procedió con el cálculo de la incertidumbre para, la pendiente e intercepto

de la ecuación de la recta, el error típico y los límites de detección y cuantificación para cada uno de los compuestos, siguiendo el Procedimiento de Laboratorio de Servicio de Análisis e Investigación de Alimentos (LSAIA), para la validación del método del Manual de Calidad interno del laboratorio de la Facultad de Ciencias y Tecnologías Químicas, Ciudad Real, España. La Tabla 2 reporta los parámetros de validación del método correspondientes a cada compuesto.

Basados en los resultados de los parámetros globales que se obtuvieron, se puede resaltar lo siguiente, la ecuación de la recta en el caso de la (+)- catequina, la pendiente fue mayor que la de la procianidina B2, teniendo una mayor sensibilidad a los cambios de concentración que ésta última, con un buen ajuste al modelo de una línea recta con R² mayores a 0,98. Además, fue importante

obtener unos límites de detección bajo en el caso de cada compuesto, para obtener la curva a partir de concentraciones bajas de patrón, haciendo así que la cantidad de reactivo que se utilizada sea menor.

3.3. Determinación de (+)- catequina y procianidina B2 en muestras reales de cacao tostado

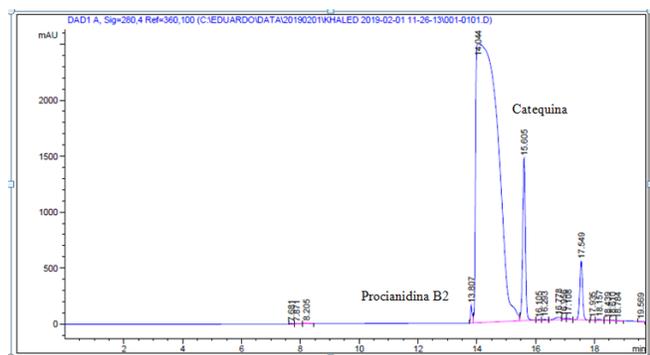


Figura 2: Cromatograma correspondiente al extracto 1 de almendra de cacao tostada a las condiciones: Fase móvil (100 % H₂O+0,2 % ácido fórmico) con gradiente de elución hasta un 80 % de acetonitrilo a razón de 4,44 % de acetonitrilo/min, columna Zorbax Agilent 5 TC, C18, 250×4.6 mm, 5 μm, flujo 0,5mL/min, longitud de onda de trabajo 280 nm, volumen de inyección 20 μL

Para un total de cinco extractos preparados de muestras de almendras de cacao tostadas cada una tratada a diferentes condiciones de, temperatura, tiempo de tostado y posición de bandeja de horno, con los cromatogramas y las curvas de calibración de cada compuesto, se realizó el cálculo de las concentraciones de (+)- catequina y procianidina B2 en mg/g. La Tabla 3 presenta los resultados, además La Figura 2 muestra el cromatograma obtenido para una muestra real.

Los polifenoles (+)- catequinas y su dímero procianidina B2 se encuentran contenidos en la almendra de cacao tostada proveniente de Ocumare de la Costa, lo cual indica que aunque el cacao esté en condiciones: fresco, seco e incluso después de una etapa de tostado, los analitos determinados por la técnica instrumental propuesta pudieron ser identificados y cuantificados.

3.4. Comparación de los resultados obtenidos de (+)- catequina y procianidina B2 respecto a las condiciones del cacao

Las almendras de cacao son ricas en polifenoles (aproximadamente 15 % de peso seco) y alcaloides (hasta 4 %) y éstos contribuyen con el sabor y aroma del cacao. Los polifenoles confieren sensación de amargor y astringencia y contribuyen a los olores a verde y afrutado de las almendras, mientras que los alcaloides confieren amargor y están involucrados en la palatabilidad de los alimentos que los contienen [19].

Además cabe mencionar que Portillo, *et al.* [20] indican que un amplio número de moléculas agrupadas en familias, de las que sobresalen los ésteres, alcoholes y ácidos que habrán de modificarse o aumentar su contenido con los tratamientos posteriores (Tabla 4), pero que desde esta etapa disminuyen la astringencia (disminución de polifenoles totales) y la tonalidad púrpura de las almendras (transformación y degradación de antocianinas), amargor (disminución de alcaloides) de las almendras, desarrollo de coloración marrón (presencia de quinonas). Incluso, algunos parámetros que se emplean a nivel industrial para evaluar el grado de fermentación son los contenidos de antocianinas y el color marrón.

Este efecto se le atribuye a que después de someter la almendra de cacao al tostado se producen compuestos derivados de las reacciones entre azúcares reductores y aminoácidos, conocidas comúnmente como las reacciones de Maillard o pardeamiento no enzimático [21]. En otros estudios se evidencia que el tostado es la etapa que tiene mayor influencia sobre el contenido de polifenoles totales de almendras de cacao [11].

Al comparar los resultados en el contenido de catequina mostrados en Tabla 3 con los reportados en la Tabla 5 se puede resaltar el efecto de la temperatura y de la condiciones de tostado debido a que en los clones de cacao: CCN51 e ICS 1 aumentó el contenido de catequina con respecto a las muestra que estaba sin tratar, lo cual se asemeja a los resultados de la Tabla 3, en donde la cantidad de catequina en los extractos: E1 y E5 que fueron sometidos a un proceso de tostado en un horno a: 110 °C y 120 °C respectivamente,

Tabla 3: Concentraciones de (+)- catequina y procianidina B2 en almendras de cacao tostadas provenientes de Ocumare de la Costa

| Extracto | Condiciones de la muestra | | | Concentración (mg/g) | |
|----------|---------------------------|-------------|----------|----------------------|-------------|
| | Temperatura(°C) | Tiempo(min) | Posición | Procianidina B2 | Catequina |
| E1 | 110 | 150 | arriba | 9,27 ± 1,54 | 1,75 ± 0,16 |
| E2 | 100 | 120 | medio | 9,66 ± 0,29 | 1,52 ± 0,19 |
| E3 | 120 | 150 | abajo | 11,44 ± 1,74 | 1,63 ± 0,06 |
| E4 | 100 | 90 | abajo | 9,82 ± 1,29 | 1,59 ± 0,05 |
| E5 | 120 | 150 | arriba | 9,42 ± 0,23 | 1,66 ± 0,05 |

Tabla 4: Distribución de las familias de moléculas y número de compuestos volátiles identificados en una muestra típica de cacao

| Familias | Cacao fresco | Cacao seco | Cacao tostado |
|----------------|--------------|------------|---------------|
| Aldehídos | 8 | 12 | 11 |
| Alcoholes | 15 | 13 | 13 |
| Ácidos | 14 | 14 | 12 |
| Cetonas | 9 | 13 | 13 |
| Ésteres | 22 | 27 | 26 |
| Hidrocarburos | 3 | 7 | 3 |
| Pirazinas | 3 | 7 | 15 |
| Misceláneos | 3 | 5 | 3 |
| Pirroles | 1 | 4 | 4 |
| Furanos | 6 | 7 | 7 |
| Azufres | 1 | 1 | 2 |
| Terpenos | 3 | 4 | 3 |
| Fenoles | 4 | 6 | 6 |
| Oxazoles | 0 | 1 | 1 |
| Totales | 92 | 121 | 119 |

Fuente: Portillo *et al.*[20]

en una posición superior en la cual según Calderón y colaboradores [12] era aquella donde las almendras de cacao eran mayormente tostadas, durante un tiempo de 150 minutos, presentaron la mayor cantidad en el contenido de catequina con (1,66 y 1,75) mg/g respectivamente. En este caso donde todas las muestras fueron tratadas por un proceso de tostado, con la diferencia en posición de bandeja de horno, tiempo de tostado y temperatura de tostado se puede apreciar una diferencia poco significativa en la cantidad de catequina entre un extracto y otro.

Con respecto a las cantidades de catequina obtenidas en la investigación y reportada en la Tabla 3 se presenta un rango de concentración

de (1,52–1,75) mg/g, las cuales son mayores a la cantidad de catequina que se encuentran en los clones de cacao tostado ICS 1, ICS 60, ICS 95, TSH 565 reportados en la Tabla 5, donde solamente el CCN 51 contiene mayor cantidad de catequina que los reportados en este estudio.

4. Conclusiones

La metodología analítica instrumental propuesta permitió la determinación de los polifenoles del tipo flavan-3-ol (+)- catequina y procianidina B2 utilizando la técnica de Cromatografía Líquida de Alta Resolución, empleando un detector de arreglo de diodos. El método analítico para la extracción de los polifenoles, necesita de dos ciclos de extracción con mezclas de solventes acuoso-orgánico en medio ácido para asegurar la cuantificación de los compuestos estudiados en las almendras de cacao provenientes de Ocumare de la Costa, sometidas al proceso de tostado. Los límites de detección y cuantificación del método analítico son de 0,13 mg/L y 0,43 mg/L para (+)- catequina, respectivamente y 0,09 mg/L y 0,30 mg/L para procianidina B2, respectivamente.

Las concentraciones de procianidina B2 y (+)-catequina de las muestras reales analizadas, se encuentran en el rango de (9,27 ± 1,54 – 11,44 ± 1,74) mg/g y (1,52 ± 0,19 – 1,75 ± 0,16) mg/g en muestras reales de almendras de cacao sometidas al proceso de tostado, respectivamente. Las concentraciones de (+)- catequina y procianidina B2 en la almendra de cacao tostado utilizadas en esta investigación son altas con respecto a las concentraciones reportadas en la literatura a nivel

Tabla 5: Contenido de metabolitos fenólicos de cinco genotipos de cacao sometidos al proceso de tostado

| Clon | | Fenoles totales | Taninos condensados | Antocianidinas totales | Catequina | Epicatequina |
|--------|-----------------|-----------------|---------------------|------------------------|-------------|--------------|
| CCN 51 | Sin tratamiento | 21,69 ± 0,51 | 32,61 ± 0,65 | 0,99 ± 0,01 | 1,25 ± 0,02 | 3,31 ± 0,17 |
| | Tostado | 20,60 ± 0,32 | 22,78 ± 0,86 | 0,82 ± 0,01 | 3,35 ± 0,05 | 3,12 ± 0,01 |
| ICS 1 | Sin tratamiento | 35,36 ± 0,18 | 6,10 ± 0,66 | 1,26 ± 0,05 | 0,22 ± 0,03 | 10,20 ± 0,47 |
| | Tostado | 25,83 ± 0,99 | 35,76 ± 0,50 | 0,18 ± 0,01 | 1,35 ± 0,02 | 1,04 ± 0,09 |
| ICS 60 | Sin tratamiento | 37,31 ± 1,79 | 46,92 ± 1,08 | 1,01 ± 0,02 | 0,22 ± 0,02 | 8,26 ± 0,02 |
| | Tostado | 42,79 ± 0,66 | 56,40 ± 0,89 | 0,99 ± 0,01 | 0,02 ± 0,00 | 2,14 ± 0,02 |
| ICS 90 | Sin tratamiento | 22,80 ± 0,20 | 32,09 ± 1,02 | 0,59 ± 0,02 | 2,25 ± 0,10 | 7,26 ± 0,08 |
| | Tostado | 21,74 ± 0,18 | 20,79 ± 0,61 | 0,17 ± 0,00 | 0,25 ± 0,01 | 0,01 ± 0,00 |
| TSH | Sin tratamiento | 38,64 ± 1,92 | 77,24 ± 1,19 | 1,60 ± 0,02 | 0,53 ± 0,08 | 3,14 ± 0,05 |
| | Tostado | 41,77 ± 0,83 | 58,31 ± 1,16 | 0,40 ± 0,02 | 0,03 ± 0,00 | 0,04 ± 0,00 |

internacional. Los compuestos (+)- catequina y procianidina B2 determinados en las almendras de cacao sometidas al proceso de tostado, presentan propiedades terapéuticas debido a su actividad antioxidante siendo así importantes en la prevención de enfermedades cardiovasculares y cáncer de acuerdo con la literatura revisada.

Reconocimiento

La presente Investigación fue reconocida por la Escuela de Ingeniería Química, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, Venezuela, con Mención Honorífica por sus aportes en la identificación y cuantificación de compuestos de valioso interés terapéutico como son la (+)-catequinas y Procianidinas B2, presentes en el Cacao Venezolano proveniente de la localidad de Ocumare de la Costa, estado Aragua, Venezuela, confiriéndole a este rubro de exportación alto valor agregado.

Agradecimientos

E. Lujano y L. Manganiello, agradecen al Departamento de Química Analítica y Tecnología de Alimentos de la Facultad de Ciencias y Tecnologías Químicas de la Universidad de Castilla la Mancha, Ciudad Real, España, por todo el apoyo brindado para la realización del presente trabajo, tanto en proveer los patrones puros para la identificación y cuantificación de los compuestos estudiados así como también brindar sus instalaciones y apoyo profesoral para la culminación del mismo.

5. Referencias

- [1] E. Álvarez y F. Orallo. Actividad biológica de los flavonoides (I). acción frente al cáncer. *Revista Ámbito Farmacéutico*, 22(10):130–140, 2003.
- [2] W. Willett. *Nutrición en salud y enfermedad*, chapter Dieta, Nutrición y prevención del cáncer, pages 1441–1452. Interamericana MGH, 2002.
- [3] M. D'Archivio, C. Santangelo, B. Scaccocchio, R. Vari, C. Filesì, R. Masella, and C. Giovannini. Modulatory effects of polyphenols on apoptosis induction: relevance for cancer prevention. *Int. J. Mol. Sci.*, 9:213–228, 2008.
- [4] M. Quiñones, M. Miguel, y A. Aleixandre. Los polifenoles, compuestos de origen natural con efectos saludables sobre el sistema cardiovascular. *Revista Nutrición Hospitalaria*, 27(1):76–89, 2012.
- [5] G. Maskarinec. Cancer protective properties of cocoa: a review of the epidemiologic evidence. *Nutr. Cancer*, 61(5):573–579, 2009.
- [6] N. Osakabe. Cacao polyphenols and atherosclerosis. *J. Clin. Biochem*, 37(3):67–72, 2005.
- [7] J. Gil. Estabilidad y actividad antioxidante de catequinas presentes en cacaos colombianos durante los procesos de pre e industrialización. Trabajo de grado en MSc farmacéutica, Escuela de Farmacia, Universidad de Antioquia, Colombia, 2012.
- [8] O. Cartaya y I. Reynaldo. Flavonoides: Características químicas y aplicaciones. *Cultivos Tropicales*, 22(2):5–14, 2001.
- [9] B. Gutiérrez. Chocolate, polifenoles y protección a la salud. *Acta Farm. Bonaerense*, 21(2):149–152, 2002.
- [10] M. Posada, V. Pineda, y A. Correal. El chocolate y la salud cardiovascular. *Revista Perspectivas en nutrición humana*, 4:99–111, 2001.
- [11] M. Arlorio, M. Locatelli, F. Travaglia, J.D. Coisson, E.D. Grosso, A. Minassi, G. Appendino, and A. Martelli. Roasting impact on the contents of clovamide (N-caffeoyl-L-DOPA) and the antioxidant activity of cocoa beans (*Theobroma cacao* L.). *Food Chemistry*, 106:967–975, 2008.
- [12] R. Calderon, Y. Chauran, N. Mendoza, C. Vega,

- J. Rojas, and L. Manganiello. Operating parameters more appropriate in the process of roasted cocoa almonas. *Revista Ingeniería UC*, 23(1):67–80, 2016.
- [13] R. Watson. *Polyphenols in Plants: Isolation, Purification and Extract Preparation*. Elsevier Inc, 2014.
- [14] F. Durán. Desarrollo y validación de una metodología analítica para la cuantificación de compuestos flavonoides y organozufrados en aros de cebolla, mediante DLLME–HPLC–UV. Trabajo de grado, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina, 2016.
- [15] J. Yépez. Caracterización del contenido de polifenoles: catequina, epicatequina y procianidinas B1, B2 y C1; en cacao CC–51 de las principales zonas productoras del Ecuador. Trabajo de grado, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, 2017.
- [16] C. Da-Silva, G. Aquino, M. Alves, G. Pereira, D. de Oliveira, M. Bordignon, and M. dos Santos. Rapid determination of flavonoids and phenolic acids in grape juices and wines by RP–HPLC/DAD: Method Validation and characterization of commercial products of the new Brazilian varieties of grape. *Food Chemistry*, 228:106–115, 2017.
- [17] T. Klein, R. Longhini, and J. Palazzo. Development of an analytical method using reversed-phase HPLC–PDA for a semipurified extract of *Paullinia cupana* var. *sorbilis* (guaraná). *Talanta*, 88:502–506, 2012.
- [18] Y. Cai, Y. Yu, G. Duan, and Y. Li. Study on infrared-assisted extraction coupled with high performance liquid chromatography (HPLC) for determination of catechin, epicatechin, and procyanidin B2 in grape seeds. *Food Chemistry*, 127:1872–1877, 2011.
- [19] A. Aprotosoai, S. Luca, and A. Miron. Flavor chemistry of cocoa and cocoa products—an overview. *Food Science and Food Safety*, 15:73–91, 2016.
- [20] E. Portillo, M. Labarca, L. Grazziani, E. Cros, S. Assemat, F. Davrieux, R. Boulanger, y M. Marcano. Formación del aroma del cacao criollo (*Theobroma cacao* L.) en función del tratamiento poscosecha en Venezuela. *UDO Agrícola*, 9(2):458–468, 2009.
- [21] T. Oliviero, E. Capuano, B. Cammerer, and V. Fogliano. Influence of roasting on the antioxidant activity and HMF formation of a cocoa bean model systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(1):147–152, 2009.
- [22] S. Zapata, A. Tamayo, y B. Rojano. Efecto del tostado sobre los metabolitos secundarios y la actividad antioxidante de clones de cacao colombiano. *Revista de la Facultad Nacional de Agronomía – Medellín*, 68(1):7497–7507, 2015.

Studies of the mechanical properties of concrete reinforced with sugar cane bagasse fibers

Belén María Paricaguán Morales^{*,a}, José Luis Muñoz Cuevas^b

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

^b*Centro de Investigaciones Montana, Valencia, Estado Carabobo, Venezuela*

Abstract.- The use of organic waste materials for the production of concrete mixtures reduces the amount of solid waste and decreases the amount of raw materials to be extracted, thus preserving non-renewable resources. With the possibility of using alternative materials to reinforce and improve physical and mechanical properties of concrete, the effect on the resistance to compression and bending of concrete mixtures was analyzed by the use of sugar cane bagasse fibers as Partial substitute of fine aggregate at a proportion of 2,5 % in volume, for this purpose, a group of these were used in their natural state while another group underwent treatment with polymethylmethacrylate (PMMA). A water/cement ratio of 0,48 was used; mixtures with untreated fibers were prepared at two average lengths (3-4 cm short size; 5-6 cm long size) whereas with the fibers treated with PMMA an average length of random size ≤ 4 cm was used. The results obtained showed a notable improvement in the compression resistance in terms of the use of long-sized fibers with a tendency very similar to a non-fiber concrete, whereas with respect to the modulus of rupture in beams was lower than that of concrete traditional, however, the fibers in the concrete showed an efficiency of reinforcement in ductile failure and bridges in the formation of cracks, with a capacity of resistance when a load of final fault was reached.

Keywords: sugarcane bagasse; reinforced concrete; polymethylmethacrylate; polyheed 1026; acetylation.

Estudio de las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar

Resumen.- La utilización de materiales de desechos orgánicos para la elaboración de mezclas de concreto permite reducir la cantidad de residuos sólidos, y disminuye la cantidad de materias primas a extraer, preservando así los recursos no renovables. Con la posibilidad de utilizar materiales alternativos para reforzar y mejorar propiedades físicas y mecánicas del concreto se analizó el efecto sobre la resistencia a compresión y flexión de mezclas de concreto mediante el uso de fibras de bagazo de caña de azúcar como sustituto parcial del agregado fino a una proporción de 2,5 % en volumen, para tal fin, un grupo de estas se utilizaron en su estado natural mientras que otro grupo fue sometido a tratamiento con polimetilmetacrilato (PMMA). Se usó una relación agua/cemento de 0,48; se prepararon las mezclas con fibras sin tratar a dos longitudes promedios (3-4 cm tamaño corto; 5-6 cm tamaño largo) mientras que con las fibras tratadas con PMMA se usó una longitud promedio de tamaño aleatorio ≤ 4 cm. Los resultados obtenidos evidencian una mejoría notable en la resistencia a compresión en cuanto al uso de las fibras de tamaño largo con tendencia muy similar a un concreto sin fibras, mientras que con respecto al módulo de ruptura en vigas fue menor a las del concreto tradicional, sin embargo, las fibras en el concreto mostraron una eficiencia de refuerzo en falla dúctil y puentes en la formación de grietas, con una capacidad de resistencia cuando se alcanzó una carga de falla final.

Palabras clave: bagazo de caña de azúcar; concreto reforzado; polimetilmetacrilato; polyheed 1026; acetilación.

Recibido: 22 de enero, 2019.

Aceptado: 26 de julio de 2019.

1. Introducción

A nivel mundial el concreto elaborado a base de cemento Pórtland es uno de los compuestos más versátiles en la construcción, pero existe la necesidad de modificar sus propiedades, tales como la resistencia a la tracción, dureza, ductilidad y durabilidad para aplicaciones más específicas. La

* Autor para correspondencia:

Correo-e: belenparicaguan@gmail.com (B.M. Paricaguán)

utilización de materiales reciclados obtenidos de la naturaleza (material orgánico) para la elaboración de mezclas de concreto permite reducir la cantidad de residuos, y a la vez disminuye la cantidad de materias primas a extraer, preservando así los recursos no renovables. Por este motivo y debido al acelerado crecimiento industrial, resulta de gran importancia e interés conocer los estudios realizados sobre este tipo de materiales, y de este modo tener una información detallada sobre su comportamiento y propiedades mecánicas en distintas condiciones de trabajo y de esta manera fomentar su aplicación en todos los campos de la industria en los que sus excelentes propiedades le confieren grandes beneficios respecto a otros.

En este orden de ideas, Osorio *et al.* [1], estudiaron la influencia del tamaño y de la adición de fibras expresadas en porcentaje del peso total, en la resistencia a compresión y en la densidad del material en la elaboración de concreto. Prepararon concreto (muestras patrón) y un compuesto concreto y de fibras de bagazo de caña de tamaño aleatorio, retenidas por un tamiz N° 6 entre el 0,5 y 2,5 % de fibras en relación al peso total del agregado grueso. Los resultados obtenidos de los ensayos arrojaron que el compuesto con bagazo presentó una resistencia a compresión a los 14 días de fraguado entre 8,6 y 16,88 MPa, y una reducción de la densidad entre 141 y 336 kg/m³, comparado con la de un concreto patrón de densidad promedio de 2400 kg/m³, aspecto importante para la consideración de cargas muertas por peso propio en estructuras.

Por otro lado, Sheikh y colaboradores [2] determinaron las fuerzas de compresión y de tensión entre una mezcla control de concreto y mezclas de concreto reforzadas con fibras de caña de azúcar. Además, el porcentaje en volumen de fibras de caña de azúcar utilizada fue de 0,5 %, 1,0 % y 1,5 %. La resistencia a compresión se determinó a los 7 y 28 días después de realizar la prueba de curado, mientras que la prueba de tracción de las mezclas de concreto con las relaciones de fibra de caña de azúcar utilizadas se analizó a los 28 días de curado. El resultado de la prueba mostró que el valor óptimo de aditivos de caña de azúcar es de 0,5 %, ya que para este

porcentaje se obtuvo el valor de la resistencia a la compresión más cercano a la mezcla control del concreto, mientras que el valor de la resistencia a la tracción es más alto que el obtenido para la mezcla control, observando además que la sincronización del concreto al agrietamiento se vuelve más lenta. Por lo tanto, el uso de fibra de caña de azúcar adecuada para la adición no supera a 0,5 % de la mezcla de concreto.

Las fibras naturales pueden constituir una posibilidad de uso para modificar las propiedades del hormigón en los países en desarrollo, ya que están disponibles en grandes cantidades y representan una fuente renovable continua. No obstante, estas fibras son afectadas principalmente por la alcalinidad de la matriz cementante del concreto, haciendo que su durabilidad dependa de la protección que tengan las fibras. Asimismo, dependiendo del grado de polimerización de los componentes de las fibras existirá un mayor o menor grado de solubilidad en el medio acuoso o alcalino lo cual puede provocar pérdida de la resistencia mecánica por descomposición cuando son empleadas como refuerzo [3, 4]. La región central de las fibras es responsable de la gran incidencia de los poros permeables en las fibras, ya que absorben una elevada cantidad de agua [3].

Vijay y Arivalagan [5] estudiaron las fibras de sisal, el subproducto de residuos de material industrial se ha incorporado en el concreto estructural porque contribuye a reducir el uso de los recursos naturales. Estos estudios de investigación mostraron un aumento en la resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de sisal con una ganancia hasta un 2 % y también mostró efectos de interacción sinérgica debido a las combinaciones de cenizas de bagazo de caña de azúcar (SBCA), en comparación con el concreto convencional (sin SBCA y fibra de sisal). La presencia de fibras de sisal en el concreto se mostró en falla dúctil con múltiples divisiones y puentes en la formación de grietas, cuando se alcanzó una carga de falla final.

Sudhakar y Babu [6]. Enfatizan que existe un aumento del 2,3 % en la resistencia a la compresión del concreto reforzado con fibra de sisal cuando se compara con el concreto de mezcla normal. Asimismo, en la resistencia a la flexión del concreto

se obtiene un valor de 9,18 % en la adición de fibra de sisal en la mezcla de concreto.

Esta investigación va de la mano con el desarrollo sostenible y la posibilidad de utilizar materiales alternativos de construcción, que permitan reducir la extracción y el uso de materiales convencionales, asimismo, estudia las propiedades mecánicas del concreto (cilindros y vigas) reforzados con fibras de bagazo de caña de azúcar mediante ensayos destructivos y no destructivos y se inicia la búsqueda de posibles sustitutos que le proporcionen al concreto las mismas propiedades tan favorables que le otorgan los materiales convencionales.

