

Revista de



TECNOLÓGICO

RIDTEC | Vol. 13, N.º 2, julio - diciembre 2017

P-ISSN 1680-8894

E-ISSN 2219-6714

Edición Semestral
Publicación Regional

Revista indexada en



Repositorio Centroamericano SIIDCA



Director del Comité Editorial

Dra. Deyka García
Dirección de Investigación, UTP¹

Miembros