2. Materiales y métodos

2.1. Material

Las fibras de bagazo de Caña de azúcar, son procedentes del *Central Azucarero el Palmar San Mateo*, Edo Aragua, Venezuela, las muestras se depositaron en bolsas plásticas a 5 °C para evitar la proliferación de microorganismos que degradasen el material.

Las fibras de bagazo de caña de azúcar sin tratar se cortaron en dos tamaños, corto (c), con un tamaño entre 3 y 4 cm y largo (l) con un tamaño entre 5 y 6 cm, y las fibras que fueron tratadas químicamente con el proceso de acetilación y luego impregnadas con polimetilmetacrilato presentaron una vez cortadas, un tamaño cuyas dimensiones son cortas con una longitud menor o igual a cuatro centímetros.

2.2. Acetilación de las fibras caña de azúcar y tratamiento con polimetilmetacrilato (PMMA)

Las fibras de bagazo de caña de azúcar son producto de reciclaje, tienen carácter polar, absorben grandes cantidades de agua, contienen impurezas, polvo, microorganismos y estuvieron expuestas a procesos mecánicos. En aras de minimizar su deterioro dentro de la matriz cementante se recurrió a un tratamiento que consistió en limpieza, acetilación y polimerización con PMMA, [7, 8], además, la concentración de la solución de NaOH, el tiempo de tratamiento y la

temperatura son parámetros esenciales para evitar disminuir la resistencia de las fibras.

Es necesario resaltar que este procedimiento inicialmente se realizó en las fibras de coco contemplado en las investigaciones “contribución al estudio del comportamiento mecánico y fisicoquímico del concreto reforzado con fibras naturales de coco y bagazo de caña de azúcar para su uso en construcción” [9] y “efecto de las fibras de coco sobre la resistencia a la flexión de mezclas de hormigón” [10]. Por lo tanto, al obtener extraordinarios resultados en las fibras de coco, fue aplicada la misma metodología para las fibras de bagazo de caña de azúcar.

2.3. Dosificación de las fibras

Para la dosificación de las fibras se prepararon mezclas tomando en consideración (0 y 2,5) % de fibras respectivamente con adición de fibras como reemplazo en parte del agregado fino. El porcentaje y tamaño de las fibras fueron definidos así, ya que fueron los mejores resultados han dado en estudios con otras fibras [1, 3, 4, 5, 6]. Se elaboraron mezclas donde permanecieron constantes la cantidad de cemento, grava y la relación agua/cemento ($a/c=0,48$), variando únicamente la cantidad de agregado fino representado por las fibras de bagazo tal como se observa en la Tabla 1. Se caracterizaron las mezclas en estado fresco y endurecido, todas las muestras se ensayaron a los 7, 14, 28, 60 y 128 días, excepto las vigas que fueron ensayadas a 28 días de curado.

Tabla 1: Componentes de la mezcla patrón y la mezcla reforzada con fibras de bagazo con y sin tratamiento para todas las distribuciones de tamaño corto, largo y aleatorio [10].

| Componentes | Mezcla | |
|----------------------|--------|-------|
| | Patrón | 2,5 % |
| Cemento (kg) | 60 | 60 |
| Agua (L) | 27 | 27 |
| Grava (kg) | 135 | 135 |
| Arena (kg) | 135 | 134 |
| Fibra de bagazo (kg) | 0 | 1,5 |
| Polyheed 1026 (L) | 0,33 | 0,33 |

2.4. Caracterización de las mezclas en estado fresco y endurecido

Debido a que en estado fresco la mezcla se hizo menos trabajable al incorporar las fibras de bagazo de caña de azúcar, fue necesario añadir un aditivo químico llamado polyheed 1026, aumentando notablemente la manejabilidad de la mezcla.

Los cilindros fueron elaborados de acuerdo a lo establecido en la Norma Venezolana Covenin 344:2002 [11], la caracterización de la mezcla de concreto en estado fresco se realizó determinando la fluidez y/o la trabajabilidad, a través, del ensayo del *Cono de Abrams* según lo estipulado en la Norma Venezolana Covenin 339:2003 [12], mientras que el proceso de curado de las probetas cilíndricas, se realizó de acuerdo al procedimiento descrito en las Normas Venezolanas Covenin 338:2002 [13] y Covenin 340:2004 [14].

Por otro lado, la elaboración de vigas se realizó siguiendo el procedimiento de la Norma Venezolana Covenin 342:1979 [15]. Asimismo, con el fin de que no ocurrieran cambios en la metodología de mezclado, se prepararon en conjunto la mezcla “Patrón” con cada una de las mezclas que contienen fibras de bagazo de caña de azúcar.

2.5. Ensayos

Los estudios mecánicos realizados a los cilindros consistieron en ensayos de compresión para determinar la resistencia, para lo cual se evaluaron a las edades de 7, 14, 28, 60 y 128 días.

El equipo que se utilizó para los ensayos fue una Prensa Hidráulica con indicador de carga, Marca *Baldwin*, Modelo *Universal* con una capacidad máxima de 200 toneladas. Los ensayos por compresión se realizaron de acuerdo al procedimiento descrito en la Norma Venezolana Covenin 338:2002 [13].

El equipo que se utilizó para los ensayos para determinación de la resistencia a tracción por flexión en las vigas fue una Prensa Hidráulica con indicador de carga, marca *Baldwin*, Modelo *Universal* con una capacidad máxima de 30 toneladas. Para las vigas fabricadas con cada mezcla se determinó la resistencia a la flexión,

según la Norma Venezolana Covenin 342:1979 [15]. Se ensayaron por triplicado cilindros y vigas tanto para la mezcla patrón como para las mezclas reforzadas con fibra de bagazo de caña de azúcar con y sin tratamiento, para las proporciones volumétricas estudiadas y las distribuciones de tamaño corto, largo y tamaño aleatorio.

2.6. Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza ANOVA, para determinar el efecto de las dosis o concentraciones de las fibras incluida. Para el análisis se empleó el software libre R-Plus.

3. Resultados y discusión

3.1. Resistencia a compresión para cilindros de concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar, tamaño corto, a una concentración 2,5 % en volumen

En la Figura 1 se observa que para los cilindros reforzados con fibras de bagazo de caña de azúcar para un tamaño corto, sin tratamiento y a una concentración en volumen de 2,5 % como sustitución en parte del agregado fino, ensayados a los 7 días de curado, la resistencia se redujo a 8,72 MPa con respecto a los cilindros elaborados sin fibras mezcla patrón que proporcionaron una resistencia de 34,32 MPa y se aprecia en la Tabla 2, estando por encima la resistencia de los cilindros sin adición de fibras. Sin embargo, esta resistencia menor, es debido a que el exceso de agua absorbida genera un sustancial incremento de volumen en las fibras, asimismo, la degradación que sufren las fibras natural debida al ataque químico que le produce los elementos alcalinos contenidos en el cemento y las irregularidad del tamaño de las fibras. Al endurecer el concreto y secarse las fibras, éstas se contraen con la consiguiente pérdida de adherencia entre la fibra y la matriz, originando que la resistencia a flexión y tensión del concreto se vean afectadas.

Asimismo, en la Figura 2 se observa que en el caso de las fibras no tratadas con un agente protector debido a que presentan porosidad y por ser higroscópicas, el medio alcalino propio

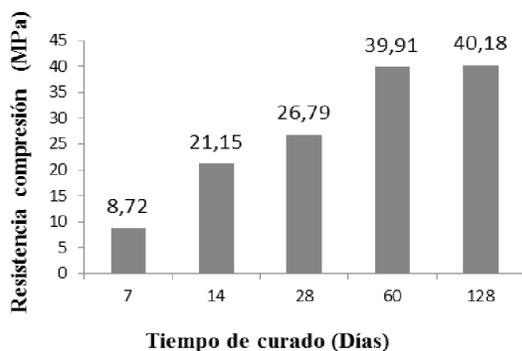


Figura 1: Ensayos resistencia a la compresión de cilindros reforzados con fibras de caña de azúcar con un porcentaje en volumen 2,5 % tamaño corto.



Figura 2: Mezclas de concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de tamaño corto presentando mala adherencia.

Tabla 2: Resultados de ensayos de la resistencia a la compresión de mezcla de concreto patrón [10].

| | Tiempo de curado (días) | | | | |
|-----------------------------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 7 | 14 | 28 | 60 | 128 |
| Resistencia a la compresión (MPa) | 34,32 | 37,09 | 40,08 | 41,27 | 43,35 |

de la matriz de concreto afectó su función, comprometiendo su resistencia y durabilidad. Esto concuerda con lo acotado por Ramakrishna y Sundararajan [16] las fibras sin tratamiento químico, la alcalinidad del agua en los poros del concreto disuelve a la lignina y hemicelulosa y rompe los enlaces entre las microceldas por lo que las fibras se fragmentan perdiendo la capacidad de reforzar al concreto.

Así también, las microceldas se llenan de hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$ y las fibras pierden su flexibilidad. De igual manera ya estas fibras fueron sometidas a un proceso mecánico previo para extraer el azúcar por lo que la durabilidad de la misma se ve comprometida sin un agente protector. No obstante, las fibras evitan el colapso del material en comparación al material sin refuerzo que falla de forma frágil al alcanzar la carga de ruptura.

Sin embargo, a partir de los 28 días la resistencia comenzó a elevarse observándose una tendencia similar a la mezcla patrón tal como se observa en la Tabla 2 a los 128 días de curado. Cabe considerar, por otra parte, que los valores de

resistencia a compresión obtenidos cumplen con los valores estándares o comerciales para concretos de moderadas resistencias según lo expresado por Porrero *et al.* [17] los cuales se encuentran en un rango de 21 y 30 MPa para un tiempo de curado de 28 días.

Asimismo, Bilba *et al.* [18] enfatizan que el efecto de mezclar el bagazo entero crudo con el cemento comercial retrasa los tiempos de fraguado y disminuye la temperatura máxima de hidratación. Esto puede tener un gran interés por los materiales de construcción al ofrecer una buena temperatura, ya que el nuevo material se vuelve menos expansivo en la masa. Los principales compuestos botánicos que tienen un impacto negativo en el entorno son los azúcares solubles en agua, la hemicelulosa y la lignina.

3.2. Resistencia a compresión para cilindros de concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar tamaño largo a una concentración 2,5 % en volumen

Se observa en la Figura 3 que los cilindros reforzados con fibras de bagazo de caña de azúcar para un tamaño largo sin tratamiento y una concentración en volumen de 2,5 % como sustitución en parte del agregado fino, ensayados a los 7 días de curado, arrojaron un valor de resistencia de 21,03 MPa, lo que se considera un resultado satisfactorio en comparación con la mezcla con adición de fibras tamaño corto sin tratamiento.

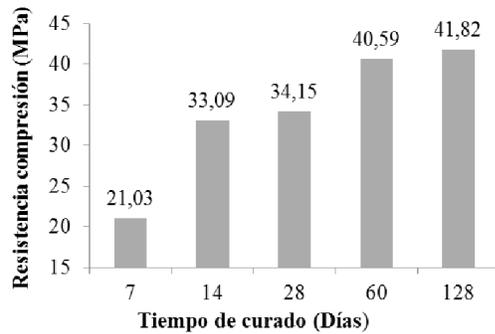


Figura 3: Ensayos resistencia a la compresión de cilindros reforzados con fibras de caña de azúcar con un porcentaje en volumen 2,5 % tamaño largo.

De igual manera a los 28 días de curado la resistencia aumentó, sin embargo, a los 128 días la resistencia comenzó a mostrar variaciones poco significativas con una tendencia similar a la mezcla patrón, mientras que la adherencia mejoró por tratarse de fibras largas lo que genera el incremento de la resistencia, en la Figura 4 se observa una mejor unión entre las fibras y la matriz cementicia si se compara con las fibras mostradas en la Figura 2 que son de tamaño corto y sin tratamiento.

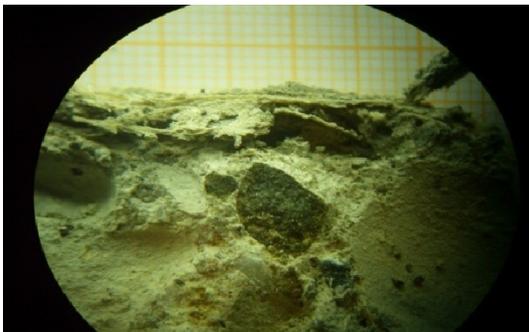


Figura 4: Mezclas de concreto reforzado con fibras de bagazo de caña tamaño largo sin tratamiento presentando mejor adherencia.

3.3. Resistencia a compresión para cilindros de concreto reforzado con fibras tratadas tamaño aleatorio de bagazo de caña de azúcar a una concentración 2,5 % en volumen

En la Figura 5 se observa que para las mezclas reforzadas con fibras de bagazo de caña de azúcar tratada con Polimetilmetacrilato (PMMA)

a una concentración de 2,5 % en volumen, como sustitución en parte del agregado fino, la resistencia obtenida a los 7 días fue de 22,44 MPa siendo ligeramente superior si se compara con la obtenida para las mezclas reforzadas con fibras de tamaño largo sin tratamiento 21,03 MPa, esto es debido a que las fibras estaban recubiertas con PMMA que repele al agua protegiéndolas de la alcalinidad propia de la matriz cementante, además de incrementar la rugosidad de la superficie de la fibra que provoca un aumento en el anclaje mecánico.

Estos resultados concuerdan con Brown *et al.* [19] indicando que luego del tratamiento los microporos en la superficie de las fibras llegan a ser visibles y esto puede ocurrir debido a la lixiviación de la capa cerosa fuera de la cutícula, lo que aumenta la aspereza de la fibra, y facilita la unión mecánica en la interfase matriz concreto.

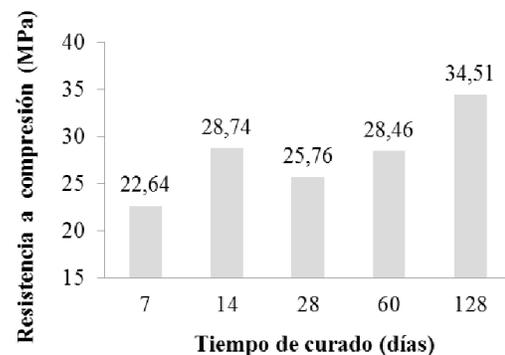


Figura 5: Ensayos resistencia a la compresión de cilindros reforzados con fibras de caña de azúcar con un porcentaje en volumen 2,5 % de fibra tratada y distribución aleatoria para un tamaño corto.

Sin embargo, a partir de los 28 días la resistencia es inferior si se compara con las mezclas reforzadas con fibras de bagazo de caña de azúcar tamaño largo, ya que la resistencia obtenida para los 28, 60 y 128 días fue de 34,51; 40,59; 41,82 MPa, respectivamente, mientras que para las mezclas de concreto con fibras tratadas fue de 29,76; 34,51; 40,1 MPa, para las mismas edades de ensayo, esto se debió a que los materiales compuestos con fibras tratadas contienen vacíos ya que la impregnación incompleta de las fibras con el PMMA, produjo puntos débiles en el material, lo cual no es favorable a alta concentración de esfuerzos que favorecen la

propagación de grietas originando la disminución de la resistencia tal como se aprecia en la Figura 6.

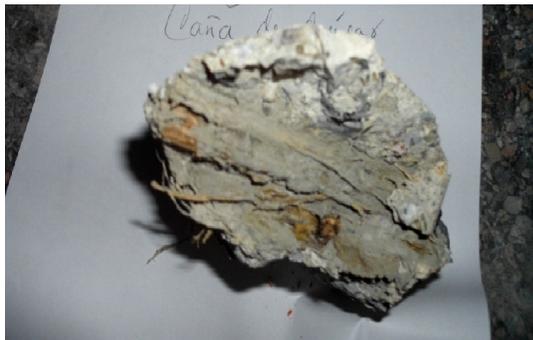


Figura 6: Impregnación incompleta de las fibras de bagazo de caña de azúcar con el PMMA.

Los resultados obtenidos en esta investigación concuerdan con Osorio et al. [1]. Se observó además, que la adherencia de las fibras a la matriz del concreto era aceptable en aquellos perímetros, donde las fibras son uniformes, sin embargo, se presentan esparcimiento entre la fibra y la matriz de concreto, debido a la ausencia de áridos finos, a la irregularidad de la longitud y posiblemente a la degradación que sufre la fibra natural, debido al ataque químico que le producen los elementos alcalinos contenidos en el cemento pese al tratamiento realizado; lo anterior puede generar una menor resistencia en el concreto fibroreforzado, debido a que estos espacio disminuyen la compacidad en el concreto.

3.4. Resistencia a compresión para todos los cilindros reforzados con fibras de bagazo de caña de azúcar tamaño corto, largo y aleatorio con y sin tratamiento a una concentración 2,5 % en volumen

Los resultados obtenidos al ensayar los cilindros reforzados con fibras de bagazo de caña de azúcar como sustitución parcial del agregado fino, para todas las edades y su relación con el tamaño, con y sin tratamiento, son mostrados en la Figura 7 en la cual se observa una disminución de la resistencia para todos los tamaños cortos y largos para fibras sin tratamiento y tamaño aleatorio para fibras tratadas, al compararse con la mezcla patrón sin fibras.

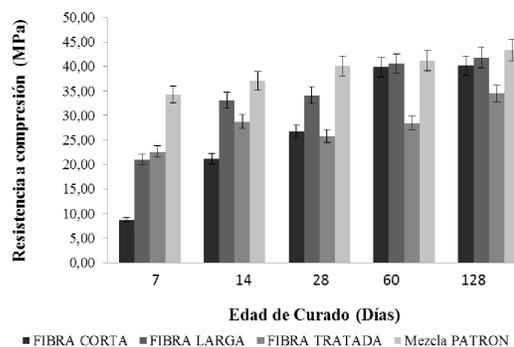


Figura 7: Ensayos resistencia a la compresión de cilindros reforzados con fibras de caña de azúcar con un porcentaje en volumen 2,5 % de fibras con y sin tratamiento de distinto tamaño.

Sin embargo, al cabo de los 128 días de curado los resultados muestran una resistencia similar por lo que, las mezclas con fibras de bagazo de caña de azúcar pueden ser recomendadas para su uso en construcción. No obstante, a edades tempranas la resistencia se ve comprometida.

Nótese que a los 60 días de curado la resistencia obtenida para la mezcla sin fibra denominada mezcla patrón iguala la resistencia a compresión de la mezcla con fibra corta (40,11 MPa.)

Estos resultados concuerdan con Osorio *et al.* [1] al señalar que las fibras de bagazo de caña utilizada en la elaboración del concreto reforzado para ser evaluadas a compresión, le imparten propiedades mecánicas importantes al compuesto, principalmente las probetas con adiciones de fibras entre el 0,5 y 2,5 % en relación al peso total del agregado grueso, y cuyas fibras tengan longitudes entre 15 y 25 mm retenidas en el tamiz N°6, las cuales alcanzan valores de resistencia a compresión a los 14 días de fraguado entre 8,6 y 16,88 MPa., estando por encima de los cilindros sin adición de fibras, es decir, la mezcla patrón.

De igual forma Olutoge *et al.* [20], en su investigación afirman que los resultados muestran que el concreto simple (0 % en volumen de fibra) tenía la mayor resistencia a la compresión de 22,32 MPa a los 7 días, 26,82 MPa a los 14 días, 31,12 a los 21 días y 36,20 a los 28 días. Esto implica que las resistencias a la compresión del hormigón aumentan a medida que aumenta el número de

días. Además, cuanto más aumenta el volumen de fibra en el hormigón, menor es la resistencia a la compresión del hormigón. Hubo una gran reducción en la resistencia a la compresión del concreto cuando el volumen de fibra de bagazo de la caña de azúcar aumentó de 0% a 0,5% y también una resistencia considerable en el concreto al aumentar el volumen de fibra a 0,75%; 1,0% y 1,25%. Esto sugiere que el aumento en el volumen de las fibras de bagazo de caña de azúcar en el concreto tiene poco efecto sobre la resistencia a la compresión del concreto.

El uso de fibras orgánicas provenientes de bagazo de caña de azúcar, podría satisfacer la necesidad de encontrar y aplicar materiales de construcción con tecnologías sustentables. Es cierto que con el uso de estas fibras la resistencia disminuye un poco cuando se compara con la mezcla control o patrón sin fibras, pero todo dependerá de las exigencias del material a preparar. El uso de ellas permitirá construir materiales más flexibles disminuyendo la presencia de microfisuras y macrofisuras y desde el punto de vista ambientalista se le brinda un valor agregado a un desecho.

3.5. *Peso de los cilindros saturados con superficie seca*

En la Figura 8 se observa que la pérdida de peso de los cilindros de concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar fue máxima en aquellas que estuvieron tratadas y secadas en horno a 100 °C, debido a que con el secado se elimina mayor cantidad de agua y con el tratamiento alcalino se diluyó parte de los componentes de las fibras, lo cual fue observado cuando fueron sometidas al proceso de acetilación en donde el agua de lavado tomó una coloración bastante marrón eliminando ceras e impurezas naturales y artificiales.

También, se observa que el peso de los cilindros con fibras tratadas es menor en comparación con las fibras no tratadas, debido a que se incrementa el área superficial eficaz disponible y disminuye el peso de las fibras.

La tenacidad es la energía total absorbida para romper un espécimen de concreto a la flexión. Esta propiedad se ha visto incrementada con la adición de fibras ya que en las zonas de microgrietas al

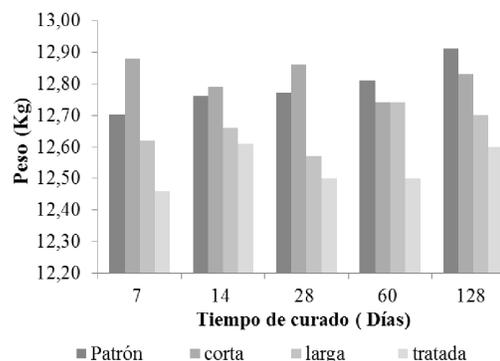


Figura 8: Peso de los cilindros reforzados con bagazo de caña de azúcar.

momento de aplicar una carga las fibras evitan que se rompa o disgregue el material. Las fibras de bagazo de caña de azúcar lograron mantener unidos los cilindros y vigas, por lo que le aportaron durabilidad a las mezclas de concreto provocando ventajosamente la disminución de las fisuras tanto en estado fresco como endurecido. En la Figura 9 se observan cilindros ensayados a los cuales se les determinó la resistencia a compresión mostrando comportamiento similar a los que experimentó la mezcla patrón, soportando la carga sin llegar a la fractura.



Figura 9: Concreto reforzado con fibras experimentando buena tenacidad.

3.6. *Análisis estadístico para cilindros reforzados con fibras de bagazo de caña de azúcar*

Para las fibras de caña de azúcar se consideró solo la concentración en volumen 2,5% como sustitución en parte del agregado fino, se analizó el efecto del tamaño de la fibra respecto a la

mezcla patrón que no contiene fibras. En este caso se observó que las fibras de bagazo de caña de azúcar no se adhieren fácilmente a la mezcla requiriendo más tiempo para que ocurra este proceso, de acuerdo al análisis de varianza se obtuvo que a partir de los 28 días de curado es que se obtiene una mezcla parecida a la mezcla patrón, encontrándose que a una concentración en volumen de 2,5 % tamaño largo produce una alta resistencia, sin embargo, al transcurrir los días de curado las mismas comienzan a perder resistencia y dejan de comportarse como la mezcla patrón.

3.7. Estudio de las Vigas reforzadas con las fibras de bagazo de caña de azúcar a una concentración en volumen 2,5 %

El concreto es un material frágil y de baja resistencia a flexo tracción, debido a su falta de capacidad para soportar deformaciones, en este sentido se analizó la resistencia a la flexión de las vigas cuando son preparadas con mezclas reforzadas con fibras de bagazo de caña de azúcar como sustitución en parte del agregado fino.

En cuanto a los valores de la resistencia de vigas reforzadas y su relación con el tamaño, con y sin tratamiento realizado a las fibras, son mostrados en la Figura 10 donde se observó una disminución en el módulo de ruptura para todo los tamaños corto, largo y aleatorio de fibras con y sin tratamiento al compararse con la mezcla patrón. La resistencia más baja obtenida fue 2,38 MPa para las mezclas reforzadas con fibras tamaño largo sin tratamiento al compararse con la mezcla patrón, cuya resistencia fue 4,63 MPa, esto se debió a que las vigas reforzadas presentaron falta de capacidad para soportar deformaciones.

Esto implica que hubo una deficiente adherencia en algunos sitios de la viga existiendo puntos débiles entre las fibras y la matriz cementante, además, como no estaban tratadas químicamente mediante el proceso de acetilación y recubierta con PMMA, es posible que la absorción de humedad de las fibras haya perjudicado los valores tan bajos de resistencia a flexión. Estos resultados concuerdan con Águila y Sosa, [21] quienes usaron cenizas de caña de azúcar y las muestras contentivas de ceniza de bagazo de caña no mostraron posibilidades

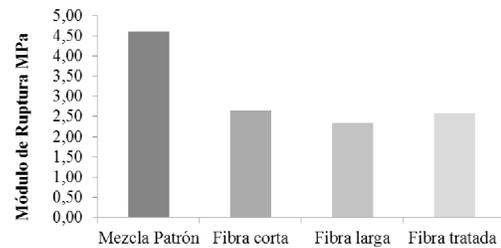


Figura 10: Resistencia de vigas reforzadas con las fibras de bagazo de caña de azúcar medida a los 28 días de curado.

de ser empleadas como material puzolánico, sin embargo, en el análisis de su composición química se pudo apreciar que se presentaron en el material altos contenidos de humedad con un 10,72 % lo que pudo afectar la resistencia.

A pesar de que no se obtuvieron buenos resultados en el módulo de ruptura al compararse con la mezcla patrón, y las propiedades mecánicas se vieron comprometidas, en la inspección visual se logró ver que la adición de fibras al concreto disminuyó el agrietamiento del concreto en su estado endurecido y cuando el espécimen fue ensayado éste permaneció unido, no hubo desprendimiento ni disgregación, debido a que las fibras sirvieron como unión entre las partes y le proporcionó a la viga mayor flexibilidad.

Es de mucha importancia acotar que las fibras contenidas en las vigas, controlan las microfisuras que se pueden originar durante las primeras 24 horas y detienen su desarrollo a macrofisuras, evitando, que la estructura donde es usada este tipo de mezcla colapse, permitiendo además que la mezcla de concreto desarrolle su mejor forma en cuanto a sus características.

Si se compara con las mezclas reforzadas con fibras de coco [9] estas presentaron una menor velocidad de evaporación de agua lo que reduce aún más la posibilidad de fisuramiento. Tanto en estado fresco como en estado endurecido, el concreto es susceptible a fisurarse; es por ello que si llegase a presentarse un patrón de fisuración dado, se espera que la estructura continúe funcionando y que el ancho de la fisura sea controlado y que no crezca, es decir, las fibras limitan el crecimiento del ancho

de la fisura.

En contraste con Olutoge *et al.* [20], muestran en su investigación que el concreto simple 0% volumen de fibras de bagazo de caña de azúcar tiene las resistencias a la flexión más altas de 2,24 MPa a los 7 días, 2,48 MPa a los 14 días, 3,14 a los 21 días y 3,15 a los 28 días. Esto implica que las resistencias a la flexión del concreto aumentan a medida que aumenta el número de días, la resistencia a la flexión disminuye con el volumen de fibras en el concreto. Es decir, cuanto mayor sea el volumen de fibras en el concreto, menor será la resistencia a la flexión del concreto.

3.8. Análisis estadístico de las vigas reforzadas con fibras de bagazo de caña de azúcar

Se verificó el cumplimiento de los supuestos del ANOVA, y se pudo determinar el efecto de las fibras sobre las vigas tomando como referencia una mezcla denominada blanco, encontrándose que la mayoría de las mezclas a las cuales se adicionó fibras de caña se alejaron de la mezcla patrón

4. Conclusiones

Los concretos reforzados con fibras naturales con bagazo de caña de azúcar tienen el potencial para ser usados como materiales de construcción económicos, ya que su tendencia a medida que transcurre el tiempo de curado es similar a las mezclas elaboradas de manera tradicional. Las fibras naturales son materiales que actúan como un alternativa tecnológica para un amplio rango de aplicaciones donde sea requerida la detección y el monitoreo de fisuramiento. El concreto fibroreforzado le permite a la estructura, después de la fisuración, continuar “absorbiendo” carga sin colapsar y continuar funcionando. De allí la importancia de reforzar los concretos con fibras aportándole características específicas y ventajosas para los distintos ramos de la construcción.

La selección de una u otra fibra natural como material de refuerzo va a depender de las propiedades finales de diseño seleccionadas. En función de la dosificación, de las longitudes de fibras y de las propiedades de las mismas se confiere al concreto propiedades distintas, de esta

manera se acentúan más unas propiedades sobre otras en función de los distintos usos y aplicaciones del concreto reforzado con fibras.

El proceso de impregnación de las fibras de bagazo de caña de azúcar con PMMA no fue un método eficaz, por lo tanto falló la unión entre fibras, polímero y matriz cementante. Estas no se recubrieron en su totalidad dejando puntos sin protección y expuestas a la absorción de humedad y del ataque alcalino propio de las mezclas de concreto, lo que permitió obtener propiedades mecánicas muy bajas a edades temprana de curado en comparación con fibras sin tratamiento. Para futuras investigaciones es recomendable el uso de un agente acoplante para mejorar la interfase entre las fibras y el polímero y mejorar resistencia del concreto fibroreforzado.

5. Referencias

- [1] J. Osorio, F. Varón y J. Herrera. Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar. *DYNA*, 74(153), 2007.
- [2] F. Sheikh, H. Herman, and N. Azmi. Properties of sugarcane fiber on the strength of the normal and lightweight concrete. In *MATEC Web of Conferences*, volume 103. EDP Sciences, 2017.
- [3] S. Quintero y L. González. Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto. *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, 20:134–150, 2011.
- [4] A. Silva. Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose. Título de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2002.
- [5] A. Vijay and S. Arivalagan. Engineering properties on the sugar cane bagasse with sisal fibre reinforced concrete. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(24):15142–15146, 2017.
- [6] A. Sudhakar and A. Babu. Investigation of effect on various fibres on the mechanical properties of bagasse ash blended with high performance concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(6):1756–1759, 2017.
- [7] C. Juárez, P. Rodríguez, R. Rivera y M. Rechy. Uso de las fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en el concreto. *Ciencia UANL*, 6(4):465–476, 2003.
- [8] Y. Cao, S. Shibata, and I. Fukumoto. Mechanical properties of biodegradable composites reinforced with bagasse fibre before and after alkali treatments. *Composites part A: Applied science and Manufacturing*, 37(3):423–429, 2006.

- [9] B. Paricaguán. *Contribución al estudio del comportamiento mecánico y fisicoquímico del concreto reforzado con fibras naturales de coco y bagazo de caña de azúcar para su uso en construcción*. Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Carabobo, Venezuela, 2015.
- [10] B. Paricaguán, C. Albano, R. Torres, N. Camacho, J. Infante, and J. Muñoz. Effect of the coconut fibers on the flexural strength of concrete mixtures. *DYNA*, 88(4):424–432, 2013.
- [11] COVENIN. COVENIN 344:2002, Concreto fresco. Toma de muestras. (1^{ra} Revisión). COVENIN, 2002.
- [12] COVENIN. COVENIN 339:2003, Concreto. Método para la medición del asentamiento con el cono de Abrams. (2^{da} revisión). COVENIN, 2003.
- [13] COVENIN. COVENIN 338:2002, Concreto. Método para la elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros de concreto. (2^{da} revisión). COVENIN, 2002.
- [14] COVENIN. COVENIN 340:2004, Concreto. Elaboración y curado de probetas en el laboratorio para ensayos a flexión. COVENIN, 2004.
- [15] COVENIN. COVENIN 342:1979, Método de ensayo para determinar la resistencia a la tracción por flexión del concreto en vigas simplemente apoyadas con cargas a los tercios del tramo. COVENIN, 1979.
- [16] G. Ramakrishna and T. Sundararajan. Studies on the durability of natural fibres and the effect of corroded fibres on the strength of mortar. *Cement and Concrete Composites*, 27(5):575 – 582, 2005.
- [17] J. Porrero, C. Ramos, J. Grases y Velazco G. *Manual del Concreto Estructural*. SIDETUR, Caracas, Venezuela, 2008.
- [18] K. Bilba, M. Arsène, and A. Ouensanga. Sugar cane bagasse fibre reinforced cement composites. Part I. Influence of the botanical components of bagasse on the setting of bagasse/cement composite. *Cement and Concrete Composites*, 25(1):91–96, 2003.
- [19] A. Brown, L. Matellanes, A. Delgado, E. Momeñe, J. Txarroalde, M. Serantes, J. Leal y A. Renté. Disminución del empleo de materiales plásticos a partir de la revalorización del bagazo cubano. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 8(4):287–299, 2007.
- [20] F. Olutoge, O. Ofuyatan, A. Rachael y E. Opaluwa. Strength characteristics of concrete reinforced with sugarcane bagasse fiber. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 12(3):68–71, 2015.
- [21] I. Águila y M. Sosa. Evaluación físico químico de cenizas de cascarilla de arroz, bagazo de caña y hoja de maíz y su influencia en mezclas de mortero, como materiales puzolánicos. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 23(4):55–66, 2008.

World trend in the elaboration of cocoa derived products

Rosangel Gómez-Molina, Samuel Villanueva*, Magaly Henríquez

Gerencia de Proyectos de Investigación, Desarrollo e Innovación, Centro Nacional de Tecnología Química, Caracas, Venezuela

Abstract.- In Venezuela, cocoa has been characterized by having the stamp of exquisite tones of aromas and flavors, valid properties to categorize it worldwide as one of the best. This research propose a review on cocoa products elaboration, with an impact on food, pharmaceutical and cosmetic market; easily prepared and with low investment cost. A systematic exploration based on patents was performed. Finding a range of products both in the food industry (instant drink, cheese with chocolate cover, alcoholic beverage), as well as in pharmaceutical and cosmetic products (extraction of polyphenols, soaps). According to the analysis in the last twenty (20) years, obtaining new products has been led by Japan, followed by the United States, China and Russia, reflecting the interest of non-producing countries in product development and innovation. The growth has been progressive, suggesting strategic approaches to patenting, dominated by European and Asian companies. This study has allowed discovering data of great interest necessary to understand global trends, which will allow the development of scientific-technological capabilities linked to the generation of new products aimed at entrepreneurs, industries and food services.

Keywords: cocoa; derived products; food market, pharmaceutical market; cosmetic market.

Tendencia mundial en la elaboración de productos derivados del cacao

Resumen.- En Venezuela, el cacao se ha caracterizado por tener el sello de exquisitas tonalidades de aromas y sabores, propiedades válidas para categorizarlo a nivel mundial como uno de los mejores. Esta investigación propone una revisión sobre la elaboración de productos derivados del cacao, con impacto en el mercado alimentario, farmacéutico y cosmético; de fácil preparación y con bajo costo de inversión. Se realizó una exploración sistemática en base a patentes. Encontrándose una gama de productos tanto en la industria alimentaria (bebida instantánea, queso con cubierta de chocolate, bebida con grado alcohólico), como en la farmacéutica y cosmética (extracción de polifenoles, jabones). Según el análisis en los últimos veinte (20) años, la obtención de nuevos productos ha estado liderada por Japón, seguido de Estados Unidos, China y Rusia, reflejando el interés de los países no productores en el desarrollo e innovación de productos. El crecimiento ha sido progresivo, lo que sugiere enfoques estratégicos para patentar, dominado por empresas europeas y asiáticas. Este estudio ha permitido descubrir datos de gran interés necesarios para comprender las tendencias mundiales, lo que permitirá desarrollar capacidades científico-tecnológicas vinculadas con la generación de nuevos productos orientados a emprendedores, industrias y a servicios de alimentación.

Palabras clave: cacao; productos derivados; mercado alimentario; mercado farmacéutico; mercado cosmético.

Recibido: 21 de enero, 2019.

Aceptado: 26 de julio, 2019.

1. Introducción

El cacao venezolano, gracias a su privilegiada geografía y biodiversidad, es considerado uno de los mejores del mundo. Es un producto que a través

de los años ha mostrado un gran dinamismo para las exportaciones en nuestro país, identificado como el primer bien agrícola exportable, debido al interés de mercados internacionales, específicamente el mercado europeo [1].

Los países productores de cacao liderizados por Costa de Marfil y Ghana son los que ocupan el 76 % del mercado de las exportaciones, y el 17 % por países pertenecientes a América Latina, por su parte los principales compradores de cacao en grano son los países desarrollados que no lo producen, quienes dirigen sus esfuerzos a la formulación de productos en base a cacao

* Autor para correspondencia:

Correo-e: publicacionesgpidi.cntq@gmail.com (S. Villanueva)

especialmente el chocolate que ha representado por mucho tiempo una fuerte tradición a nivel mundial [2]. Es por ello que se hace difícil entender que el cacao pueda limitarse a un solo uso, ya que se ha demostrado que contiene sustancias con alto potencial nutricional y farmacológico, al poseer polifenoles y ácidos grasos tales como ácido esteárico, palmítico y oleico. Este contenido graso brinda propiedades humectantes y/o emolientes [3].

El grano de cacao resulta eficaz para obtener productos semiprocesados que muestran capacidad para incrementar su participación tanto en la gastronomía mundial como en la economía. Parte de éste interés en la industria alimentaria está fundamentado en la diversidad de productos derivados del cacao; pasta, polvo, manteca y licor de cacao son subproductos claves para la elaboración de chocolates, bebidas y otras combinaciones que terminan deleitando al consumidor. De igual manera, el cacao tiene aplicaciones en la industria farmacéutica, en la fabricación de medicamentos, cosméticos y jabones.

El enfoque del presente trabajo está orientado a utilizar conocimientos y creatividad, que propongan nuevas aplicaciones y brinden una gran oportunidad al sector, ante la perspectiva de propiciar líneas de productos con valor agregado que representen una fuente de ingreso para emprendedores, industrias y servicios de alimentación, abriendo las puertas a nuevos nichos de mercado nacional e internacional. Por lo antes expuesto, y como parte de la diversificación del mercado de productos terminados, se propone la elaboración de productos derivados del cacao, con impacto en el mercado alimentario y farmacéutico, de fácil preparación y con bajo costo de inversión. A lo largo de esta investigación se han descubierto datos de gran interés que han sido necesarios para comprender las tendencias mundiales referentes al uso y cuáles son los países que dominan el análisis bibliométrico y patentométrico.

2. Metodología

El procedimiento consistió en una revisión sistemática de la información mediante el uso

de ecuaciones de búsqueda empleando meta-búscadores con la aplicación de operadores booleanos en textos, publicaciones y patentes. Mediante los operadores booleanos se orienta la obtención de resultados deseados, utilizando la plataforma PatentInspiration® (PI), los datos de patentes proporcionan indicadores de las actividades inventivas. Se incluyeron filtros para obtener la información deseada tales como aparición en el título y resumen con la finalidad de que aquellas patentes que incluyan los términos de la ecuación sean analizadas. De igual manera, se utilizó una sola patente por familia para eliminar las tecnologías repetidas, sin vacíos en el título y resumen con el propósito de excluir los estudios que no estuviesen relacionados directamente con el tema de interés. Posteriormente, se realizó la selección de códigos pertenecientes a la Clasificación Internacional de Patentes (CIP) o International Patent Classification (IPC) y por último se estableció un período de tiempo de veinte (20) años desde 01/01/1997 hasta 31/12/2017.

La información obtenida a partir de la ecuación de búsqueda alcanzando un total de diez mil setecientos seis (10.726) patentes, con la aplicación de los filtros se descartaron ocho mil doscientos treinta y cinco (8.235) dando como resultado final dos mil quinientos noventa y dos (2.592) patentes. La selección de los códigos permitió obtener estudios de interés, los cuales respondieron al objetivo general planteado. Los resultados obtenidos fueron analizados e interpretados así como el levantamiento de información estadística a través de indicadores que resultó pertinente para el desarrollo de la temática seleccionada.

3. Resultados y discusión

3.1. Cantidad de patentes por país aplicante y su representación porcentual

Las patentes por países aplicantes está dominada por Japón con un 20,85 %, seguida con un 13,13 % Estados Unidos, China con un 12,01 % y Rusia con un 9,48 %. Continuando el orden de liderazgo entraría en el 5to lugar Corea, seguido por Suiza, Alemania, Francia, Reino Unido, España, Países bajos, Bélgica, entre otros y el continente

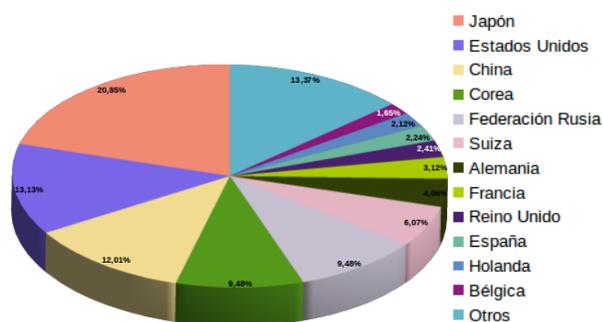


Figura 1: Cantidad de Patentes (%) por país aplicante, período (1997–2018)

latinoamericano representado por Brasil, seguido de Colombia, México, Ecuador y Perú (Figura 1).

Esto se debe a que el mercado japonés es uno de los más grandes y desarrollados en el mundo, orientado al consumo, con una sociedad de alto poder adquisitivo y estándares de calidad que le permiten desarrollar nuevos productos, lo que ofrece oportunidades para diversificar los destinos de exportación y ser un país influyente en el desarrollo económico y tecnológico del continente Asiático. Es por ello que en los últimos tiempos se ha convertido en uno de los primeros países a nivel mundial en adquirir el grano de cacao, tomando en cuenta criterios de selección para la compra del mismo como el precio, sabor, inocuidad y confiabilidad. El Ministerio de Agricultura, Silvicultura e Industrias Pesqueras de Japón o The Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (MAFF) y el Ministerio de Salud, Trabajo y Bienestar Social o The Ministry of Health Work and Social Welfare (MHLW), coordinan sus esfuerzos para mantener altos niveles de regulación sobre la seguridad alimentaria y la calidad de las importaciones [4].

En este sentido, el cacao con certificación de comercio justo (Fair Trade) es cada vez más demandado, así como los derivados que provengan de este tipo de cacao. Japón en aras de incentivar el desarrollo de productos innovadores, promover una nueva forma de ingreso y aportar al crecimiento comercial del país, fomenta un mercado incipiente para los exportadores a través de la Organización Japonesa de Comercio Exterior

o Japanese External Trade Organization (JETRO).

La JETRO elabora perfiles comerciales mercado–producto; por lo que estableció la Ley del Arancel de Aduanas, que propone tasas aduaneras inferiores a las propuestas en la Organización Mundial del Comercio (OMC), en determinados productos. Así definen que, la tarifa arancelaria aplicada a la pasta de cacao con Tasa Preferencial para países desarrollados tiene un 5% de tarifa aplicada, y ad valorem de 3,50%, mientras que el cacao en grano, crudo o tostado tiene la Tarifa de la Nación más favorecida con 0,00% de aranceles [5].

Lo cual incentiva a los emprendedores y empresas del país a la importación del rubro y posterior transformación en productos capitalizables [4].

Por otra parte los gustos y preferencias de los consumidores en el mercado japonés de los chocolates están en continua transformación. Según la Asociación del cacao y chocolate de Japón, el consumo per cápita aun es bastante bajo, para el año 2014, establecieron un consumo de dos (2 kg) per cápita de chocolate en el año mientras que los países europeos como Alemania y Suiza consumieron doce (12 kg) y diez (10 kg) respectivamente [4]. Recientemente, la preferencia es mayor por productos seguros y certificados; por lo que se abren oportunidades para productos que ofrecen trazabilidad y beneficios para la salud [6].

3.2. Cantidad de patentes y molienda de cacao por continente

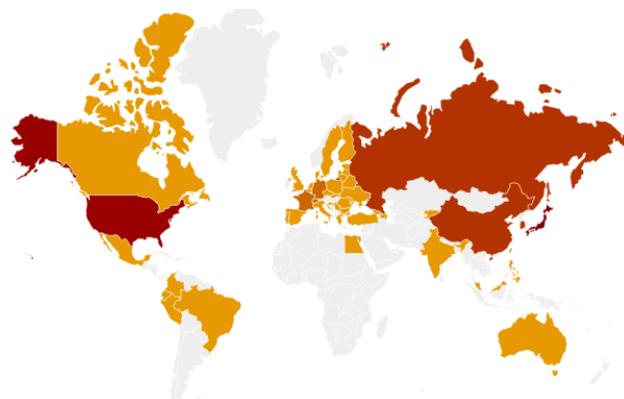


Figura 2: Patentes por país aplicante, período (1997–2018)

La cantidad de patentes por continente fue analizada; la lideriza el continente Asiático con un 44,39 % de estudios dirigidos a la obtención de nuevos productos en el ámbito alimentario y farmacéutico, seguido del continente Europeo con 38,84 %, posteriormente América del Norte tiene el tercer lugar con un 13,72 %, luego América del Sur con 2,09 % y por último Oceanía y África con 0,89 % y 0,06 % respectivamente (Figura 2).

A pesar de que la mayor producción mundial de cacao está encabezada por el continente africano, seguida de los países de América y por último Asia y Oceanía, la demanda mundial de cacao en grano como consumo primario está dominada por países de mayor desarrollo industrial que no son productores, reflejando el nuevo enfoque de las tendencias mundiales en la búsqueda de ampliar las aplicaciones del cacao en los sectores alimentarios y farmacéuticos, sin embargo Europa sigue siendo el principal importador de cacao en grano con 63 % destacando la participación de los países como Suiza, Alemania, Francia, Reino Unido, España y Holanda, los cuales son los mayores consumidores de chocolate y sus derivados, le siguen América con 19,3 % liderada por Estados Unidos, seguido a distancia por Brasil, Asia y Oceanía con 21,7 % y África con 0,6 % [2].

La Organización Internacional del Cacao o The International Cocoa Organization (ICCO) establece que el volumen de cacao que es procesado para elaborar subproductos, tales como pasta o licor, manteca y polvo de cacao es denominado molienda o “grinding” [1], en el cual se observa que Europa es quien predomina, destinando una parte de la molienda a la fabricación de chocolate, dirigiendo su consumo final a Europa oriental y Rusia. En segundo lugar, se encuentran los países de África como Costa de Marfil y Ghana que tienen como objetivo principal la exportación de subproductos del cacao, adicionando valor agregado a la materia prima, para su posterior consumo intermedio en otras regiones del mundo, así como instalaciones en dichos territorios de plantas procesadoras filiales de corporaciones transnacionales, permitiendo el desarrollo de cadenas globales de valor con casa matriz en los Estados Unidos y Europa, que

realizan significativas inversiones en investigación de mercados y tecnología, así como publicidad y marketing de sus productos, dando lugar a un amplio posicionamiento de los mismos a escala mundial [7].

3.3. Empresas y principales innovadores a nivel mundial que se dedican a elaborar productos derivados del cacao dirigidos al mercado alimentario y farmacéutico

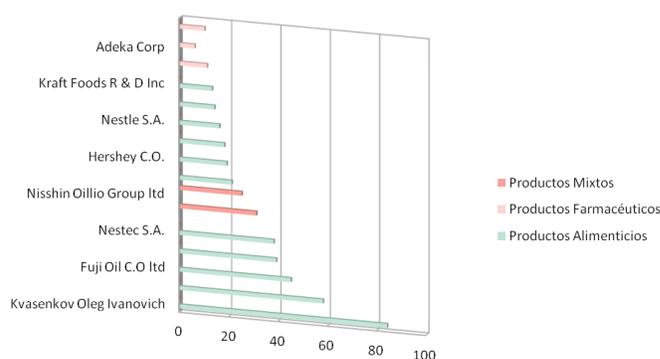


Figura 3: Número de patentes por institución aplicante en los países líderes en el sector alimentario y farmacéutico, período (1997–2018)

El cacao al poseer sabores y aromas únicos de cada región se ha convertido en una de las materias primas agrícolas que generan divisas a los países productores. Los verdaderos protagonistas del mercado son tanto las sociedades comerciales internacionales (traders) que compran el cacao en grano, como las industrias confiteras que lo transforman y hacen llegar al consumidor todo tipo de productos a base de cacao [8] (Figura 3).

Al identificar y analizar las principales empresas que dirigen sus esfuerzos a la producción de derivados del cacao de interés en el mercado alimentario está encabezada por el ruso Kvasenkov Oleg Ivanovich, seguido de compañías japonesas como Morinaga & Co y Fuji Oil Co Ltd las cuales proporcionan dulces y otras confiterías, por su parte empresas multinacionales americanas dominan el mercado de la manufactura y venta de productos de chocolate, confitería, alimentos y bebidas tales como Mars Inc, Hershey Co., Kraft Foods R & D Inc, sin dejar a un lado corporaciones suizas

que presta servicios de investigación científica y desarrollo tecnológico como lo son Nestec, Barry Callebaut quien ocupa un papel importante en la formulación de productos al ser el mayor proveedor de chocolate para la industria procesadora y Nestlé S.A controlando alrededor del 50 % del mercado [7].

Por su parte, se evidenció en menor proporción, las empresas aplicantes en el área alimentaria y farmacéutica como Meiji Seika Kaisha, Nisshin Oillio Group Ltd de origen japonés, las cuales ofrecen productos de alta calidad para satisfacer las necesidades de los consumidores, mientras que Natraceutical S.A conocida actualmente como Laboratorio Reig Jofre SA. es una corporación multinacional española, con referencia en la investigación y desarrollo de ingredientes funcionales naturales, elementos activos y suplementos nutricionales para la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética y Amorepacific Corporation que es un empresa de origen coreano que opera treinta tres (33) marcas de productos de salud, belleza y cuidado personal [7].

Tabla 1: Los veinte primeros innovadores y su número de patentes, período (1997–2018)

| Innovador | N° patentes | País origen |
|--------------------------------|-------------|----------------|
| Kvasenkov Oleg Ivanovich | 85 | Rusia |
| Tvorogova Antonina Anatol Evna | 23 | Rusia |
| Belozerv Georgij Avtonomovich | 23 | Rusia |
| Kamei Masanori | 20 | Japón |
| Bernaert Herwig | 18 | Estados Unidos |
| Romanczyk Leo J Jr | 17 | Estados Unidos |
| Schmitz Harold H | 14 | Estados Unidos |
| Lee Ki Won | 13 | Corea |
| Hashizume Shuichi | 12 | Suiza |
| Hansen Carl Erik | 12 | Suiza |
| Eom Ji Hye | 12 | Corea |
| Wen Hongrui | 11 | China |
| Zhou Changming | 11 | China |
| Zhang Xudong | 11 | China |
| Park Yong Min | 11 | Corea |
| Kochhar Sunil | 10 | Suiza |
| Tsutsumi Haruhiko | 10 | Japón |
| Lee Sang Jun | 10 | Corea |
| Song Won Jong | 10 | Corea |
| Kim Tae Keun | 10 | Corea |

Los mercados potenciales no pertenecen solo a aquellas compañías que venden tabletas, dulces y confitería sino a las compañías que están ubicadas a lo largo de producción. El aumento de

las invenciones que sugiere enfoques estratégicos para patentar productos del sector alimentario y farmacéuticos pertenecen a empresas asiáticas principalmente las japonesas y empresas europeas. En el caso de los innovadores o investigadores, la distribución de las tecnologías es bastante variable, sin embargo mantiene el patrón de los países de orígenes tal como Rusia, Japón, China, Corea, Suiza y Estados Unidos como muestra la Tabla 1.

3.4. Clasificación Internacional de Patentes (CIP)

Se procedió a utilizar los códigos IPC (Figura 4), evidenciando que el 30 % de los estudios están dirigidos a elaboración de productos en base a cacao, postres, confitería y helados y un 20 % representado por el desarrollo de productos en el mercado farmacéutico, lo que puede dar lugar a que los granos de cacao no solo poseen sustancias con potencial nutricional sino también farmacológico importante.

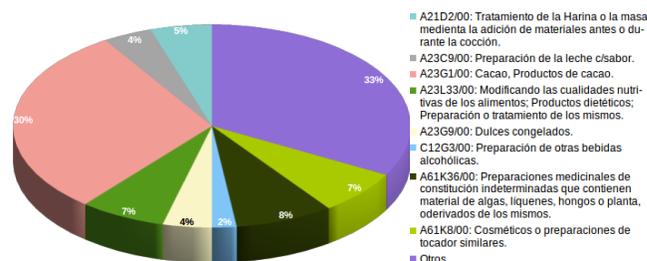


Figura 4: Patentes en cacao por Clasificación Internacional de Patentes (CIP) o International Patent Classification (IPC), período (1997–2018)

El éxito de estos productos deben estar sincronizados con ser innovadores, utilizar materia prima de calidad y ajustados a las preferencias de los consumidores que conllevarán a la posibilidad de crecimiento sostenible para el cacao. Alianzas comerciales han permitido que el cacao orgánico y de comercio justo ya haya dado sus primeras incursiones en este mercado.

3.5. Crecimiento mundial en la elaboración de productos alternativos de cacao

El chocolate y bombones son las formas más comunes de consumir el cacao. A su vez, la

manteca y el licor de cacao (pasta de cacao obtenida luego del prensado de los granos) son empleados principalmente como ingredientes en la elaboración de chocolate, para conferirle propiedades sensoriales y físicas. Por otro lado, a partir del cacao se puede obtener un licor (bebida con alcohol, que debe distinguirse del subproducto que lleva el mismo nombre), así como diversas preparaciones culinarias en las que participa el chocolate.

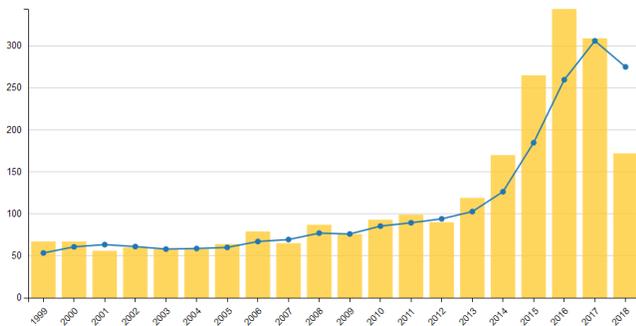


Figura 5: Número de patentes por año a nivel mundial, período (1997–2018)

Sin embargo, la Figura 5 muestra un crecimiento progresivo en el número de patentes relacionadas con el desarrollo de tecnologías para la obtención de productos derivados del cacao dirigidos al mercado alimentario y farmacéutico, reflejando el interés de los países no productores en el desarrollo e innovación de productos distintos a una tradicional barra de chocolate, orientados a alimentos saludables en virtud de los cambios en los hábitos alimentarios de la población, con la intención de mantener y atraer a nuevos consumidores. Se observa la mayor alza para el año 2016 debido a que existió una sobreproducción en los mayores productores a nivel mundial como lo son Costa de Marfil y Ghana mencionados anteriormente, debido a las excelentes condiciones climatológicas [9].

La tasa de crecimiento se evaluó en un periodo de cada cinco (5) años desde 1997 hasta 2017 (Figura 6), evidenciando un aumento considerable en el año 2010 hasta la actualidad. Otro rasgo relevante en el incremento del número de patentes es el auge de las cadenas globales de valor,

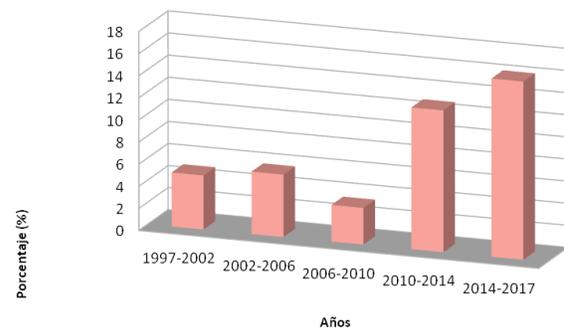


Figura 6: Tasa de crecimiento del número de patentes a nivel mundial, período (1997–2017)

potenciando así la expansión de esta actividad económica.

3.6. Formulación de productos en base a cacao con sustitución de ingredientes importados por materia prima local

Una vez evaluados los parámetros estadísticos relacionados con la actividad patentométrica, se procedió a realizar una evaluación de las distintas propuestas de productos derivados del cacao dirigidos al mercado alimentario y farmacéutico. Se presentan a continuación los productos de fácil invención y con bajo costo de inversión.

Productos derivados del cacao dirigidos al mercado alimentario

En el 2017, Pengfei, D. y colaboradores [10] plantearon una bebida instantánea en polvo a base de cacao, enriquecida con Maca. Entre los ingredientes mencionan el uso de 30 a 35 % de cacao en polvo, 20–25 % de manteca de cacao, 20–25 % de maca en polvo, 10–15 % de leche desnatada en polvo, 5–8 % de un agente edulcorante sin azúcar, 1,5–2 % de un agente emulsionante y 0,3 % de vainilla. Su preparación consiste en calentar agua a una temperatura entre 80 a 90 °C (la cantidad dependerá del peso total del producto), una vez que el agua haya alcanzado la temperatura, agregar todos los ingredientes y agitar uniformemente. Luego deshidratar la mezcla anterior hasta obtener un polvo y finalmente resulta la bebida de maca con chocolate.

Maca es una raíz proveniente del Perú, rica en aminoácidos esenciales como la arginina y lisina, así como en ácidos grasos insaturados tales como el ácido linoleico y linoléico, los cuales promueven la disminución de padecer de enfermedades cardíacas. Aunado a esto, Maca contiene ingredientes activos como el zinc, potasio, hierro, calcio, oligoelementos, entre otros. La moringa o amaranto puede funcionar muy bien como sustituto de la Maca.

El producto terminado posee un alto contenido nutricional, de fácil absorción, al agregarle polvo de cacao su sabor es agradable. Durante el proceso se menciona el uso de un deshidratador por lo que se sugiere incursionarse en la elaboración artesanal del equipo como primera propuesta. En cuanto al envase se debe tomar en cuenta el costo y que sean biodegradables para el cuidado del medio ambiente, atributo que le proporciona valor agregado al producto.

Para el año 2015 el investigador ruso Pakocn [11] presenta un queso tipo yogur de consistencia espesa con microbiota viva y cubierto con chocolate negro, en forma de barra. Los ingredientes protagonistas son los microorganismos *Streptococcus thermophilus sp.* y *Lactobacillus bulgaricus sp.* (*Lactobacillus delbrueckii bulgaricus sp.*) utilizados tradicionalmente para la fermentación del yogur sin embargo en esta caso son usados para conferirle al queso el sabor ácido y producir la formación de cuajo. La invención propone de 8–15 % de azúcar u otros edulcorantes, 0–15 % de mantequilla y/o grasa sólida vegetal que no contenga grasas trans, 0–5 % de leche descremada o completa en polvo o líquida, 0–15 % de mermelada, jalea de frutas tropicales, 0–0,1 % de fragancia de limón o vainilla, fragancia de su preferencia, 1–2 % en peso de material aditivo del producto acabado que contribuya a un aumento de la viscosidad, con propiedades antimicrobianas y antioxidantes. El proceso de elaboración consiste en fermentar la leche a una temperatura de 42 °C, hasta que alcance un pH entre 4,4 a 4,6 durante un (1) día aproximadamente. Una vez que se haya formado el cuajo, cortar en cubos y calentarlo a una temperatura menor a 55 °C hasta obtener la densidad deseada, posteriormente dejar

enfriar a una temperatura de 4 °C, obteniendo el queso fresco, el cual se procede a mezclar con la mantequilla, azúcar, fragancia y el aditivo. Envasar en moldes, recubiertos con chocolate negro mayor al 70 % cacao y dejar enfriar. Antes de servir, rellenar con la mermelada o jale de frutas utilizando una manga. Es un producto diseñado para una merienda o como pasaboca en eventos y reuniones. Resulta ser un producto con un sabor agradable y aromático, de fácil preparación ya que no requieren maquinaria sofisticada para su elaboración y es alimento con alto valor nutritivo al poseer probióticos encargados de inhibir bacterias patógenas, estimulan el sistema inmune, antioxidantes y disminuyen el colesterol y triglicéridos. Es importante determinar el costo de inversión y las condiciones de almacenamiento del producto.

Reyes [12] diseñó la invención de un licor destilado de un 100 % de mucílago de cacao con sabor a chocolate (sabor y olor afrutado). El mucílago es necesario para la fermentación del grano de cacao, provee el sustrato para varios microorganismos que son esenciales para el desarrollo de los precursores del sabor del chocolate [13], es por ello que la etapa de fermentación post-cosecha influye sobre la calidad del producto final. En la industria alimentaria, el mucílago hidrolizado es conocido como exudado, el cual tiene la característica de poder ser reutilizado, ya que al ser sometido a un adecuado manejo post-cosecha pueden convertirse en fuente de ingreso para los productores de esta planta. De 800 kg de semillas se obtiene aproximadamente 40 litros de pulpa o mucílago de cacao.

El mucílago de cacao y levaduras son los ingredientes propuestos [14]. La preparación consta en cortar la mazorca de cacao, cuando está madura, es decir, haya cambiado de color de verde a amarilla. Se parte la mazorca y se extrae el mucílago del cacao, de forma mecánica o manual manteniendo las Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) y sin causar daño al grano, esta recolección debe hacerse el mismo día que se corta la mazorca. El exudado de mucílago recolectado se coloca en un tanque madera o de acero inoxidable con grado alimenticio, se le

adiciona levaduras y se deja reposar por seis (6) días aproximadamente, posteriormente utilizar un destilador para la obtención del alcohol, el cual se debe pasar por un filtro, se deja madurar por cuatro (4) meses y finalmente se envasa.

El exudado de mucílago de cacao es una sustancia de la cual se puede obtener una infinidad de subproductos dirigidos al mercado alimentario como jugos, mermeladas y licor; así como también en el mercado farmacéutico utilizado para la producción de cremas faciales, maquillaje, entre otros.

Los productores cacaoteros al momento de la fermentación desperdician el mucílago obtenido en las primeras horas. Con el mucílago pueden producir una bebida con grado alcohólico sabor a chocolate la cual podría convertirse en una nueva experiencia en el mundo de los licores y podría tener propiedades beneficiosas a la salud entre ellas su concentrado de pectinas y ácido cítrico. De igual manera representa una alternativa para evitar el deterioro del medio ambiente y las pérdidas económicas al sector ya que el exudado genera olores desagradables [14].

Productos derivados del cacao dirigidos al mercado farmacéutico

Lecoupeau y Vercauteren [15] desarrollaron en el año 2007 un proceso para obtener extractos de polifenoles de granos de cacao. El extracto de cacao comprende de 15 a 66 % de polifenol, de 0 a 11 % de lípido y de 5 a 20 % de xantina. Sus características lo hacen ideal para formar parte del mercado farmacéutico. Durante el proceso de extracción se emplean distintos disolventes como etanol, acetona, 2-butanol y 2-propanol que son capaces de solubilizar los polifenoles y los lípidos, sin alterar sus propiedades. El proceso consiste en obtener granos de cacao frescos despulpados y descascarillados dando como resultados granos limpios. Los granos de cacao luego son sometidos a una etapa de rehumidificación, utilizando entre 30 a 50 % de agua caliente antes de la etapa de molienda con el disolvente. Esto permitirá que las paredes de las células de los granos recuperen su elasticidad y por lo tanto no se rompa durante la molienda en presencia del disolvente. Luego se procesa a

moler en presencia de un disolvente mezclado con agua, preferiblemente el contenido del disolvente es mayor que 50 % en volumen teniendo en cuenta el agua aportada por los granos. Se extrae y se filtra y luego se procede a destilar a una temperatura entre 20 °C a 50 °C durante una (1) hora por varios días. Se debe evitar temperaturas demasiado altas, es decir superiores a 60 °C, para limitar la oxidación y degradación química de los compuestos que se van a extraer. Este proceso de destilación se lleva a cabo bajo una presión residual entre 12 a 20 kPa.

Los polifenoles pueden ser añadidos a lociones, geles, emulsiones (especialmente crema), máscara, ungüento, liposomas o parches transdérmicos, que contienen convencionalmente excipientes, vehículos compatibles y farmacéuticamente aceptables. Los agentes de protección contra los rayos ultravioleta también se pueden incorporar ventajosamente en las composiciones.

Por su parte Moreno [16] planteó un jabón de baño destinado aplicarse sobre la epidermis para el cuidado diario de la piel, utilizando manteca de cacao, aceite de oliva extra virgen, compuestos alcalinos y aromáticos. El jabón actúa como un bálsamo de hidratación y nutrición. Propone diluir el hidróxido de sodio en agua, mezclar la solución con aceite de oliva y manteca de cacao. Agregar el compuesto aromático. Incorporar la mezcla en un recipiente preferiblemente de madera y dejar secar la mezcla. Desmoldar y cortar en piezas de acuerdo al tamaño y peso deseado. Dejar secar nuevamente por cuatro (4) semanas y embalar.

Siguiendo las líneas de elaboración de cremas para el cuidado diario de la piel y un efecto de mejora sobre los nódulos linfáticos, el investigador chino Huaying [17] creó una crema hidratante de fácil preparación. Se elabora a partir de los siguientes componentes en porcentaje en masa: 10 % de agua, 3 % de glicerina, 2 % de propilenglicol, 3 % de miristato de isopropilo, 70 % de extracto de Rizoma de taraxacum officinale, planta comúnmente llamada diente de león, 2 % de extracto de *Butyrospermum parkii* (manteca de Karité) por sus propiedades puede ser sustituida en su totalidad por manteca de cacao aumentado, 5 % de manteca de cacao y 5 % de goma xantana. La glicerina es un componente químico

que tienen como función hidratar la piel, el propilenglicol es ampliamente utilizado en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética como agente anticongelante, lubricante y solvente. El miristato de isopropilo un ingrediente activo, humecta la piel al penetrar en los folículos pilosos. Los extractos europeos de raíces de diente de león tienen poder desintoxicante. La manteca de cacao posee efectos antioxidantes de hidratación y por último la goma xantana es un espesante internacional.

El método de preparación comprende los siguientes pasos para extraer el rizoma de *taraxacum officinale*, obtener la manteca de cacao a partir de la molienda de sus granos; mezclar uniformemente 70 partes de polvo de extracto de rizoma de *taraxacum officinale* y 5 partes de manteca de cacao, agregando respectivamente 10 partes de agua, 3 partes de glicerina, 2 partes de propilenglicol, 3 partes de miristato de isopropilo y 2 partes de extracto de *Butyrospermum parkii* en la mezcla, adicionando finalmente 5 partes de goma xantana para espesar y emulsionar.

4. Conclusiones

En el análisis patentométrico en los últimos veinte (20) años, la invención de productos artesanales alternativos derivados del cacao dirigidos al mercado alimentario, farmacéutico y cosmético está dominada por Japón, seguida de Estados Unidos, China y Rusia y el continente latinoamericano representado por Brasil, seguido de Colombia, México, Ecuador y Perú. La demanda mundial de cacao en grano, como consumo primario, está dominada por países de mayor desarrollo industrial perteneciente al continente Asiático con un 44,39% y Europeo con 38,84%, los cuales no son productores; hecho que refleja el nuevo enfoque de las tendencias mundiales en la búsqueda de ampliar las aplicaciones del cacao.

El aumento de las invenciones que sugieren enfoques estratégicos para patentar productos del sector alimentario, farmacéutico y cosmético pertenece a empresas europeas como Kvasenkov Oleg Ivanovich y asiáticas, principalmente compañías japonesas como Morinaga & Co y

Fuji Oil Co Ltd. El 30% de los estudios están dirigidos a elaboración de productos en base a cacao, postres, confitería y helados y un 20% representado por desarrollo de productos en el mercado farmacéutico.

Las nuevas tendencias en los consumidores por buscar estilos de vida saludables han producido cambios en los hábitos alimentarios, por lo que las industrias alimentarias están dejando a un lado los tradicionales snacks procesados para presentar productos más saludables disminuyendo el uso de azúcar, orientando sus esfuerzos a profundas transformaciones. La aplicación de esta propuesta causará un impacto socioeconómico, donde los beneficiarios directos serán los productores de cacao ya que pondrán en práctica una nueva forma de ingresos y aportarán al crecimiento comercial de la región. El aprovechamiento del cacao en la generación de productos alternativos con interés en el mercado alimentario y farmacéutico representa una opción viable para el desarrollo del sector agro industrial debido a que se le da un valor agregado a la fruta de dioses “El Cacao”.

5. Referencias

- [1] L. Reyes y H. Reyes de Capriles. *El Cacao en Venezuela “Moderna Tecnología para su Cultivo”*. Chocolates El Rey C.A., Caracas, Venezuela, 2000.
- [2] ICCO. Quarterly bulletin of cocoa statistics. Technical Report Vol. XLIV, No. 3, The International Cocoa Organization, 2018.
- [3] O. López-Báez y M.N. Ballinas-Gómez. Materiales de cacao de interés farmacológico (*Theobroma cacao* L.). *ESPACIO I+D, Innovación más Desarrollo*, V(11):84–103, 2016.
- [4] G. Poveda-Burgos, H.E. Cantuña-Orellana, P.Y. Paredes-Pineda, A.T. Recalde-Floriano, M. Teran-Coronel, y A.M. Zúñiga-Montero. Análisis e influencia del impacto económico de las exportaciones de cacao y elaborados de cacao ecuatoriano en el mercado japonés. *Observatorio Iberoamericano de la Economía y la Sociedad del Japón*, 9, 2016.
- [5] M. González-Illescas y M. Vargas-Jiménez. La dirección del conocimiento en las procesadoras artesanales de cacao de la provincia de el oro. En *II Congreso Internacional Ciencia y Tecnología UTMACH*, volumen 1, Machala, Ecuador, 2017.
- [6] R. Quintero, R. Anido, y A. Azuaje. El consumo de cacao en Venezuela y en desde una perspectiva sostenible. *Agroalimentaria*, 23(45):23–49, 2017.

- [7] Observatorio de Corporaciones Transnacionales. Las transnacionales del sector del cacao. Boletín 9, Iniciativas de Economía Alternativa y Solidaria, España, 2011.
- [8] D. Comet-Herrera. Comercio justo: Una alternativa comercial sostenible y respetuosa con los Derechos Humanos. *Revista de Antropología Experimental*, 6:71–78, 2005.
- [9] O. Puentes, M. Dávila, Y. Minorta, M. Sulbarán, y J. Cárdenas. Alternativa socioeconómica del uso del cacao en la elaboración del muffin. *Revista Científica Juvenil*, VII:201–212, 2009.
- [10] D. Pengfei, Y. Yuantao, and Y. Jinlong. CN107494866A: Maca–chocolate solid drink and preparation method thereof, 2017.
- [11] A. Pakocn. WO2016113580A1: Fresh, thick–consistency yoghurt cheese with live bacterial flora, chocolate–coated yoghurt desserts made therefrom, and method for producing same, 2015.
- [12] N. Reyes-Ramos. MX2016008930A: Distilled alcoholic beverage, 100mucilage, 2017.
- [13] A.E. Arana-Analuís y E.C. Rugel-Jiménez. Propuesta de aprovechamiento del desecho mucilago de cacao en la hacienda santa rita. Trabajo de grado de Ingeniería Comercial, Facultad de Ciencias Administrativas, Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, 2017.
- [14] Y.M. Arteaga-Estrella, J.A. Villacís-Santos, y J.M. Peralta-Saltos. Estudio de viabilidad para la producción de la mermelada de mucílago de cacao. Trabajo de grado en Ingeniería Comercial, Facultad de Ciencias Administrativas y Comerciales, Universidad Estatal de Milagro, San Francisco de Milagro, Ecuador, 2012.
- [15] J.P. Lecoupeau and J. Vercauteren. US2007258920A1: Process for obtaining polyphenol extracts from cocoa beans, the resulting extracts and uses thereof, 2007.
- [16] A. Moreno-Perez. ES2284392A1: Cocoa butter soap for personal cleanliness and daily care of skin and hair, comprises extra virgin olive oil, water, cocoa butter, and alkali and aromatic compounds, 2008.
- [17] L. Huaying. CN20171129260: Purification energy cream, 2018.

Trend study: technologies for the recycling of wastewater

Jiraleiska Hernández, Samuel Villanueva*, Magaly Henríquez

Gerencia de Proyectos de Investigación, Desarrollo e Innovación, Centro Nacional de Tecnología Química, Caracas, Venezuela

Abstract.- Wastewater due to the volumes generated, the infrastructure they require and the investment necessary to carry out an adequate treatment have always been considered a complex issue to address. Fortunately, this concept has changed and the industry is starting to see a sustainable and sustainable source of energy, nutrients and organic matter in wastewater. Recognizing the importance of its collection, treatment, reuse and recycling as an intelligent strategy in the reduction of production costs and in the generation of new materials from virgin waste. This work shows the products that can be obtained from urban and industrial wastewater, based on the information contained in PatentInspiration® patent platform and under a search equation that allowed to extract invention documents for the period 2012 to 2017, generating productivity indicators according to year, country, institution and codes of International Patent Classification (CIP) that will serve to identify successful experiences with possible application in the national territory. Actions that show a change in the global paradigm in the management of wastewater, from treatment and elimination to contemplate the reuse, recycling and / or obtaining products with greater added value as a concern of society for the exploitation and rationing of our natural resources in the face of a climate change situation accelerated by the current consumption system.

Keywords: wastewater; recycling; patents; technological trends.

Estudio de Tendencia: tecnologías para el reciclaje de las aguas residuales

Resumen.- Las aguas residuales por los volúmenes generados, la infraestructura que requieren y la inversión necesaria para llevar a cabo un adecuado tratamiento de las mismas, han sido siempre consideradas como un tema complejo de abordar. Afortunadamente, tal concepto ha cambiado y la industria comienza a visualizar en las aguas residuales como una fuente rentable y sostenible de energía, nutrientes y materia orgánica. Reconociendo la importancia de su recolección, tratamiento, reutilización y reciclaje como una estrategia inteligente en la reducción de costos de producción y en la generación de nuevos materiales a partir de desechos vírgenes. El presente trabajo muestra los productos que se pueden obtener de las aguas residuales urbanas e industriales, a partir de la información contenida en plataforma de patentes PatentInspiration® y bajo una ecuación de búsqueda que permitió extraer documentos de invención para el periodo 2012 al 2017, generando indicadores de productividad según año, país, institución y códigos de Clasificación Internacional de Patentes (CIP) que servirán para identificar experiencias exitosas con posible aplicación en el territorio nacional. Acciones que evidencian un cambio de paradigma mundial en la gestión de las aguas residuales, pasando del tratamiento y eliminación a contemplar la reutilización, reciclado y/o la obtención de productos de mayor valor añadido como preocupación de la sociedad por la explotación y racionamiento de nuestros recursos naturales ante una situación de cambio climático acelerada por el sistema actual de consumo.

Palabras clave: aguas residuales; reciclaje; patentes; tendencias tecnológicas.

Recibido: 18 de marzo, 2019.

Aceptado: 31 de julio, 2019.

1. Introducción

El agua es un recurso fundamental para la vida tanto de los seres humanos como del resto de las

especies en la tierra. Con un planeta cada vez más poblado y el cambio climático haciendo estragos en muchas partes del mundo, la gestión, conservación y acceso al agua en buenas condiciones es cada vez más difícil, sobre todo en los países en desarrollo [1]. En la actualidad, se estima que hay 3.600 millones de personas (casi la mitad de la población mundial) que viven en áreas con riesgo de sufrir escasez de agua al menos un mes al año, y esta población podría llegar a alcanzar entre 4.800

* Autor para correspondencia:

Correo-e: publicacionesgpidi.cntq@gmail.com (S. Villanueva)

y 5.700 millones en 2050.

Adicionalmente, cerca del 22 % del uso total del agua en el mundo está destinada para funcionamiento de la industria de aluminio, automotriz, química, procesadora de alimentos, minería, petróleo, acero, textil, pulpa y papel; de acuerdo con esto se espera un incremento de la demanda del recurso hídrico 1,6 veces más para el 2025, pasando de 752 km³/año en 1995 a 1.170 km³/año en 2025 [1, 2] No obstante, alrededor del 80 % del total de las aguas residuales industriales y municipales se liberan al medio ambiente sin ningún tratamiento previo, contaminando nuestros cuerpos de agua, deteriorando su calidad y ocasionando impactos perjudiciales para la salud humana y los ecosistemas [3]

La industria es uno de los mayores contaminantes de los recursos hídricos, anualmente vierte entre 300 y 500 millones de toneladas de metales pesados, disolventes, lodos tóxicos y otros residuos. Estos materiales convierten el agua en no potable, al tiempo que facilita la bioacumulación y biomagnificación de sustancias químicas en organismos vivos, con riesgos directos al ser humano por la ingesta de plantas o vida animal [2]

Uno de los principales retos para la industria hoy en día es conseguir abordar de forma efectiva la explotación y contaminación insostenible de los recursos de agua dulce en el mundo [2]. Sin embargo, el desarrollo tecnológico combinado con la sensibilidad pública pueden contribuir a reducir la huella hídrica en la mayoría de los sectores, mediante el aumento de la conservación, reutilización, reciclaje y una mayor eficiencia de procesos que demanden grandes volúmenes de agua, en particular en la agricultura; empleando técnicas para la reducción de fugas de agua, tratamiento de efluentes, eficiencia de los servicios públicos de agua, biotecnología, entre otros [4].

Es importante impulsar la reutilización y reciclaje de las aguas residuales urbanas e industriales, como alternativa que contribuya a la reducción de los volúmenes de residuos que pueden ser transformados en insumos requeridos por la cadena productiva que los generó [5]. Para ello, se requiere de nuevas alianzas, participación

comunitaria, desarrollo de marcos regulatorios y legales apropiados que incluyan una combinación de incentivos y sanciones impuestas a los sectores involucrados con el sistema productivo para la formulación de políticas y la práctica de la gestión adecuada de los recursos hídricos [6].

Reutilización y reciclaje. La reutilización y el reciclaje son procesos mecánicos, manuales o automáticos, mediante los cuales se pueden recuperar diferentes tipos de residuos. La reutilización es una técnica de re-aprovechamiento de un material o producto, sin cambiar su forma o naturaleza original. El reciclaje, por su parte, es la transformación de ciertos materiales en materia prima para procesos productivos [5].

Bajo el contexto de una economía circular, donde se busca un equilibrio entre el desarrollo económico, la protección de los recursos naturales y la sostenibilidad ambiental. Las aguas residuales constituyen un recurso abundante y valioso que actualmente es empleado en procesos industriales, como iniciativas tecnológicas que permitirán asumir los nuevos retos de adaptabilidad ante el cambio climático [7]. El objetivo del presente trabajo es evaluar la actividad patentométrica mundial, partiendo de la información contenida en la base de datos PatentInspiration®, bajo una ecuación de búsqueda que permitió extraer documentos de patentes y formular indicadores de productividad según año, país, institución y códigos de Clasificación Internacional de Patentes (CIP) para el período 2012-2017, donde se visualizan las principales tendencias tecnológicas en el reciclaje de las aguas residuales.

2. Metodología

La investigación está fundamentada en el análisis patentométrico de documentos de invención publicados en el periodo 2012-2017, con el objetivo de identificar la tendencia tecnológica en el área del reciclaje de las aguas residuales domésticas e industriales. Se elaboró una estrategia de búsqueda combinando palabras claves y los respectivos códigos de Clasificación Internacional

de Patentes (CIP) en inglés IPC. La búsqueda se realizó en la plataforma PatentInspiration® (página web www.pateninspiration.com).

Los registros obtenidos fueron almacenados, tratados y analizados, se elaboraron indicadores de productividad según año, país, institución de investigación y los relacionados con los códigos de IPC. El levantamiento de información se realizó del 07 al 13 de abril del 2018.

Tabla 1: Estrategia de Búsqueda y resultados obtenidos.

| Estrategia de Búsqueda | Resultados |
|---|------------|
| (“waste water” AND (recycling OR recycled OR recycle OR reuse OR “re-utilised”)) NOT (F23G7/00! OR F22B37/00! OR D06F39/00! OR G05D9/00! OR G05B19/00! OR D06F39/00! OR G05D9/00! OR G05B19/00! OR E03B1/00! OR E03C1! OR E03D5 F25B27 F24D17 OR B01D21! OR B01D29! OR B01D33! OR B01D35! OR B01D36! OR B01D50! OR B01D61! OR B01D63! OR B01D65! OR B09B3! OR B08B9! OR B08B3! OR C02F) | 146 |

La Tabla 1 describe la ecuación de búsqueda utilizada y los resultados obtenidos para el periodo 01/01/2012 al 31/12/2017, en el campo título, considerando una patente por familia, sin la inclusión de documentos que tengan vacíos en el título o resumen y con fecha de la primera prioridad como referencia de la solicitud ante la oficina de patente respectiva.

Los códigos que se observan en la Tabla 1, corresponden a la Clasificación Internacional de Patentes (IPC) y se refieren principalmente a procesos del tratamiento del agua, componentes, partes, piezas, aparatos y programas de control de efluentes residuales que no son relevantes para el estudio. La estrategia de búsqueda utilizada, garantiza que los resultados obtenidos pertenezcan al área de interés y los indicadores generados sean propios de un análisis de tendencias en el reciclaje de las aguas residuales y no en tratamiento.

Tabla 2: Evolución de patentes por año (2000- 2017).

| Año | Patentes | Año | Patentes |
|------|----------|------|----------|
| 2000 | 3 | 2009 | 7 |
| 2001 | 6 | 2010 | 16 |
| 2002 | 2 | 2011 | 15 |
| 2003 | 2 | 2012 | 12 |
| 2004 | 1 | 2013 | 14 |
| 2005 | 2 | 2014 | 36 |
| 2006 | 6 | 2015 | 38 |
| 2007 | 6 | 2016 | 26 |
| 2008 | 4 | 2017 | 20 |

3. Resultados y discusión

Patentes reportadas por año y su tendencia de patentamiento.

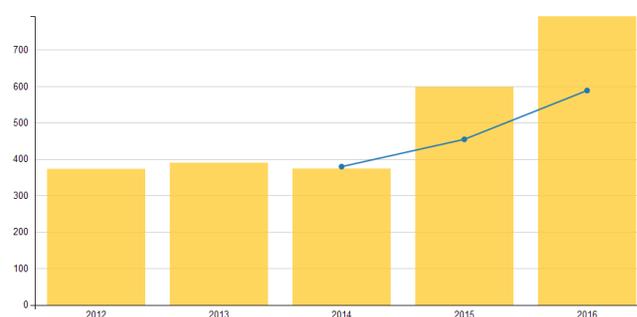


Figura 1: Número de patentes por año y tendencia de patentamiento (2012-2017).

La ecuación de búsqueda planteada recuperó 146 registros de solicitudes y concesiones de patentes, el 82,19 % de los documentos fueron publicados entre los años 2014 al 2017, resaltando el año 2015 con 38 textos de innovación científica. Adicionalmente, se evidencia una tendencia constante en los 3 últimos años de solicitud de patentes en reutilización/reciclaje de las aguas residuales, dado el interés que existe en el desarrollo de nuevos productos y/o innovaciones tecnológicas que permitirán atender la problemática actual y el futuro inmediato de los recursos hídricos y su calidad. En la Figura 1 se muestra la evolución patentométrica en el reciclaje de las aguas residuales.

Es importante mencionar que la cantidad de patentes que se muestran en este estudio están vinculadas con la fecha de prioridad y no de publicación, lo que permite identificar el año en que fue introducida la protección ante la oficina de patente del país solicitante, además arroja un dato importante, porque representa la fecha más cercana a la invención.

La tendencia de proteger tecnologías e invenciones relacionadas con el reciclaje de las aguas residuales inicia en el año 2000 con 03 documentos de patentes, manteniendo un promedio de 04 invenciones por año hasta el 2009. En el 2010, se multiplica el número de textos protegidos por parte de la comunidad científica y corporaciones interesadas en documentar experiencias exitosas en esta área de estudio, como muestra de la factibilidad técnica-económica de obtener materiales con alto valor agregado a partir de un subproducto de origen industrial o doméstico, pasando de 07 a 16 documentos, incrementando nuevamente a 36 patentes en el 2014. Un comportamiento cíclico observado en 17 años de registro y solicitudes de patentes (Tabla 2).

Patentes Clasificadas según el origen de Procedencia.

Los resultados arrojados permitieron tratar, analizar y clasificar la información en 03 grandes grupos, aquellos relacionados con la reutilización y/o reciclaje de las aguas residuales de origen industrial, las de procedencia doméstica y las invenciones relacionadas a dispositivos, máquinas o sistemas que permiten re-usar estos efluentes para una mejora continua del proceso.

Tabla 3: Evolución de patentes por año (2000-2017).

| Año | I | % | U | % | D | % | Total |
|-------|----|----|----|----|----|----|-------|
| 2012 | 8 | 67 | 2 | 17 | 2 | 17 | 12 |
| 2013 | 10 | 71 | 3 | 21 | 1 | 7 | 14 |
| 2014 | 19 | 53 | 11 | 31 | 6 | 17 | 36 |
| 2015 | 15 | 39 | 21 | 55 | 2 | 5 | 38 |
| 2016 | 13 | 50 | 10 | 38 | 3 | 12 | 26 |
| 2017 | 12 | 60 | 5 | 25 | 3 | 15 | 20 |
| Total | 77 | 57 | 52 | 31 | 17 | 12 | 146 |

I: Industrias U: Urbanas D: Dispositivos

La Tabla 3 muestra la distribución de patentes por año, clasificadas según origen de procedencia. Se determinó que el 57 % de las patentes corresponden a invenciones que permiten el aprovechamiento de los materiales de valor agregado presentes en los efluentes industriales, mientras que el 31 % pertenecen a la reutilización de las aguas procedentes de las actividades urbanas, solo 12 % de los documentos protegidos están orientados al desarrollo de técnicas para llevar a cabo este proceso. La cantidad promedio de textos de invención para las aguas industriales es de 13 patentes por año, 09 para los efluentes domésticos y 03 para el desarrollo de dispositivos.

Según información reportada en la Tabla 3, se observa una tendencia hacia el aprovechamiento de las aguas de origen industrial por encima de la urbana; a excepción del 2015 donde se registraron 21 patentes destinadas a este sector, representando el 55 % del total generado en el año. La razón de aprovechar los efluentes generados por las actividades humanas se fundamenta en la escasez de recursos naturales, el costo que amerita la explotación de yacimientos y los daños colaterales que conllevan estas acciones, contribuyendo a la visualización de los residuos como materiales de interés que pueden ser recuperados y reinsertados nuevamente al proceso productivo, en especial los de procedencia industrial porque concentran materiales y elementos químicos importantes para la industria.

Adicionalmente, la presión social y el reforzamiento del sistema jurídico nacional e internacional en el cumplimiento de normas y leyes que conduzcan a un sistema circular de producción, ha propiciado cambios de paradigma en distintas naciones del mundo, como garantía para cubrir las necesidades de las generaciones presentes y futuras [2]. En tal sentido, los sistemas de producción industrial tendrán que llegar a ser sostenibles y con adaptaciones tecnológicas que permitan una mayor eficiencia.

Las industrias tienen el tamaño y los recursos necesarios para aprovechar los cambios tecnológicos y adoptar sistemas de consumo racional de materias primas y energía, así como de valorización de subproductos. Anglo American en

su página web <https://www.angloamerican.com> se define como una compañía minera global que ha emprendido acciones de reutilización de efluentes como agua potable, agua de procesos industriales y agua que puede evacuarse con seguridad en el ambiente; al mismo tiempo que separa el yeso del agua y lo utilizan como material de construcción, minimizando los costos relacionados con la importación del agua y el vertido sin control de los residuos generados.

Patentes clasificadas según el origen de procedencia.

Las patentes se utilizan para comprobar el rendimiento tecnológico de los países, constituyen un indicador de las actividades más cercanas al desarrollo de una determinada tecnología [8]. En tal sentido, se aprovecha la información técnica disponible en los documentos de patentes como fuente de consulta para la descripción de métodos, procedimientos, tecnologías, entre otros, que permiten determinar la tendencia mundial en el reciclaje de las aguas residuales para la resolución de un problema de carácter global. De lo anterior, se observó una inclinación por parte de empresas, universidades y centros de investigación a orientar sus estudios al desarrollo de procesos que demanden menos consumo de agua, métodos de extracción de elementos y materiales químicos contenidos en las aguas residuales; así como la fabricación de nuevos materiales a partir de los efluentes generados en la industria y municipalidad.

Adicionalmente, se emplearon los códigos de la Clasificación Internacional de Patentes, IPC (International Patent Classification), para explorar la pertinencia de las áreas de conocimiento y los usos secundarios de las aguas residuales, clasificados según su especificación técnica. La Figura 2 señala los códigos y como se estructuran jerárquicamente, diferenciando sección, clase principal, subclase, grupo principal y código completo, convirtiéndolos en un sistema altamente ordenado y objetivo para clasificar el contenido de patentes. Los códigos de clasificación pueden referirse a dominios de aplicación y/o a tecnologías específicas.

Extrayendo una muestra de los principales 50

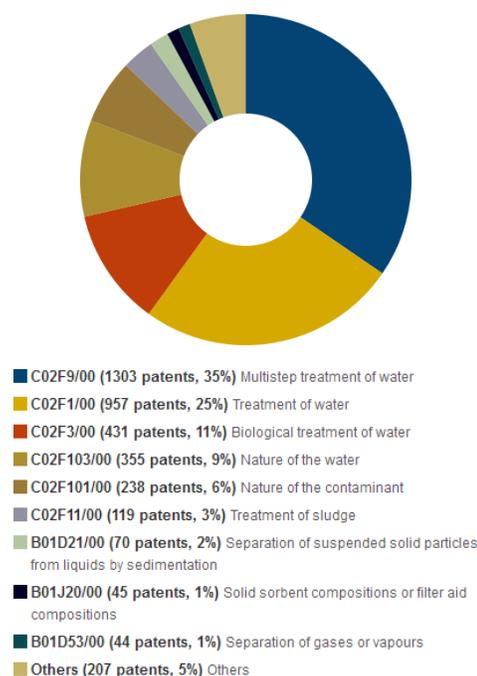


Figura 2: Distribución por código internacional de patentes (2012 – 2017).

códigos IPC, se observa que el 15% de los documentos trata sobre invenciones de sistemas y/o dispositivos de calentadores de fluidos con bombas de calor para el aprovechamiento de la energía emanada del proceso de descomposición de las aguas residuales, el 12% sectoriza las protecciones que provienen de la elaboración de materias primas distintas de los minerales; mientras que el desarrollo de componentes, bombas de calor y otros detalles se ubican en 10, 9 y 7% respectivamente. Otras invenciones con menor número de protecciones pero de igual importancia son las categorías vinculadas con la extracción de metales, obtención de níquel cobalto, sales, entre otros, descritas y clasificadas según el sector productivo que las genera.

Patentes orientadas a la reutilización/reciclaje de las aguas residuales por sector económico.

Apoyados en los análisis estadísticos de las patentes y detallando la información que contienen, se logra determinar el rendimiento inventivo de las multinacionales y el ascenso de las tecnologías emergentes, como indicador de utilidad para las industrias que deseen invertir en mejorar sus

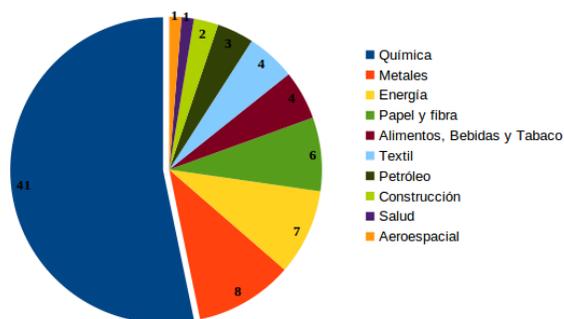


Figura 3: Número de patentes orientadas a la reutilización/reciclaje de las aguas residuales por sector económico (2012–2017).

procesos y maximizar sus recursos [9]. De lo anterior, se refleja la Figura 3 y la orientación de las patentes del sector industrial, categorizadas por actividad económica.

De las 77 patentes relacionadas con la reutilización y reciclaje de las aguas residuales de origen industrial, 53 % provienen de experiencias exitosas en la industria química, con un total de 41 documentos desde el 2012 al 2017. Seguida del sector metalúrgico, específicamente hierro/acero y aluminio con 08 textos de invención representando el 10 %, 9 % el sector energético, 6 % papel y fibra, y 4 % alimentos, bebidas y tabacos. Estos 05 sectores de la industria básica e intermedia representan el 80,52 % del total de los documentos de patentes de aquellas empresas que han protegido sus tecnologías y han logrado mejorar la eficiencia del proceso de reuso, reciclaje y/o la obtención de productos de mayor valor añadido presente en las aguas residuales. Otros sectores con menor participación pertenecen al área de la construcción, petróleo, salud y aeroespacial.

La industria química lidera la tendencia en el reciclaje de las aguas residuales, y es que desde que comenzó el desarrollo de este sector se han producido y diseminado aproximadamente 100.000 nuevas sustancias químicas en el medio ambiente, incrementando en 1.000 nuevas sustancias cada año. Por esta razón, la industria química impulsa el desarrollo de materiales, procesos y reacciones avanzadas para una producción más sostenible

y eficiente en recursos y energía; favoreciendo la reutilización y la obtención de productos de mayor valor añadido hacia la transformación de una química verde [8].

A pesar que el reciclaje de las aguas residuales es una tendencia de reciente data, el sector químico registra información técnica importante sobre la recuperación de tintas, níquel, titanio, paladio, zinc, azufre, entre otros materiales y elementos químicos recuperables y presentes en las aguas residuales industriales propias del proceso que lo caracteriza. Una de las invenciones que destaca fue registrada bajo el código CN105039717A [10] y trata sobre un método que permite reciclar paladio de las aguas residuales de la sección de activación de paladio alcalino, el proceso inicia con una reducción del paladio bruto disuelto con agua regia, la sustancia no disuelta se filtra y la relación de masa volumétrica del agua regia y el paladio en bruto es de 5-6 a 1 L/kg. Se realiza la adsorción en columna de iones que posteriormente son regeneradas y el paladio es reciclado a través de un líquido regenerado. De acuerdo con el método, las resinas aniónicas se usan para absorber selectivamente $[PdCl_4]^{2-}$, los metales base de cobre, níquel y similares se separan efectivamente, la tasa de reciclaje es mayor al 96 % y la pureza del producto es mayor que 99,98 %.

En cuanto al enfoque visualizado por el sector metalúrgico, se observó registros de patentes con recuperación de cobre, níquel, cadmio y zinc, así como metales pesados y fluoruros a partir del efluente generado en sus procesos. La patente registrada bajo el número CN103924253A [11], trata sobre un método que recicla metales pesados y fluoruros a partir de un pretratamiento de separación de aceite en las aguas residuales de decapado de acero inoxidable; iniciando con un proceso de decantación en un estanque de sedimentación primaria, prensado del material sólido sedimentado y un tratamiento de reducción de la temperatura media para reciclar el polvo de hierro; se emplea intercambio iónico en el líquido claro obtenido del estanque de sedimentación primaria para obtener $NiCl_2$ y se sedimenta el líquido concentrado (obtenido después del intercambio iónico) por segunda vez para obtener

material de fluoruro de calcio. El método protegido se puede aplicar ampliamente a las empresas de producción de acero inoxidable sin que represente gran inversión porque se puede completar sobre la base del equipo existente.

Patentes orientadas a la reutilización/reciclaje de las aguas residuales urbanas.

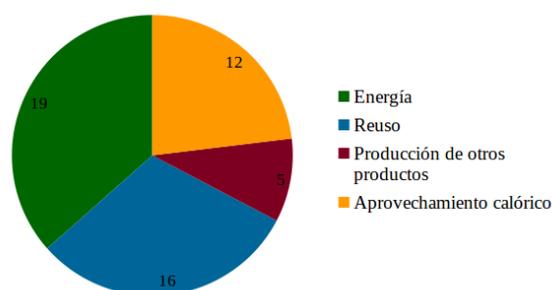


Figura 4: Número de patentes orientadas a la reutilización/reciclaje de las aguas residuales (2012 – 2017).

Las patentes relacionadas con el sector urbano generaron 52 documentos durante el período de estudio (Tabla 3), 19 textos de invención se inclinan hacia el aprovechamiento energético de los efluentes domésticos, representando el 31 % del total; 16 tratan sobre las opciones de reutilización de los residuos procedentes de las áreas de la ducha, cocina, lavado, y aquellas que no contengan materia fecal. Mientras que el aprovechamiento calórico, producto de la descomposición de la materia orgánica de estas aguas, representan el 23 % con 12 documentos de patentes y la producción de nuevos materiales a partir de los residuos generados en actividades comunes del ser humano, representa el 10 % con 05 documentos de invención, como expone la Figura 4.

Algunas patentes evidencian la producción de nuevos materiales con mayor valor añadido, aquella identificada bajo el código CN204125171U [12], muestra un modelo para el reciclaje de recursos de estruvita a partir de nitrógeno y fósforo en aguas residuales. El documento describe un mecanismo de recogida de cristal de estruvita dispuesto en la salida de un tubo de descarga de los lodos,

considerando la inclinación y forma del equipo, material con la que está formado (capa de tela geotécnica) y detalles de operación en todo el proceso para una separación eficiente del agua-lodo del precipitado de estruvita.

La *estruvita* es un mineral de la clase de los minerales fosfatos. Este mineral puro teórico contiene únicamente amonio, fósforo y magnesio, en la realidad se obtienen cristales con trazas de cromo, níquel y plomo que varían en función del proceso empleado, obteniéndose un cristal de entre 90–98 % de pureza.

La reutilización de las aguas grises, junto a las tecnologías de conservación más simples para aplicaciones urbanas en retretes y duchas o el reciclaje de las aguas grises domésticas, también hacen más accesible la conservación del agua para los habitantes de las ciudades. Además, estas tecnologías pueden reducir el costo de oportunidad a la hora de seleccionar las opciones más ecológicas a nivel individual y comunitario, conduciendo a la más eficientes en materia de planificación urbana y diseño de edificios más verdes [4]. En la actualidad, el uso planificado de las aguas residuales municipales es una práctica habitual en países del Oriente Medio y África Septentrional, Australia y el Mediterráneo, así como también en México, China y los Estados Unidos. No obstante, además de los incipientes esfuerzos de instituciones como AQUASTAT, no hay un inventario completo de la magnitud de aguas residuales tratadas o no tratadas que son descargadas al medio [13].

Por su parte, en los EE.UU., se ha estimado que para algunos ríos el agua se ha utilizado y reutilizado más de 20 veces antes de llegar al mar, recuperando materiales útiles, tales como minerales (fosfatos) y metales. Mientras que el agua de enfriamiento puede proporcionar calor y los lodos residuales podrían producir biogás o quizás solo pueden ser eliminados [13]. En Asia Oriental se han observado grandes progresos, con un incremento de la cobertura de fuentes de abastecimiento de agua potable mejorada del 68 %

en 1990 al 88 % en el 2006. A pesar de las mejoras alcanzadas en algunas regiones, la contaminación del agua sigue creciendo a nivel mundial [14].

Posición mundial de países en reutilización/reciclaje de aguas residuales

Las patentes permiten generar indicadores tecnológicos para la toma de decisiones, ubicación de posibles socios comerciales, nichos y transferencia tecnológica en regiones que han aplicado la invención para optimizar procesos y mejorar la calidad de vida de la población [9], sin embargo, los obstáculos culturales al avance tecnológico, como la resistencia a la reutilización de las aguas residuales para agua de consumo, pueden retrasar la adopción de una determinada tecnología [4].

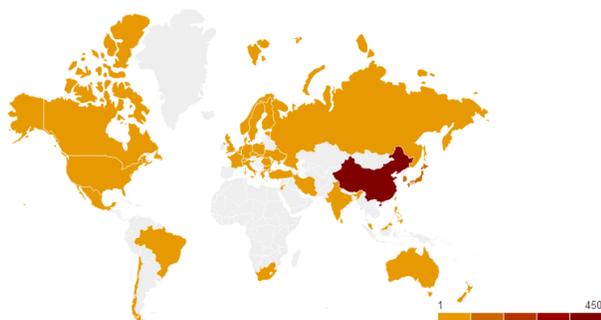


Figura 5: Distribución geográfica de patentes (2012 – 2017).

Tabla 4: Registro y solicitudes de patentes por país (2012 – 2017).

| País | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|
| China | 4 | 14 | 22 | 41 | 26 | 29 |
| República de Corea | | 1 | | 1 | 2 | |
| Estados Unidos | | | | | 1 | |

El análisis de la extensión geográfica de las patentes permite revelar tanto el impacto de la reutilización y reciclaje de las aguas residuales como su mercado potencial. La Figura 5 muestra los países con actividades de patentamiento en aguas residuales y la Tabla 4 muestra los países que lideran la tendencia de valorización de las aguas residuales para el caso de una patente por familia,

evidenciando una gran participación del continente asiático, encabezado por China con 78,38 % del total de patentes, seguido de la República de Corea con 13,51 % y Estados Unidos con 5,41 % del total de invenciones tecnológicas.

Los países resaltados muestran fortalezas en cuanto al reciclaje de las aguas residuales, China protege invenciones relacionadas a la recuperación de cobre, níquel, zinc cadmio, y otros metales valiosos presentes en las aguas residuales de las actividades básicas de hierro / acero y aluminio. Por su parte, Corea inclina sus procesos tecnológicos a la reutilización de las aguas residuales urbanas y la recuperación de metales de algunos procesos que lo generan; mientras que Estados Unidos patenta información acerca de la utilidad de los efluentes urbanos para hacer materiales fibrosos no tejidos y aprovecha el calor residual generado en el proceso.

Para dejar de depender tecnológicamente de otros países, China viene apostando desde los años 80 por tener su propia innovación y posicionamiento en el entorno internacional como un líder en alta tecnología y en industria de calidad, fortaleciendo los vínculos entre las universidades y las empresas, con atracción de talento extranjero, para mejora de las herramientas de protección intelectual y fortalecimiento de la cooperación internacional. Además, este país apuesta a que en el 2020 los avances en ciencia y tecnología aporten el 60 % del crecimiento económico del país asiático [15].

China mantiene un promedio de 22 documentos por año, aproximadamente, registrando y solicitando protección tecnológica a 41 documentos de invención para el año 2015. Cuenta con la participación de empresas, centros de investigación y universidades que desarrollan investigaciones para el mejoramiento de la calidad del agua residual industrial y urbana, así como el desarrollo de sistemas que contribuyan a optimizar el proceso.

La identificación de empresas, centros de investigación y universidades que solicitan la protección de una determinada invención facilita al investigador o empresario información sobre el nivel de especialización o fortaleza tecnológica de un país y contribuye a los gestores de políticas a identificar los puntos fuertes y débiles de sus

de las aguas residuales urbanas y la recuperación de metales de algunos procesos que lo generan; mientras que Estados Unidos patenta información acerca de la utilidad de los efluentes urbanos para hacer materiales fibrosos no tejidos y aprovecha el calor residual generado en el proceso.

Se observa una tendencia hacia el aprovechamiento de las aguas de origen industrial por encima de la urbana debido principalmente a que concentran materiales y elementos químicos presentes en los efluentes industriales que pueden ser aprovechados, recuperados y re-insertados al proceso productivo que los generó u otros que demanden su utilización. Las aguas residuales domésticas son re-usadas en la limpieza de espacios públicos, vehículos u otros procesos que no sean de ingesta o contacto humano; se aprovechan para la generación de energía, calefacción o para la recuperación de nutrientes necesarios en la agricultura. Los documentos de patentes contienen información técnica importante que pueden ser de utilidad para la resolución de problemas con adaptaciones tecnológicas requeridas por el país solicitante. Adicionalmente, permiten identificar posibles socios comerciales para propiciar negociaciones entre países, empresas o transferencia tecnológica entre universidades y centros de investigación de diferentes latitudes.

5. Referencias

- [1] M.H. Badii, J. Landeros, y E. Cerna. El recurso de agua y sustentabilidad. *Revista Daena (International Journal of Good Conscience)*, 3(1):661–671, 2008.
- [2] Oficina de Naciones Unidas de apoyo al Decenio Internacional para la Acción. “El agua, fuente de vida” 2005-2015; agua e industria en la economía. Technical report, Organización de las Naciones Unidas (ONU), Zaragoza, España, 1995.
- [3] Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado. Technical report, UNESCO, Paris, Francia, 2017.
- [4] Programa de ONU-Agua para la Promoción y la Comunicación en el marco del Decenio. Agua y tecnología en la transición hacia una economía verde. Technical report, Organización de las Naciones Unidas, Zaragoza, España, 2011.
- [5] C.A. Zaror–Zaror. *Introducción a la ingeniería ambiental para la industria de procesos*. Concepción, Chile, 2000.
- [6] UN WATER. Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos 2019 “No dejar a nadie atrás”. Technical report, UNESCO, Paris, Francia, 2019.
- [7] Assessment, (WWAP) Programme World Water. Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo 2015: AGUA PARA UN MUNDO SOSTENIBLE - DATOS Y CIFRAS. Informe, ONU, 2015.
- [8] TECNALIA AIDICO (Instituto Tecnológico de la Construcción), FEIQUE (Federación Empresarial de la Industria Química Española), Inkemia–IUCT. IQAC (Instituto de Química Avanzada de Cataluña). *El futuro de la Química sostenible Hoja de Ruta*. 2013.
- [9] F. Mateos y S. Rodríguez. *Tendencias en tecnología del agua*. Clarke, Modet & Co, Madrid, España, 2014.
- [10] Z. Zhao and W. Wu. CN105039717A – Method for recycling palladium from alkaline palladium activation section waste water, 2015.
- [11] Q. Chen and Y. Chen. CN103924253A – Method for recycling heavy metal and fluorides from stainless steel pickling waste water, 2014.
- [12] Z.D. Xueyuan, X. Lin, Y. Xie, H. Shen, Y. Zhou, and Z. Zhang. CN204125171U – Device for resource recycling of struvite from nitrogen and phosphorus in waste water, 2015.
- [13] WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017, El Recurso No Explotado. Informe, UNESCO, 2017.
- [14] UN WATER. 3er Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo: El agua en un mundo en constante cambio. Informe, UNESCO, 2016.
- [15] A. Martínez. Tratamiento de aguas China. Technical report, Centro para el Desarrollo Industrial Industrial, CDTI, Madrid, España, 2016.
- [16] O. González-Cabrera, T. Ruiz-Pérez, M. Claro-Pérez, N. Pérez-Pino, G. Pérez-Gálvez, y L. Collazo-Alfonso. Estudio de patentes sobre tecnologías para tratamiento de agua y el agua residual. *Transinformação*, 26(39):339–347, 2014.

Tech note: exploratory analysis of the radioactive activity in the El Baúl Massif (Cojedes State-Venezuela)

Richard Barrios^{*,a}, Nelson Falcón^b

^aLaboratorio de Física de la Atmósfera y el Espacio Ultraterrestre, Departamento de Física, Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología – FACyT, Universidad de Carabobo, Venezuela.

^bGrupo de Física Computacional, Departamento de Física, Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología – FACyT, Universidad de Carabobo, Venezuela.

Abstract.- Studies related to oil exploration in Venezuela suggest that the El Baúl area (Edo Cojedes) contains uranium deposits and other strategic materials. The present work was oriented to the search, location and detection of rock samples, with high levels of radioactivity in areas near the El Baúl Massif, as well as the estimation of their levels of radioactive activity. Using Geiger-Muller detectors, measurements were taken at previously selected sites. The detected radioactive activity values range from a minimum value of 214CPM (563Bq) to a maximum value of 367CPM (966Bq). It is concluded that this radioactive activity exceeds the normal values for natural radioactivity due to cosmic rays and indicate the presence of uraninite deposits. It is necessary to carry out new research to certify and quantify the reserves of radioactive materials in the area.

Keywords: natural radioactivity; uraninite; thorium-uranium; El Baúl Massif.

Nota técnica: análisis exploratorio de la actividad radiactiva en las Galeras de El Baúl (Estado Cojedes–Venezuela)

Resumen.- Estudios relacionados con la exploración petrolífera en Venezuela sugieren que la zona de El Baúl (Edo. Cojedes) alberga yacimientos de uranio y otros materiales estratégicos. El presente trabajo se orientó a la búsqueda, localización y detección de muestras de rocas, con niveles de radiactividad elevados en zonas cercanas al Macizo de El Baúl así como la estimación de sus niveles de actividad radiactiva. Empleando detectores Geiger-Muller se realizaron mediciones en sitios previamente seleccionados. Los valores de actividad radiactiva detectados van desde un valor mínimo de 214 CPM (563Bq) hasta un valor máximo de 367 CPM (966Bq). Se concluye que esta actividad radiactiva supera los valores normales para la radiactividad natural debida a rayos cósmicos e indican la presencia de yacimientos de uraninitas. Se plantean la necesidad de profundizar la exploración para certificar y cuantificar las reservas de yacimientos de materiales radiactivos de la zona.

Palabras clave: radiactividad natural; uraninitas; uranio-torio; Macizo de El Baúl.

Recibido: 30 de noviembre, 2018.

Aceptado: 25 de junio, de 2019.

1. Introducción

El Baúl es una localidad ubicada en el Municipio Girardot, al sur del estado Cojedes. Se ubica entre los 8°32'27" y 9°13'29" de latitud norte y los 67°59'21" y 68°47'8" de longitud oeste, limita por el Norte con los municipios Ricaurte, Rómulo Gallegos y Pao de San Juan Bautista, por el Sur con el estado Barinas, limita por el

Este con el municipio Pao de San Juan Bautista y con el estado Guárico y por el Oeste con el estado Portuguesa. Se trata de una formación geológica del periodo pérmico, con datación entre 300 y 500 millones de años muy diferenciada geomorfológicamente del Macizo Guayanes y de los Andes Venezolanos [1, 2]. Se trata una formación de macizos circundada por los llanos centrales de origen aluvial mucho más tardío; las Galeras del Baúl como toponímicamente se les conoce, conforman un cinturón pericratónico Paleozoico de rocas ígneas y metamórficas [3,4] elevadas unos centenares de metros sobre la extensa llanura de los Estados Cojedes, Portuguesa,

* Autor para correspondencia:

Correo-e: richbr2014@gmail.com (R. Barrios)

Guárico y Barinas con los cuales colinda. Por su antigüedad es considerada con gran potencial para la ubicación, exploración y explotación de recursos uraníferos junto a otras zonas igualmente antiguas en nuestro país tales como El Escudo Guayanes y los Andes.

En Venezuela fueron realizados los primeros estudios de exploración de yacimientos de uranio en el año de 1952 intensificándose los mismos con la creación de la Comisión Nacional de Asuntos Nucleares y con la preparación de un plan nacional de exploración. Posteriormente fueron publicados los avances obtenidos aunque disminuyeron las actividades exploratorias debido a la disminución del interés en la exploración y explotación de la energía nuclear en nuestro país [3]. En el caso del presente estudio, se considera que los yacimientos de uranio se encuentran asociados a discordancias de rocas pertenecientes al cretácico reciente sobre un basamento que pudiera ser del precámbrico o perteneciente a un período mas joven predominando entonces las condiciones relacionadas con el tipo de roca y ambiente mencionado anteriormente. El estudio de la historia geológica del macizo de El Baúl ha sido profundizado mediante el desarrollo de geocronología U-Pb en cristales de zircón hallados en esta importante zona del país [4], sin embargo en tales estudios geocronológicos no se realizaron medidas in situ de radiactividad natural para corroborar la presencia de materiales radiactivos, más allá de la datación por cuantificación isotópica de Uranio-Plomo en las rocas ígneas encontradas.

Una situación semejante a la ya descrita se presenta en torno a la zona donde se elabora el presente estudio en la cual se ha verificado la existencia de rocas reconocidas como anómalas en su concentración de uranio. Son estas zonas en las que se detecta uranio como producto de la meteorización, con presencia de Uraninita (mineral en rocas metamórficas, de dióxido y trióxido de uranio). Estas zonas se caracterizan por sus cambios de ambiente de oxidante a reductor, convenientes para la realización de estudios prospectivos de yacimientos de uranio. La zona de El Baúl está compuesta por tres grandes grupos geológicos los cuales comprenden una

importante asociación granítica [3, 5].

El estudio de las concentraciones de uranio en ciertas zonas con potencial petrolero es otra de las áreas que debe ser desarrollada en el país [6, 7]. Las consideraciones relativas a la búsqueda de uranio en El Baúl están relacionadas con estudios mas generales, de búsqueda de uranio, realizados en otras zonas consideradas de gran importancia económica tal como la faja petrolífera del Orinoco [8, 6].

En el presente trabajo se muestran los resultados obtenidos de la investigación exploratoria realizada en las cercanías del Hato Piñero, principal promontorio de las galeras de El Baúl, adyacente a la localidad homónima con el fin de medir los niveles de radiactividad natural superficial a fin de detectar depósitos naturales de rocas graníticas con actividad radiactiva. El estudio se fundamenta en la presunción [3] de la existencia de yacimientos de uraninitas, sugerida por la geocronología y la petrología exploratoria descrita.

La posible existencia de depósitos de uraninitas en las galeras de El Baúl, toda vez que son promontorios naturales de apenas unos centenares de metros, nos induce a pensar que de existir tales yacimientos los mismos deben mostrar una actividad radioisotópica superficial asociada a la existencia de rocas circundantes contentivas de materiales radiactivos. Se trata pues de verificar in situ, mediante mediciones exploratorias, si el nivel de actividad radiactiva superficial es superior a los valores medios esperados en la zona, debido a rayos cósmicos y a la muy escasa presencia de uranio en los sedimentos mas tardíos que conforman los llanos venezolanos circundantes.

Varios países poseedores de limitadas reservas de petróleo han desarrollado la energía nuclear como fuente primaria de energía para sus sociedades, por esta razón el uso de materiales radiactivos tales como el uranio se ha convertido en un aspecto fundamental en el sostenimiento de dichas sociedades. En tal sentido conviene referirnos brevemente a los elementos radiactivos y al uranio particularmente. Todos los elementos pesados ($Z > 83$) hallados en la naturaleza son radiactivos y decaen por emisión alfa o beta. Los elementos mas pesados que el $^{209}_{83}\text{Bi}$ decaen en otros

elementos radiactivos descendientes integrantes de series de radionúclidos que finalizan al formarse nuevas especies estables. La serie del uranio comienza con $^{238}_{92}\text{U}$ y finaliza en el elemento estable $^{206}_{82}\text{Pb}$. El uranio en su estado natural puede hallarse en equilibrio con descendientes de vidas más cortas siempre que estos no sean afectados por procesos químicos o físicos. Es probable que el equilibrio se presente entre ciertos subconjuntos del núclido de la serie.

2. Metodología

La expedición exploratoria de conteo radiactivo se realizó los días 08-13 de Marzo de 2016. El grupo de trabajo se trasladó a la zona previamente identificada, ubicada en los predios de la Estación Biológica de la Fundación Hato Piñero, región de reserva botánica y forestal descrita en [9]. La Figura 1 muestra una vista panorámica del área estudiada, en las Galeras de El Baúl y una fotografía por satélite de la zona descrita. Se seleccionó esta área por tener el macizo más elevado e icónico de las Galeras de El Baúl, ubicado al pie de la convergencia de los ríos San Carlos y Turbio colindante con la reserva forestal de la Estación Biológica Hato Piñero.

Al ser un área ecológicamente protegida el macizo se encuentra en estado natural y el mismo no presenta señales aparentes de intervención humana importante que afecte o contamine los resultados. Así, el área estudiada del macizo no cuenta con caminos, vías de penetración, torres, tendidos eléctricos, o urbanismos de algún tipo y la misma se ubica al pie de las Galeras de El Baúl. Para la realización de este estudio se recolectaron muestras en la mencionada zona.

En la detección de radiación ionizante emplearemos un detector de radiación INSPECTOR *cr* del tipo Geiger-Muller (sensibilidad a radiaciones gamma 3340 CPM/mR/hr relativo al Cs-137 y con eficiencia Sr(Y)-90 aproximada 38 %) para estimar la actividad en cuentas por minuto (CPM) (Figura 2) y para la ubicación de los puntos de medición se utilizaron geolocalizadores GPS marca Garmin *cr* de precisión aproximada de dos metros.



a) Vista desde el Hato Piñero.



b) Vista satelital tomada de Google Maps de las Galeras adyacente a la localidad de El Baúl.

Figura 1: Vista panorámica del área de estudio.

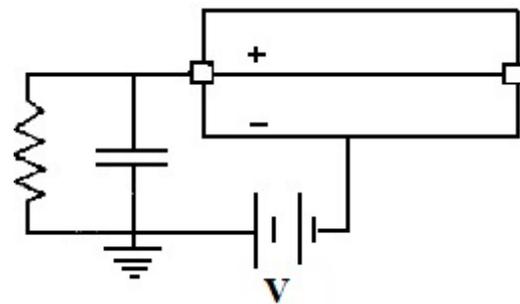


Figura 2: Representación esquemática básica de un dispositivo detector de radiación [10].

Las mediciones fueron efectuadas sobre afloramientos naturales de rocas a la intemperie, carentes de vegetación y ubicadas en las cercanías de la cima del macizo principal y/o en el interior mismo del macizo en la gruta natural conocida como Cueva El Ermitaño (Figura 3).

La actividad de una muestra radiactiva permite conocer el número de desintegraciones por segundo que se producen en la misma. Dado que



Figura 3: Entrada a la Gruta El Ermitaño en el macizo principal de las Galeras de El Baúl.

el contador empleado mide solamente una fracción de la totalidad de la radiación registrada (efic [%]) tendremos que realizar una conversión del valor detectado a la actividad radiactiva que nos interesa.

Para obtener los niveles de actividad (A [desintegración/min]) emplearemos los valores de radiación observada (RO [cuentas/min]) obtenidos con el contador de radiación y el factor de eficiencia (efic [%]) reportado por el fabricante (ver la ecuación (1)):

$$A = (RO \text{efic})/100 \quad (1)$$

Para conocer la tasa neta de desintegraciones de una muestra obtenida en la zona de interés debe medirse el número de eventos n_g ocurridos en un tiempo t_g . La tasa neta está dada por la razón $r_g = n_g/t_g$. La desviación estándar de esta razón está dada por la desviación de n_g . En este caso consideramos que las medidas obtenidas siguen una distribución de Poisson con media μ_g en cuyo caso la desviación estándar estará dada por la ecuación (2).

$$\sigma_g = \sqrt{\mu_g} \quad (2)$$

Para la determinación de σ_g hacemos $\mu_g = A$ [10].

Todas las medidas se tomaron en un campo abierto, a nivel superficial, en horas diurnas y en tres colinas o galeras adyacentes a la localidad de El Baúl (Figura 1). Los resultados preliminares dan cuenta de la presencia de afloraciones de Riolita, forma extrusiva afanítica del Granito, sin presencia

alguna de anomalías magnéticas y con valores de irradiancia solar promedio.

3. Análisis y discusión de resultados

Se presenta a continuación una tabla resumen la cual describe con mayor detalle los valores de las dosis registradas (en CPM), la desviación estándar asociada (STDV), los valores de actividad radiactiva registrada (en Becquerelios) y algunos datos de interés relacionados con el sitio de estudio (ver Tabla 1). Los valores medidos de la radiactividad de las galeras adyacentes a El Baúl, fluctúan entre 4 y 6 veces el valor rms de la actividad radiactiva natural en los llanos, hasta alcanzar el máximo valor de 367CPM ($966 \pm 19Bq$), en un sitio localizado en las coordenadas $N08.97587^\circ$, $W68.28073^\circ$ a 167 msnm en el borde exterior del Hato Piñero tal como puede apreciarse en la Tabla 1. La Figura 1 muestra de manera gráfica la distribución de los valores de las tasas observadas y su relación con los sitios donde se realizaron las mediciones (Figura 4).

Debe mencionarse que las medidas se efectuaron directamente sobre la superficie de las rocas, particularmente sobre a rocas ígneas de origen volcánico (la riolita es una forma extrusiva del granito) caracterizadas por su textura afanítica, sin embargo en la superficie del terreno y/o en el aire los valores de dosis estuvieron por debajo de las 100 CPM (563 Bq) medidos a la entrada y dentro de la gruta y sobre las rocas calizas-sedimentarias ubicadas en una zona adyacente al sitio de interés (Figura 3).

De manera referencial podemos resaltar que en una banca de concreto común se puede detectar (en promedio) una tasa aproximada de 54 CPM (~ 142 Bq) valor considerablemente menor al compararlo al mayor valor registrado en nuestro estudio, a saber 966 Bq.

Por definición un nanogramo de ^{226}R presenta actividad isotópica equivalente a 37Bq, de modo que los valores reportados en la Tabla 1, pueden compararse a los valores típicos de la actividad de la pechblenda y otras uraninitas, que presentan actividades en el rango $\{1..10\}$ Bq. La actividad específica sin embargo, requiere

Tabla 1: Medidas de los valores registrados de dosis en la zona de estudio.

| | Latitud | Longitud | Altura (msnm) | CPM | Actividad Registrada ^(**) (Bq) | STDV |
|-------|------------|-------------|---------------|-----|---|------|
| 1 | N8,965 79° | W68,287 90° | 100 | 214 | 563 | 15 |
| 2 | N8,966 34° | W68,287 90° | 160 | 245 | 645 | 16 |
| 3 (*) | N8,966 79° | W68,287 22° | 182 | 216 | 568 | 15 |
| 4 (*) | N8,966 79° | W68,287 22° | 182 | 246 | 647 | 16 |
| 5 | N8,977 03° | W68,274 70° | 97 | 280 | 737 | 17 |
| 6 | N8,976 55° | W68,256 25° | 139 | 240 | 632 | 16 |
| 7 | N8,975 87° | W68,280 73° | 167 | 367 | 966 | 19 |
| 8 | N8,974 25° | W68,272 43° | 195 | 340 | 895 | 18 |

CPM: cuentas/min. (***) Eficiencia porcentual del instrumento = 0,38 %. STDV: Desviación estándar de la medida.

(*) Estos valores corresponden a muestras halladas a una distancia menor que la precisión reportada por el GPS.

conocer la composición isotópica de cada muestra, para estimar el número de desintegraciones por segundo y por unidad de masa de la especie química en cuestión. Esa limitación no pudo ser superada pues se requiere contabilizar la composición elemental de cada roca y además un conteo isotópico por medio de un espectrómetro de masas, para comparar con los valores típicos de actividad específica del ^{235}U y sus progenies. Adicionalmente habría que realizar estudios de prospección geológica a diferentes profundidades para cuantificar los yacimientos de uraninitas. En tal sentido, la Figura 4 muestra de manera gráfica la distribución de los valores de CPM medidos y las coordenadas geográficas donde se realizaron tales mediciones, donde los puntos representan los valores medios asociados a la misma geoposición.

Los resultados obtenidos confirman la presunción de la existencia de yacimientos de uranio en las zonas de las Galeras del Baúl expuesta por algunos autores [3, 5], basados en la datación geológica y en las características geomorfológicas de diversos sitios del país, considerados como reservorios de minerales estratégicos.

La actividad radiactiva manifiesta en el macizo principal de las Galeras de El Baúl invita a la realización de una exploración mas exhaustiva, que incluya la realización de medidas de gammagrafía in situ y la extracción estratigráfica de muestras que permitan caracterizar el yacimiento. La certificación de reservas de minerales estratégicos requiere así mismo, especificar el tipo de Uraninitas

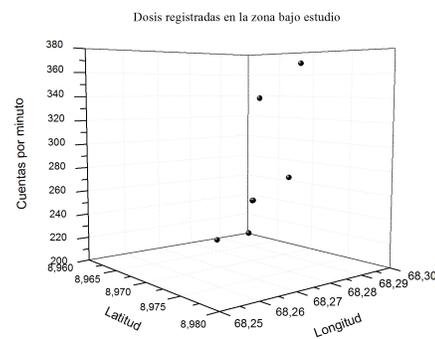


Figura 4: Distribución geográfica de actividad radioisotópica.

presentes, su cantidad y su grado de pureza en comparación con yacimientos similares reportados en otras regiones del país [3, 7, 8] y del continente.

4. Conclusiones

Los actividad radioisotópica natural encontrada en las Galeras de El Baúl muestran la potencialidad de la zona como reservorios de materiales estratégicos que podrían ser empleados tanto en la generación de energía, como en la producción de radioisótopos para la farmacopea, la medicina nuclear y la industria en general. Los valores de radiactividad obtenidos en la zona, en promedio, están por debajo de las dosis máximas permitidas capaces de afectar la salud humana y no presentan por sí mismas riesgo alguno para la biodiversidad de la zona ni para las actividades humanas que allí se desarrollan

($dosis < 0,025\mu Sv$) y los mismos revelan la gran importancia estratégica que poseen las Galeras de El Baúl como posible fuente de materiales de Uranio y Torio. Conviene mencionar que fueron descartadas posibles anomalías electromagnéticas o rayos cósmicos como responsables de la actividad radiactiva observada en las Riolitas colectadas.

Un aspecto que debe ser tomado en cuenta en la etapa de definición del área de estudio es la posible relación existente entre los niveles de radiación presentes en la zona y la actividad eléctrica debida a la ionización existente, conocida la capacidad de las radiaciones de separar electrones bien sea nucleares o de la corona del átomo.

La realización de estudios exploratorios en el área de los materiales radiactivos debe continuarse y profundizarse basándose en los resultados descritos. La etapa posterior a la ubicación de la zona contentiva de materiales radiactivos requiere de la realización de nuevos estudios en el área de la Física Nuclear, Atómica e Ingeniería Geológica.

Agradecimientos

El presente trabajo es financiado por el FONACYT, Proyecto de Investigación N°. FONACYT-MPPCTI 2011-000326. Caracterización de Fenómenos Transitorios en la Troposfera baja: Electrometeoros, Litometeoros, Microtornados y Trombas Marinas.

5. Referencias

- [1] P. Viscarret and F. Urbani. Petrography of El Baúl massifgranitoids, Cojedes state, Venezuela. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 38(3):200–208, 2015.
- [2] P. Viscarret y F. Urbani. Revisión de las investigaciones geológicas realizadas en el Macizo de El Baúl, Estado Cojedes, Venezuela. *Boletín de Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales*, LXX(4):27–69, 2010.
- [3] J. Pasquali y R. Sifontes. Exploración de uranio en Venezuela. En *IX CONGRESO GEOLÓGICO VENEZOLANO*, page 74, Caracas, Venezuela, 2007. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.
- [4] P. Viscarret, F. Urbani y J. Wright. Una nueva geocronología del Macizo El Baúl, estado Cojedes, Venezuela. *GEOS Revista Venezolana de Ciencias de la Tierra*, (42):1–14, 2012.

- [5] P. Viscarret, F. Urbani, R. Sifontes y T. Tosiani. Petrología y petrografía de las rocas del Macizo de El Baúl, estado Cojedes. *GEOS Revista Venezolana de Ciencias de la Tierra*, 42:118–121, 2012.
- [6] D. Palacios, H. Barros, J. Salas, E. Fusella, Y. Avila y D. Teixeira. Técnicas radiométricas superficiales en la exploración petrolera. *GEOS Revista Venezolana de Ciencias de la Tierra*, 44:83–92, 2013.
- [7] H. Barros, E. Fusella, Y. Avila, D. Teixeira, M. Bolivar, J. Regalado, D. Palacios y J. Salas. Radiactividad gamma y radón sobre un campo petrolero con aguas freáticas contaminadas por gas natural. *GEOS Revista Venezolana de Ciencias de la Tierra*, 44:93–104, 2013.
- [8] J. Pasquali. Cuantía de los hidrocarburos de la faja petrolífera del Orinoco: Consecuencias y futuro. *GEOS Revista Venezolana de Ciencias de la Tierra*, 41:1–7, 2011.
- [9] F. Delascio. Los Mangles del Hato Piñero, Estado Cojedes, Venezuela. *Acta Botánica Venezuelica*, 27(2):141–146, 2004.
- [10] J. Turner. *Atoms, Radiation and Radiation Protection*. Wiley, 2 edition, 1995.

Tech Note: Study of the flow of a thin film on an inclined plane in the presence of a tangential stress applied to the free surface and effects of viscous dissipation.

Gruber Caraballo, Enrique Flores*

Departamento de Térmica y Energética. Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

Abstract.- One of the most common hydrodynamic instabilities is the propagation of waves on the free surface of liquid fluid flow, since there are velocity, pressure and temperature gradients that generate convective currents from the sine of the fluid to the external gas. The interest in these phenomena increases when the thickness of the fluid is small compared to its length, that is, in thin films of fluid. The ideal model to study thin films is when they descend an inclined plane in such a way as to consider the effect of gravity on the movement of the flow and precisely in this article is considered such condition, in addition to adding the effect of the viscous dissipation of the Nahme's law type and the application of shear tangential effort on the free surface. In this work it is used the Navier-Stokes equations and energy, we obtain a system of coupled differential equations for the fields of velocities and temperatures as a function of the depth of the thin film, and it is determined the numerical approximate solution using Four order Runge-Kutta's Method for different work conditions. It is observed that the viscous dissipation contribute to increasing the velocity in plane direction, it is observed that according to shear stress application direction in free surface the flow accelerate or desacelerate, and for low values of Brinkman's number, temperature gradient affect to flow desaceleration.

Keywords: thin films of fluids; viscous dissipation; Nahme's law.

Nota técnica: Estudio del flujo de una película delgada sobre un plano inclinado en presencia de un esfuerzo tangencial aplicado a la superficie libre y efectos de disipación viscosa.

Resumen.- Una de las inestabilidades hidrodinámicas más comunes es la propagación de ondas en la superficie libre de un flujo de fluido líquido, ya que existen gradientes de velocidad, presión y temperatura que generan corrientes convectivas desde el seno del fluido hacia el gas exterior. El interés por estos fenómenos se incrementa cuando el espesor del fluido es pequeño en comparación con su longitud, es decir, en películas delgadas de fluido. El modelo ideal para estudiar las películas delgadas es cuando descienden por un plano inclinado de tal manera que sea considerado el efecto de la gravedad en el movimiento del flujo, además de agregar el efecto de la disipación viscosa del tipo ley de Nahme y la aplicación de un esfuerzo tangencial cortante en la superficie libre. En este trabajo se usan las ecuaciones de Navier-Stokes y de la energía, se obtiene un sistema de ecuaciones diferenciales acoplado para los campos de velocidades y de temperaturas en función de la profundidad de la película delgada, y se determina la solución numérica aproximada del sistema empleando el método de Runge-Kutta de orden 4 para distintas condiciones de trabajo. Se observa que la disipación viscosa contribuye al aumento de la velocidad en la dirección del plano, que según la dirección de aplicación de un esfuerzo tangencial en la superficie libre se acelera o desacelera el flujo, y que para valores bajos del número de Brinkman, el gradiente de temperatura influye en la ralentización del flujo.

Palabras clave: películas delgadas de fluido; disipación viscosa; ley de Nahme.

Recibido: 06 de febrero, 2019.

Aceptado: 03 de julio, 2019.

1. Introducción

El estudio de películas delgadas es de interés tanto en las ciencias básicas como en el campo industrial y tecnológico. Estas pueden estar constituidas por fluidos tan comunes como agua y aceites, o materiales exóticos como

* Autor para correspondencia:
Correo-e: evflores@gmail.com (E. Flores)

polímeros según Macosko [1]. En presencia de la acción de agentes externos mecánicos o térmicos, las películas delgadas pueden desarrollar patrones complejos tales como la propagación de ondas, frentes de ondas con discontinuidades y hasta comportamientos caóticos. En ingeniería, el estudio de las películas delgadas es útil en procesos de transferencia de calor y masa, porque ellas limitan los flujos y protegen superficies, también se encuentran en aplicaciones de pinturas, adhesivos y membranas. La dinámica en películas delgadas tiene características particulares dado que la interfase entre el líquido y el gas que le superpone representa un contorno deformable donde las perturbaciones pueden viajar y en condiciones de alto número de Reynolds evolucionar hasta formar saltos de amplitud relativamente grande en comparación con el espesor de la película delgada, o realizar transiciones a estructuras cuasi-periódicas o erráticas, altamente no lineales, que podrían incluso romper la película y exponer al sustrato, al contacto con el gas. Un mecanismo común que produce cambios en el campo de flujo de una película delgada es la acción de la gravedad combinada con la transferencia de calor que provoca cambios en la viscosidad del fluido como lo demostró Myers et al. [2]. El fuerte acoplamiento entre las ecuaciones de Navier-Stokes y la ecuación de la energía a través de la velocidad de deformación, la viscosidad y la temperatura según Richard et al. [3] también influye en el comportamiento no lineal del desarrollo del flujo y Tshehla [4] introdujo el efecto disipativo de la viscosidad del fluido en función del cambio exponencial de la temperatura y su influencia en la transferencia de calor por convección, entre la base y la superficie libre de una película delgada que desliza por un plano inclinado. En el presente trabajo se estudia la influencia que tiene un esfuerzo cortante aplicado en la superficie libre con la finalidad de ralentizar el movimiento del fluido plano abajo provocado por los gradientes convectivos y la disipación térmica debido al flujo de calor entre el plano inclinado y la superficie con una notable variación de la viscosidad del fluido como función de la temperatura.

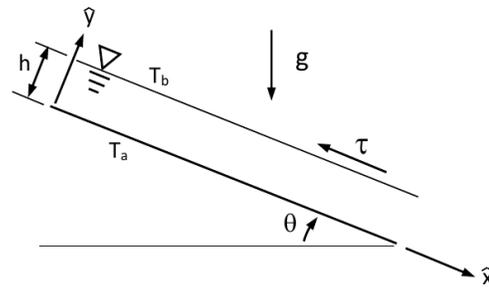


Figura 1: Flujo laminar de una película delgada de fluido newtoniano que desliza por un plano inclinado

2. Formulación del problema

La Figura 1 representa el flujo laminar en dos dimensiones de una película delgada de un fluido newtoniano que desliza por un plano inclinado, que se encuentra a una temperatura T_a , en presencia del campo gravitacional y en cuya superficie libre, que está a una temperatura T_b , se le aplica un esfuerzo tangencial τ constante. El espesor de la película es h y la viscosidad del fluido varía exponencialmente con la temperatura. El desarrollo del modelo matemático del campo de flujo toma en cuenta las siguientes consideraciones:

1. El flujo es incompresible con viscosidad $\mu(T)$ dependiente de la temperatura.
2. El régimen de flujo se considera laminar.
3. Flujo estacionario bidimensional.

Bajo estas consideraciones las ecuaciones que describen el flujo son: ecuación (1), conservación de la masa.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \quad (1)$$

Ecuaciones de Navier Stokes, según (2) y (3).

$$\hat{x} : \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \rho g \sin(\theta) = 0, \quad (2)$$

$$\hat{y} : \frac{\partial p}{\partial y} = \rho g \cos(\theta). \quad (3)$$

Ecuación (4), conservación de la energía.

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial^2 y} + 2\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 = 0. \quad (4)$$

Las condiciones de contorno son:

$$u_{(y=0)} = 0,$$

$$\mu \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{(y=h)} = \tau,$$

$$T_{(y=0)} = T_a,$$

$$T_{(y=h)} = T_b.$$

El modelo utilizado por Costa y Macedonio [5] para la dependencia de la viscosidad dinámica con la temperatura está basada en la ley de Nahme donde existe una variación exponencial, de acuerdo con la ecuación (5)

$$\mu = \mu_0 e^{-\alpha T}. \quad (5)$$

Integrando la ecuación (2) y usando la condición de contorno para el esfuerzo cortante se obtiene la ecuación (6)

$$\frac{du}{dy} = \left(\frac{\rho g (h - y) \text{sen}(\theta) + \tau}{\mu_0} \right) e^{\alpha T}. \quad (6)$$

Sustituyendo la ecuación (5) en (4), se obtiene la ecuación (7):

$$\frac{d^2 T}{dy^2} + \frac{2}{\mu_0 k} (\rho g (h - y) \text{sen}(\theta) + \tau)^2 e^{\alpha T} = 0. \quad (7)$$

De esta manera el modelo matemático queda representado por el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias acopladas no lineales formado por las ecuaciones (6) y (7) cuyas condiciones de contorno están representadas por:

$$u_{(y=0)} = 0, T_{(y=0)} = T_a, T_{(y=h)} = T_b$$

Indicándose la condición de no deslizamiento y los valores de la temperatura en el plano y en la superficie libre respectivamente.

3. Formulación adimensional

El flujo se desarrolla en dos dimensiones, \hat{x} paralela al plano y \hat{y} que representa la dirección normal al mismo. El espesor de la película está definido en esta última dirección y se denota por h , luego se puede usar un parámetro ε que define la relación geométrica o de aspecto del flujo como:

$$\varepsilon = \frac{h}{L} \ll 1$$

El sistema de ecuaciones (6) y (7) se puede descomponer en tres ecuaciones diferenciales ordinarias haciendo $W = dT/dy$, resultando las ecuaciones (8), (9),(10):

$$\frac{du}{dy} = \left(\frac{\rho g (h - y) \text{sen}(\theta) + \tau}{\mu_0} \right) e^{\alpha T}, \quad (8)$$

$$\frac{dT}{dy} = W, \quad (9)$$

$$\frac{dW}{dy} + \frac{2}{\mu_0 k} (\rho g (h - y) \text{sen}(\theta) + \tau)^2 e^{\alpha T} = 0. \quad (10)$$

Estas ecuaciones de gobierno se pueden transformar en ecuaciones adimensionales utilizando las escalas definidas por las ecuaciones (11), (12) y (13):

$$u = U_0 U, \quad (11)$$

$$y = h Y, \quad (12)$$

$$\Theta = \frac{T - T_a}{T_b - T_a}, \quad (13)$$

donde las cantidades en mayúsculas U , Y y Θ son adimensionales, resultando el sistema de ecuaciones diferenciales acopladas de primer orden no lineales formado por las ecuaciones (14), (15) y (16):

$$\frac{dU}{dY} = (1 - Y + \gamma) e^{\beta \Theta}, \quad (14)$$

$$\frac{d\Theta}{dY} = W, \quad (15)$$

$$\frac{dW}{dY} = -\lambda e^{\beta \Theta}, \quad (16)$$

donde γ y λ se expresan en las ecuaciones (17) y (18).

$$\gamma = \tau / (\rho g \text{sen}(\theta)), \quad (17)$$

$$\lambda = (\rho g h^2 \text{sen}(\theta))^2 / (\mu_0 k (T_a - T_b)). \quad (18)$$

Se puede destacar que $U_0 = \rho g h^2 \text{sen}(\theta) / \mu_0$ es la velocidad máxima en la dirección del plano, por ello se tiene que $\lambda = Br = \mu_0 U_0^2 / k(T_a - T_b)$ es el número adimensional de Brinkman.

El sistema debe satisfacer las siguientes condiciones de contorno:

$$U_{(y=0)} = 0, \Theta_{(y=0)} = 0, \Theta_{(y=h)} = 1$$

4. Análisis y discusión resultados

La solución numérica del sistema adimensional de ecuaciones formado por (14), (15) y (16) está basado en un problema de valor inicial donde se usó el método de Runge-Kutta de cuarto orden, variando los parámetros γ relacionado con el efecto producido por el esfuerzo tangencial que actúa sobre la superficie libre, λ que mide el efecto de la conducción de calor entre el plano y el fluido (número de Brinkman) y β que caracteriza la influencia del gradiente de temperaturas en la disipación viscosa por la ley de Nahme. El orden del error en esta aproximación es $O(h^4)$ siendo h el tamaño de paso empleado en el cálculo; que en todos los casos reportados en este trabajo es: $h = 1 \times 10^{-3}$. En la Figura 2, se muestra el comportamiento y evolución numérica de la solución para $\gamma = 0$, es decir sin esfuerzo tangencial aplicado.

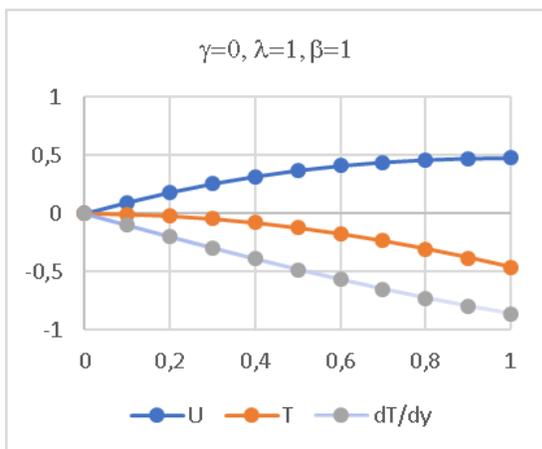


Figura 2: Solución numérica para $\gamma = 0, \beta = 1$ y $\lambda = 1$

En las Figuras 3 y 4 se usó $\gamma=2$ y $\gamma=5$ respectivamente para demostrar el efecto del

esfuerzo tangencial sobre el flujo de la película delgada plano abajo.

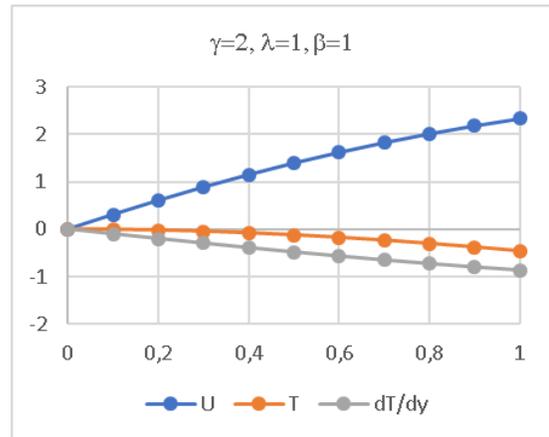


Figura 3: Solución numérica para $\gamma = 2, \beta = 1$ y $\lambda = 1$

Mientras que en las Figuras 5 y 6 se muestra el efecto que tiene la disipación viscosa en el campo de flujo, inicialmente con $\gamma = 0$ y $\lambda = 4$ 5 y luego con $\gamma = 2$ y $\lambda = 10$. En todos los casos se observa como el efecto del esfuerzo tangencial acelera el movimiento, incrementando la velocidad de descenso, sin embargo, la disipación viscosa produce un efecto similar demostrándose el fuerte acoplamiento que existe entre las ecuaciones de momento y energía en el campo de flujo.

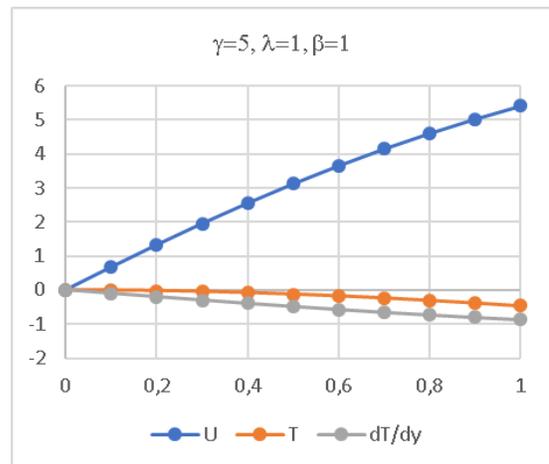


Figura 4: Solución numérica para $\gamma = 5, \beta = 1$ y $\lambda = 1$

Caso contrario ocurre cuando $\gamma < 0$, pues en ese caso el esfuerzo tangencial actuaría en dirección

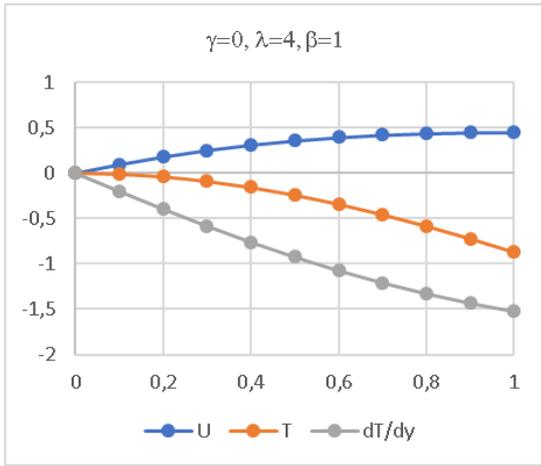


Figura 5: Solución numérica para $\gamma = 0, \beta = 1$ y $\lambda = 4$

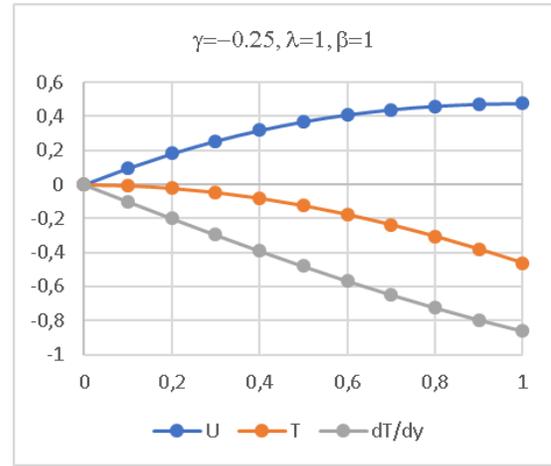


Figura 7: Solución numérica para $\gamma = -0,25, \beta = 1$ y $\lambda = 10$

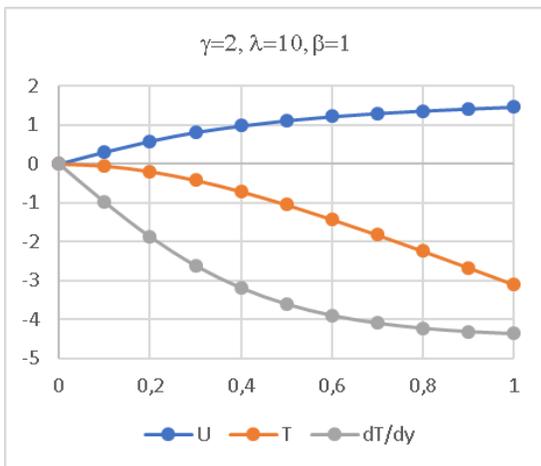


Figura 6: Solución numérica para $\gamma = 2, \beta = 1$ y $\lambda = 10$

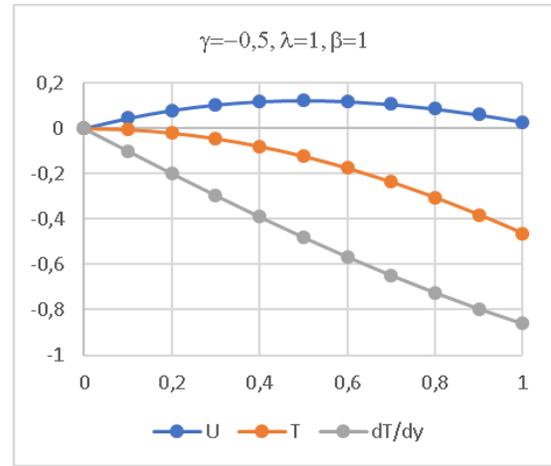


Figura 8: Solución numérica para $\gamma = -0,5, \beta = 1$ y $\lambda = 10$

opuesta al efecto de la gravedad sobre la película delgada desacelerando el flujo. En las Figuras 7 y 8 se observa este efecto con $\gamma = -0,25$ y $\gamma = -0,5$ respectivamente.

5. Conclusiones

En los experimentos numéricos realizados en el presente trabajo se muestra un fuerte acoplamiento que brinda la ley de Nahme entre las ecuaciones de momento y la ecuación de la energía, lo que conlleva a la evolución de campos de velocidad dependientes de la temperatura. En el caso de una película delgada bajo los efectos de la gravedad descendiendo por un plano inclinado, la disipación

viscosa contribuye al aumento de la velocidad en la dirección del plano, pero la aplicación de un esfuerzo tangencial en la superficie libre, acelera o desacelera el flujo según sea la dirección del mismo, lo que indica que representa un mecanismo de control sobre la velocidad del flujo. El potencial de la solución adimensional revela la dependencia con el número de Brinkman, encontrándose que para valores bajos de dicho número el gradiente de temperatura juega un papel importante en la ralentización del flujo.

6. Referencias

[1] C.W. Macosko. *Rheology, Principles, Measurements, and applications*. Wiley-VCH, Poughkeepsie, New York,

United States of America, 1994.

- [2] T.G. Myers, J.P.F. Charpin, and M.S. Tshehla. The flow of avariable viscosity fluid between parallel plates with shear heating. *Applied Mathematical Modelling*, 30(9):799–815, 2013.
- [3] G.L. Richard, C. Ruyer-Quil, and J.P. Vila. A three equation model for thin films down an inclined plane. *Journal Fluid Mech*, 804:162–200, 2016.
- [4] M.S. Tshehla. The Flow of variable viscosity fluid down an inclined plane with a free Surface. *Mathematical problems in Engineering*, 2013, 2013.
- [5] A. Costa and G. Macedonio. Viscous heating in fluids with temperature-dependent viscosity. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 10(6):545–555, 2012.

Subjects index

Symbols

(+)- catechin, 192

A

acetylation, 202
 AISI 4140 steel, 185
 Android app, 128
 antioxidant activity, 192
 authentication, 128

B

beech tree wood chips, 154
 biometry, 128

C

cocoa, 192, 213
 concrete volume, 145
 cosmetic market, 213

D

derived products, 213

E

El Bául Massif, 233
 energy dissipation, 163
 estimation methods, 175

F

food market, 213

G

genetic algorithm, 145

H

hidraulic jump, 163
 HPLC, 192

I

ideal spillway, 145

K

K-NN algorithm, 128

L

locomotion, 128

lysimeter measurements, 175

N

Nahme's law, 239
 natural radioactivity, 233
 nitrate removal, 154

P

palm tree leaves, 154
 patents, 223
 pharmaceutical market, 213
 polyheed 1026, 202
 polymethylmethacrylate, 202
 procyanidin B2, 192

R

recycling, 223
 reinforced concrete, 202
 rice evapotranspiration, 175
 rolling friction, 185

S

security, 128
 specific energy, 163
 spillway geometry, 145
 stilling basin, 163
 sugarcane bagasse, 202

T

Taguchi method, 154, 185
 technological trends, 223
 thin films, 239
 thorium-uranium, 233
 tribology, 185

U

uraninite, 233

V

viscous dissipation, 239

W

wastewater; recycling, 223
 wheat straw, 154

Índice de autores (*Author index*)

A

Afarinandeh, Amir, 154
Ahmadpari, Hedieh, 154, 175

B

Babae, Maryam, 175
Barrios, Richard, 233

C

Caraballo, Gruber, 239
Contento, Ana, 192

F

Falcón, Nelson, 233
Flores, Enrique, 239

G

Gómez–Molina, Rosangel, 213

H

Hashemi, Seyyed, 154
Henríquez, Magaly, 213, 223
Hernández, Daniel, 128
Hernández, Jiraleiska, 223

K

Kheiry, Milad, 145

L

Lujano, Eduardo, 192

M

Manganiello, Lisbeth, 192
Muñoz, José, 202

N

Nabi-Jalali, Mohammad, 175

P

Paricaguán, Belén, 202
Pilpayeh, Alireza, 145

R

Ríos, Ángel, 192
Robledo, Fabián, 128

Romero, Jorge, 185

Rondón, E., 185

S

Shokat-Naghadeh, Ahmad, 175

T

Terrones, Nelson, 163

V

Vásquez, Luis, 163
Villanueva, Samuel, 213, 223

Apéndices

Línea editorial

Misión científica

Revista Ingeniería UC es el principal organismo de difusión científica y tecnológica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.

El objetivo de Revista Ingeniería UC es la difusión de trabajos científicos tecnológicos en todas las áreas de la ingeniería, así como también ciencias afines aplicadas a la ingeniería.

Revista Ingeniería UC está adscrita a la Dirección de Investigación de la Facultad de Ingeniería. Es considerada por todos sus profesores como uno de los patrimonios más importantes de la Facultad de Ingeniería. Su primer volumen aparece en diciembre de 1992. Fundada por el Dr. Edilberto Guevara en 1992 (actualmente Editor Honorario).

local, Universidad de Carabobo y sus estados de influencia; nivel nacional, toda Venezuela; así como a nivel internacional.

Todos los artículos son revisados por el Comité Editorial y arbitrados, a doble ciego, por el Comité Técnico y por especialistas en la materia.

Revista Ingeniería UC es publicada cada cuatro meses bajo los auspicios del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo (CDCH-UC).

Cobertura temática

Revista Ingeniería UC considerará para su difusión trabajos *originales e inéditos* (Los autores deben enviar la cartar de compromiso), en español e inglés. Manuscritos en las áreas de la ingeniería de todas sus especialidades, pero en particular en las áreas de industrial, eléctrica, mecánica, civil, química y telecomunicaciones; así como de las ciencias básicas aplicadas a la ingeniería: matemáticas, física, química, computación, biología, ciencias ambientales, bioingeniería, biotecnología, estadística, etc.

Foro de Revista Ingeniería UC

La audiencia a la cual está dirigida consta de todos los investigadores en las áreas de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas. En particular a los investigadores, profesores y estudiantes de Doctorado, Maestría y pregrado en las áreas de ingeniería y ciencias básicas afines. Esta audiencia es extendida a los gerentes de las áreas de innovación y desarrollo tecnológico del sector industrial. El foro cubre las comunidades a nivel

Editorial line

Scientific mission

Revista Ingeniería UC is the main body for scientific and technological diffusion at Engineering Faculty of Carabobo University.

The Revista Ingeniería UC objective is the diffusion of scientific – technological works in all areas of engineering, as well as related sciences applied to engineering.

Revista Ingeniería UC is subscribed to Research Direction of Engineering Faculty. It is considered by all its professors as one of the most important patrimonies of the Faculty of Engineering. Its first volume appears in December of 1992. Founded by Dr. Edilberto Guevara in 1992 (currently Honorary Editor).

Thematic coverage

Revista Ingeniería UC will consider for its diffusion original and unpublished works (The authors must send the commitment letter), in Spanish and English. Manuscripts in engineering areas of all its specialties, but particularly in the areas of industrial, electrical, mechanical, civil, chemical and telecommunications; as well as the basic sciences applied to engineering: mathematics, physics, chemistry, computation, biology, environmental sciences, bioengineering, biotechnology, statistics, etc.

Revista Ingeniería UC forum

The target audience is made up of all researchers in the areas of science, technology, engineering and mathematics. In particular the researchers, professors and students of Doctorate, Master's and undergraduate in the areas of engineering and related basic sciences. This audience is extended to innovation and technological development areas managers of the industrial sector. This forum has covers local communities, University of Carabobo

and their state of influence; national level, all of Venezuela; as well as international level.

All articles are reviewed by Editorial Committee and refereed, double-blinded, by Technical Committee and by specialists in the field.

Revista Ingeniería UC is published every four months under the auspices of Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico at Carabobo University (CDCH-UC).

Políticas de ética y publicación

Introducción

Revista INGENIERÍA UC, como publicación científica cuatrimestral incluye tres números (Abril-Agosto-Diciembre) por cada volumen en un año, alcanza la generación continua de contenidos como principal organismo de difusión académica, científica y tecnológica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo. El idioma principal de la revista es el español, manejando el inglés como segundo idioma y todos los artículos incluyen tanto el título como el resumen en ambos idiomas.

Comprometidos en mantener los más altos estándares éticos, se efectúan acciones en contra de cualquier práctica anti-ética o por negligencia profesional. El plagio está estrictamente prohibido y nuestros autores y demás investigadores expresan formalmente que sus trabajos deben ser originales, inéditos, y no estar siendo sometidos a proceso de arbitraje en otras revistas, por otra parte, queda expresamente prohibido la copia o el plagio, parcial o en su totalidad, de otras obras. Todo trabajo para ser publicado cuenta con la exigencia de manera explícita a sus autores de la normativa ética de la Revista que se plasma en una *Carta de Compromiso*.

Prácticas anti-éticas y negligencia profesional

Por considerar tanto aspectos científicos como tecnológicos, se debe tomar en cuenta la necesidad de velar por la veracidad de toda información suministrada incluyendo datos técnicos, diagramas, tablas y figuras, diseños experimentales, metodologías, entre otros, siendo de vital importancia la cita a las referencias respectivas indicando con los estándares habituales cuando la información es tomada textualmente. Considerando como faltas graves y conlleva un proceso sancionatorio:

- a) **Copias o plagio:** presentar datos o ideas como propios, de manera parcial o en su totalidad, provenientes de otras obras.
- b) **Falsificación o adulteración:** la modificación y cambio de datos presentados, omitir información de forma tal que la investigación no esté completamente presentada.
- c) **Presentación de datos no verídicos:** fabricación, manipulación y presentación de información que no se desprenden de datos reales derivados de la investigación.
- d) **Alteración de autor y coautores:** La inclusión de algún miembro que no ha participado en la investigación, así como la exclusión de alguno que si lo ha realizado. De igual forma, cualquier modificación relacionada con cambios en autores y coautores, debe estar debidamente justificada; luego de finalizado el proceso de edición no será considerada.
- e) **Alteración del proceso de arbitraje:** cualquier intento que afecte el proceso de arbitraje por pares a doble ciego, se prohíbe de manera tácita la comunicación entre un árbitro y los autores del artículo mientras dure su revisión.

De la responsabilidad de los autores

Los autores serán guiados a través de cuatro fases que conllevan la revisión preliminar, el proceso de arbitraje por pares (doble ciego), el proceso de edición y montaje y por último corrección de redacción y estilo. La responsabilidad de la comunicación con la revista recae en el autor por correspondencia. Los autores están obligados a:

- a) Firmar la *Carta de Compromiso*, manifestando que el contenido del trabajo enviado a la revista es original e inédito: no ha sido publicado, no es duplicado ni redundante, además no está siendo sometido simultáneamente a arbitraje para su publicación por ningún otro medio de difusión, y por último que los datos presentados son originales y verídicos.

- b) Deben evitarse o reconocerse los envíos anteriores del manuscrito a otras revistas o publicaciones, en el caso de haber sido enviado es necesario la presentación de una comunicación de la otra publicación donde se deje sin efecto el proceso de arbitraje y las motivaciones consideradas.
- c) Respecto a materiales / datos citados o utilizados de otras investigaciones deben documentarse cuidadosamente y citarse como referencia e indicar cuando son tomados textualmente. No es permitido la duplicación de trabajos anteriores.
- d) Respecto a la identificación de autores, se debe indicar el nombre tanto del autor como de los coautores, involucrados en el desarrollo de la investigación, evitando incluir personas no que estén vinculadas a la misma. Siendo además miembros de una institución de educación superior o de una estructura de investigación reconocida, suministrando información detallada relacionada con su filiación, correo electrónico de contacto y cualquier otro elemento que permita su identificación.

De la responsabilidad de los miembros del Comité Técnico - Árbitros

Una vez recibido el manuscrito, acompañado de las Normas de Publicación de la Revista y el Formato de Evaluación previsto por Revista Ingeniería UC, los árbitros están en la obligación de informar de manera expedita, si se acepta o rechaza la revisión del mismo explicando los motivos. En el caso de que los árbitros tengan interés intelectual o material relacionado al manuscrito bajo revisión, estos deberán inhibirse de manera voluntaria evitando así Conflicto de Intereses.

Los Miembros de Comité Técnico deberán rechazar la revisión de manuscritos, cuando estos estén fuera de su área de experticia o de especialización técnica y científica. Por otro lado, los árbitros o revisores deben completar debidamente el Formato de Evaluación previsto así como también realizar las observaciones que considere pertinentes sobre el manuscrito evaluado, lo cual incluye todas aquellas propuestas tendentes a mejorar cuando sea

el caso la presentación y análisis de resultados y la incorporación de investigaciones de referentes de importancia, tomando en cuenta que el envío de dicha información al Editor-Jefe es de carácter obligatorio y estrictamente confidencial.

De la responsabilidad de los miembros del Comité Editorial

El Editor-Jefe de Revista Ingeniería UC, realizará una revisión preliminar al recibir el manuscrito, atendiendo a las características de la línea editorial correspondiente. Una vez superada dicha revisión, se procederá a proponer a los revisores o árbitros de acuerdo al área de conocimiento.

El Editor-Jefe será el responsable de enviar las comunicaciones respectivas a los autores, con respecto a las observaciones emitidas por el Comité Técnico, y conducir el proceso para que se tomen medidas correctivas. Así mismo, decidirá sobre la aceptación o no del manuscrito en atención a los comentarios de los árbitros o revisores designados. El Comité Editorial tratará la información relacionada con los artículos con criterios de confidencialidad.

El Comité Editorial es responsable de la publicación de cualquier nota o crítica razonable o fe de errata con respecto a los manuscritos publicados en números anteriores.

Preservación digital

Revista Ingeniería UC utiliza para la preservación digital de sus artículos, el resguardo con archivo comprimido en formato \LaTeX , además a través de Marcalyc 2.0 realiza el marcaje obteniendo archivo XML según estándar JATS.

Licencia Creative Commons

Licencia de Creative Commons Reconocimiento – No Comercial – Sin Obras derivadas 4.0 Internacional



Ethics and Publication Policies

Introduction

Revista Ingeniería UC, as a quarterly scientific publication includes three issues (April-August - December) for each volume in a year, reaches the continuous generation of contents as principal media of diffusion academic, scientific and technological of the Faculty of engineering at Carabobo University. The primary language of the journal is Spanish, managing English as a second language, all articles include title and abstract in both.

Also committed to maintaining the highest ethical standards, are performed actions against any anti-ethics practice or professional negligence. Plagiarism is strictly forbidden and our authors and other researchers expressed formally that their work must be original, unpublished, and not be submitted to arbitration process in other journals, in the other hand, is expressly forbidden the copying or plagiarism, partially or in its entirety, of other works. All article to be published has the requirement to the authors, of the ethic police of the journal with a “*Compromise Letter*”.

Anti-ethics practices and professional negligence

Due scientific and technological aspects, Revista Ingeniería UC needs to ensure the veracity of all information provided including technical data, diagrams, tables and figures, experimental designs, methodologies, among others, being vital the cite of the respective references indicating with the usual standards when the information is taken verbatim. Considering as serious faults:

- a) **Copy or plagiarism:** present data or ideas as own, partially or entirety, from other works.
- b) **Falsification or adulteration:** modification or change data presented, omit information in such way that the investigation is not completely presented.

- c) **Presentation of untrue data:** manufacturing and handling of the presented information that does not arise from real data derived from research.
- d) **Author – Coauthors alteration:** Exclusion of members participating in the investigation or inclusion of members without a direct role. Also, any author–coauthors alteration, must be supported and after edition process closed not be considered.
- e) **Alteration of the arbitration process:** any attempt that affects the arbitration process (double blind peer-review), tacitly prohibits communication between an arbitrator and the authors of the article, while the review of the article is finished.

About the responsibility of Authors

The authors will be guided through four phases including preliminar review, arbitration process (peer–review, double blind), final edition and assembly and correction of style and redaction. The communication responsibility with the journal are in *Correspondence Author*. The authors must:

- a) Sign the “*Compromise Letter*”, stating that the content of the manuscript sent to the journal is original and unpublished: it has not been published, it is not duplicated or redundant, it is not being simultaneously submitted to arbitration for publication by another means of diffusion, and finally that the data presented is original and true.
- b) Previous shipments of the manuscript to other journals should be avoided or recognized, and it is necessary to present a communication from the other journal where the arbitration process are left without effect and the motivations considered. Regarding materials / data cited or used from other research, it should be carefully documented and cited as a reference, indicating

when they are taken verbatim. Duplication of previous works is not allowed.

- c) With respect to the identification of authors, the name of both the author and the co-authors, involved in the development of the research, should be indicated, avoiding including persons who are not linked to it. The authors and co-authors must be members of a higher education institution or a recognized research structure, providing detailed information related to their affiliation, contact email and any other element that allows their identification.

About the responsibility of Committee Technic members – Arbiters

Once upon the manuscript is received, with the normative of publication and evaluation format of Revista Ingeniería UC, arbiters are obligated to inform immediately, if accept or refuse review the document and must explain the motives about it. In the event that the arbiters have intellectual or material interest related to the manuscript under review, they must be voluntarily inhibited, thus avoiding Conflict of Interest.

The members of the Technical Committee must reject the revision of manuscripts, when they are outside their area of expertise or technical and scientific specialization. In other hand, the referees or reviewers must duly complete the expected Evaluation Form, as well as make the observations that they consider pertinent about the manuscript evaluated, which includes, as the case may be, all those proposals aimed at improving the presentation and analysis of results, and the incorporation of investigations of important referents, taking into account that the sending of information to the Editor-in-Chief is mandatory and strictly confidential.

About the responsibility of Editorial Committee members

The Editor-in-Chief of Revista Ingeniería UC, will carry out a preliminary review upon receiving the manuscript, taking into account the characteristics of the corresponding editorial line.

Once this revision has been completed, it will proceed to propose the reviewers or arbiters according to the area of knowledge.

The Editor-in-Chief will be responsible for sending the respective communications to the authors, with respect to the observations issued by the Technical Committee, and conduct the process to corrective measures are taken. Likewise, it will decide on the acceptance or not of the manuscript in response to the comments of the appointed arbiters or reviewers. The Editorial Committee will manage the information related to the articles with confidentiality criteria.

The Editorial Committee is responsible for the publication of any note or reasonable criticism or errata with respect to the manuscripts published in previous issues.

Digital preservation

Revista Ingeniería UC uses to digital preservation of its articles, saving zip file with L^AT_EX format, also via Marcalyc 2.0 makes marked file generating XML JATS file.

License Creative Commons

License de Creative Commons Reconocimiento – No Commercial – No derivatives. 4.0 International



Normas para la presentación de artículos

Generales

Línea editorial

Revista Ingeniería UC, considerará para su difusión trabajos *originales e inéditos* en ingeniería, en particular las áreas de industrial, eléctrica, mecánica, civil, química y telecomunicaciones; así como de las ciencias aplicadas a la misma.

Tipos de trabajos

- a Artículos de investigación inéditos con un máximo de veinte (20) páginas.
- b Notas técnicas con un máximo de cinco (5) páginas.
- c Artículos de actualización científica que resuman el Estado del Arte de un área específica de la ingeniería con un máximo de doce (12) páginas.
- d Artículo invitados especiales con un máximo de veinte (20) páginas.
- e Cartas al editor.
- f Artículos de tendencia tecnológica, estudios de prospectiva de I+D+i a medio y largo plazo de alta utilidad en el campo industrial.

Al enviar un artículo a Revista Ingeniería UC, el autor está comprometido formalmente con que el trabajo consignado es original e inédito, de igual manera manifiesta su conocimiento de las normas de la revista y acepta que sea sometido al proceso de arbitraje.

Estilo

La redacción de los trabajos puede realizarse en idioma castellano o inglés. El trabajo original debe ser redactado en formato \LaTeX o en su defecto en Microsoft Word.

Los trabajos en Word deben emplear una fuente de la familia Times, estar almacenado en

disco compacto (CD) o en su defecto enviarse por vía electrónica al correo de la revista revistaing@uc.edu.ve.

Los trabajos en \LaTeX deben incluir los archivos pdf, tex y una carpeta comprimida con las figuras en eps (o png)

Figuras

Las figuras deben ser en escalas de grises claros, no color, en formato vectorializado preferiblemente png o eps (también se admiten los formatos CompuServe gif o jpg, si estas son de alta calidad y trabajó en word) deben añadirse en archivos independientes y numeradas. Las leyendas o descripciones de la figuras no pueden estar embutidas en éstas, deben ser incluidas en el texto del trabajo y en un archivo aparte llamado Leyenda de Figuras.

Tablas:

Las tablas no pueden ser resaltadas por ningún tipo de color. Solamente los textos a resaltar mediante “negritas”. También deben incluirse las tablas en archivos aparte numerados y es necesario incluir un archivo con las leyendas de las tablas.

Toda tabla y/o figura deben ser numerada en arábigo (1, 2, ...), citada y suficientemente comentada en el texto del trabajo. La cita sería en la forma: “en la Figura 3”, “en la Tabla 2”, por ejemplo (sin abreviar). Toda tabla o figura debe tener un ancho máximo de 17,5 cm.

No es estilo de la revista frases como; “en la Figura siguiente” o en la “Tabla anterior”

El orden a seguir para la redacción del trabajo es el siguiente:

1. Portada.
2. Introducción.
3. Metodología o Desarrollo de la investigación.
4. Análisis y discusión de resultados.
5. Conclusiones.

6. Referencias.

La portada debe contener:

- Título del trabajo en castellano y en inglés, con un máximo de 20 palabras.
- Nombre(s) del autor(es) y su dirección(es) institucionales completa(s), dirección postal, correo electrónico del autor para correspondencia (sólo será publicado el correo electrónico del autor para correspondencia).
- Resumen del trabajo en castellano y en inglés (Abstract) con una extensión máxima de 200 palabras.
- Al final tanto del resumen como del abstract debe agregarse entre tres (3) a cinco (5) palabras clave.

Los encabezamientos de cada sección se escriben tipo título, mayúsculas sólo en la primera letra.

citas

Las citas de referencias en el texto, contendrán el nombre del autor principal seguido de corchetes con el número correspondiente a la referencia, por ejemplo: Engelbrecht [11], o simplemente el número de la referencia bibliográfica [11], sin citar al autor.

Referencias

Para los artículos en L^AT_EX se usará el estilo de bibliografía “unsrt”.

Las referencias bibliográficas se escribirán en orden de citación, deben ser completas y contener todos y cada uno de los datos para identificarla.

Se pueden citar:

- Artículos de revistas.
- Artículos de memorias de congresos.
- Artículos en colecciones.

- Capítulos de libro.
- Memorias de congresos.
- Libros
- Tesis doctorales
- Trabajos especiales de grado.
- Informes técnicos.
- Manuales técnicos.

No se permiten direcciones electrónicas ni páginas web.

En el caso de artículos de revista contendrán:

- Autor(es) (Apellidos nombres, tipo título).
- Título.
- *Nombre de la revista,*
- volumen,
- número,
- páginas y
- año de publicación

Por ejemplo:

[9] A. Carucci, A. Chiavola, M. Majone, and E. Rolle. Treatment of tannery wastewater in a sequencing batch reactor. *Water Science and Technology*, 40(1):253–259, 1999.

[10] A. Méndez, A. Agüero, E. Manrique y C. Ovalles. Cambios en la composición química de crudos medianos en procesos térmicos de recuperación mejorada. *Revista Sociedad Venezolana de Química*, 24(2):24–35, 2001.

En caso de libros ha de incluirse: Autor(es), *título*, editorial, lugar de publicación y año de publicación.

Por ejemplo:

[11] A. Engelbrecht. *Fundamentals of computational swarm intelligence*. John Wiley & Sons, 1 edition, 2006.

En caso de colección editada: Autor(es). Título, En: editor, año, *título*, volumen, editorial, lugar,

número de páginas y año de publicación.

Por ejemplo:

[20] C. Cobos, H. Dulcey, J. Ortega, M. Mendoza, and A. Ordoñez. A Binary Fisherman Search Procedure for the 0/1 Knapsack Problem. In O. Luaces, J.A. Gámez, E. Barrenechea, A. Troncoso, M. Galar, H. Quintián, and E. Corchado, editors, *Advances in Artificial Intelligence*, pages 447–457, Cham, 2016. Springer International Publishing.

Se recomienda a los autores tener en cuenta las normas internacionales de nomenclatura para la utilización de símbolos, unidades y abreviaturas. Adicionalmente, el uso de coma (,) como separador decimal

Notas Finales

Los artículos serán sometidos al proceso de arbitraje, doble ciego por pares, previo a su publicación. Se podrán entregar separatas por tema a solicitud del autor, cuyo costo será a convenir

Authors Information

General

Editorial line

Revista INGENIERÍA UC will consider for publication original and unpublished contributions in engineering, in particular areas of industrial, electrical, mechanical, civil, chemical and telecommunications, and applied science.

Type of Manuscripts:

- a Unpublished research articles with a maximum length of twenty (20) pages.
- b Technical Notes, with a maximum of five (5) pages.
- c State of the Art Articles (Update Articles) of a specific engineering field (maximum of twenty (20) pages).
- d Articles sent by invited guests, maximum of twenty (20) pages.
- e Letter to Editor.
- f Technological trend articles, medium and long-term R & D + i prospective studies of high utility in the industrial field.

Submitting an article to Revista Ingeniería UC, the author is formally committed to the consigned paper is original and unpublished, he manifest his knowledge of Revista Ingeniería UC standards and that his work will be refereed.

Article Style

Articles may be sent either in Spanish or English. The original work should be written using \LaTeX or in Microsoft WORD.

The Microsoft WORD works must employ font of Times family, to be stored in compact

disk (CD) or send electronically by email to revistaing@uc.edu.ve.

The works in \LaTeX must include the files pdf, tex and a folder with the figure in eps.

The figures must be in gray scale, no color, preferable in format png or eps (also admit the formats CompuServe gif or jpg if these are of high quality) must to be added in records separated and numbered. Figures caption or descriptions can not be into these, must be includes in the text of the work and in a apart file called Figure Caption.

The table can not be protruded by any type of color. Only the texts to be produced by means of "bold type". Also must to be included in others files numerated and it is necessary to include a file with table caption.

All table and/or figure must be numbered in arabic (1, 2, 3, . . .) and cited in the text of the work. The quote would be in the manner: "In Figure 3", "in Table 2", for example (without abbreviating). All board or figure must have a wide maximum of 17,5cm.

The writing sequence for the articles shall be as following:

1. Title page.
2. Introduction.
3. Methodology or Research development.
4. Analysis and Discussion of results.
5. Conclusions.
6. References.

The Title page should contain:

- Title of the work in Spanish and English, maximum 20 words.
- Full name(s) of author(s) with Full Institutional Address(es) (Address, Telephone, Email).
- Summary of the work in Spanish and in English (Abstract) with a maximum of 200

words for Unpublished, State of the Art articles and Technical Notes.

- At the end of the Summary in Spanish and Abstract in English three to five (3 to 5) Key Words should be added.

Text references must contain the name of the main author followed by the corresponding number of reference; for example: Engelbrecht [11], or simply [11] with no author name.

For L^AT_EX work will use bibliography style “unsrt”.

References will be written in order of citation, complete and should contain: author(s) (in caps and lower case), full title, journal, volume, number, pages and year of publication. For example:

[9] A. Carucci, A. Chiavola, M. Majone, and E. Rolle. Treatment of tannery wastewater in a sequencing batch reactor. *Water Science and Technology*, 40(1):253–259, 1999.

[10] A. Méndez, A. Agüero, E. Manrique y C. Ovalles. Cambios en la composición química de crudos medianos en procesos térmicos de recuperación mejorada. *Revista Sociedad Venezolana de Química*, 24(2):24–35, 2001.

In the case of Books: Author(s) (in caps and lower case), *title*, publisher, place and year of publication should be included. For example:

[11] A. Engelbrecht. *Fundamentals of computational swarm intelligence*. John Wiley & Sons, 1 edition, 2006.

Work in an edited collection: Author(s) (in caps and lower case), title. In: editor, *title*, volume, publisher, place and year. For example:

[20] C. Cobos, H. Dulcey, J. Ortega, M. Mendoza, and A. Ordoñez. A Binary Fisherman Search Procedure for the 0/1 Knapsack Problem. In O. Luaces, J.A. Gámez, E. Barrenechea, A. Troncoso, M. Galar, H. Quintián, and E. Corchado, editors, *Advances in Artificial Intelligence*, pages 447–457, Cham, 2016. Springer International Publishing.

It is recommended to the authors to follow the International Nomenclature Norms (symbols, units

and abbreviations). Additionally, use comma(,) as decima separator.

Final Notes

Articles will be submitted for the reviewing process before they can be published. Offprints can be sent for article with a request from the Author(s). Any charge will be arranged by mutual agreement.

Carta de compromiso

Envíe junto con su trabajo la siguiente carta al Comité Editorial de Revista Ingeniería UC:

Ciudadanos
Director Editor en jefe y demás
Miembros del Comité Editorial
Revista INGENIERÍA UC
Presente.

Por medio de la presente envío a Ud.(s) el manuscrito del trabajo titulado:

para que sea sometido a evaluación para la publicación.

Manifiesto que:

Este trabajo es original e inédito: no ha sido publicado, no es duplicado, ni redundante; no está siendo sometido simultáneamente a arbitraje para su publicación por ningún medio de difusión, que los datos son originales y verídicos.

El autor y los coautores ceden los derechos de autor a la Revista INGENIERÍA UC, pero mantiene sus derechos como autor intelectual.

El trabajo, tanto en su texto como las tablas y figuras ha sido elaborado de acuerdo a las Instrucciones para los Autores publicadas por Revista INGENIERÍA UC, y que las referencias están directamente relacionadas con el trabajo.

Se designa como autor de correspondencia al autor o coautor que lo indique, con quien el Comité Editorial mantendrá comunicación a través del correo electrónico revistaing@uc.edu.ve, quien será responsable ante autores y coautores y dará respuesta rápida a los requerimientos del Comité Editorial.

No se conocen conflictos de intereses, y de haberlos los autores y coautores están obligados a indicarlo en el original, junto a la fuente de financiamiento.

Firma:

Nombre y apellido:

El autor para correspondencia:

Compromise letter

Send together with your paper the following letter to Editorial Committee:

Citizens
Director, Chief Editor and other
Members of Editorial Committee
Revista INGENIERÍA UC
Present.

I hereby send you the manuscript of the work entitled:

to be submitted for evaluation to publication.

I declare that:

This work is original and unpublished: it has not been published, it is not duplicated, nor redundant; it is not being simultaneously submitted to arbitration for publication by any diffusion means, that the data are original and truthful.

The author and coauthors assign the copyright to Revista INGENIERÍA UC, but maintains their rights as an intellectual author.

The work, in its text as the tables and figures has been elaborated according to the Authors Instructions published by Revista INGENIERÍA UC, and that the references are directly related to the work.

The author or coauthor who indicates it is designated as correspondence author, with whom Editorial Committee will maintain communication via email revistaing@uc.edu.ve, who will be responsible for the authors and co-authors, and will respond quickly to the requirements of the Editorial Committee.

There are no known interest conflicts, and if there are the authors and coauthors are obliged to indicate in the original, next to funding source.

Signature:

First name and surname:

Correspondence author:

Índices de Revista Ingeniería UC

Revista Ingeniería UC está indizada en:



Universidad de Carabobo

Autoridades

Jessy Divo de Romero

Rectora

Ulises Rojas

Vicerrector Académico

José Ángel Ferreira

Vicerrector Administrativo

Pablo Aure

Secretario

Reimer Romero

Director Ejecutivo (e) CDCH-UC

Autoridades de la Facultad de Ingeniería

Prof. José Luis Nazar

Decano

Prof.^a Carmen Guédez
Directora Esc. Ing. Industrial

Prof. Manuel Elías Jiménez Bahri
Asistente al Decano

Prof. Reny Marin
Director Consejo Facultad

Prof. César Rodolfo Ruiz
Director Esc. Ing. Eléctrica

Prof. Carlos Brito
Director de Asuntos Estudiantiles

Prof.^a Marianna Barrios León
Directora de Postgrado

Prof. Carlos R. Alfonzo A.
Director Esc. Ing. Mecánica

Prof. Edson Martínez Oberto
Director Esc. Ing. Civil

Prof. Luis E. Di Stefano
Director de Administración

Prof. Carlos Hernández
Director Esc. Ing. Química

Prof. Carlos Cochiarella
Director de Asuntos Profesorales

Prof. Pablo Baricelli
Director del Centro de Investigaciones
Químicas

Prof. Ángel D. Almarza M.
Director de Investigación y Producción
Intelectual

Prof.^a María Teresa Cruz
Directora de Docencia y Desarrollo Curri-
cular

Prof. César O. Seijas Fossi
Director del Centro de Procesamiento de
Imágenes

Prof. César Cuperto Ruiz P.
Director Esc. Ing. de Telecomunicaciones

Prof.^a Lin Hurtado
Directora Estudios Básicos

Prof.^a Marlin Gómez
Directora de Extensión

Prof. Jesús J. Jiménez Grimán
Director del Instituto de Matemática y
Cálculo Aplicado

Prof. David E. Duarte G.
Director de Tecnologías de la Información y
Comunicación

REVISTA INGENIERÍA UC

La Revista Ingeniería UC es una publicación periódica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, adscrita a la Dirección de Investigación. Es arbitrada, indizada en REVENCYT (Venezuela) ; Actualidad Iberoamericana (CIT-Chile); IET/INSPEC (Unitec Kingdom UK); LATIDEX-Catálogo (México); REDALYC (México); Periódica (México) y está incluida en Ulrich's International Periodical Directory (USA), de Publicación Internacional; Emerging Sources Citation Index, Thomson Reuters.

Se publica cada cuatro meses bajo los auspicios del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo (CDCH-UC). Se aceptan trabajos en Castellano e Inglés. Todos los trabajos son revisados por el Comité Editorial, Arbitrados por el Comité Técnico y por especialistas en la materia.

Dirección postal: Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Bárbula-Valencia, Código Postal 2008, estado Carabobo, Venezuela.

Correo-e: revistaing@uc.edu.ve

Correo-e: revistaing@gmail.com

Página Web: <http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/>; <https://www.redalyc.org/revista.oa?id=707/>

Revista Ingeniería UC, ISSN 1316–6832
Agosto 2019, Volumen 26
Número 1 y 2

Revista Ingeniería UC se encuentra indizada en:
Revencyt (Venezuela) – índice de revistas venezolanas de ciencia y tecnología;
Actualidad Iberoamericana (Chile) CIT;
IET/INSPEC (United Kingdom); Latindex (México); Redalyc (México);
Periódica (México);
Emerging Sources Citation Index, Thomson Reuters.

Contenido general: páginas V y IX.



Revista INGENIERÍA UC
Impreso en Publicaciones de la
Facultad de Ingeniería de la
Universidad de Carabobo,
Campus de Bárbula,
Venezuela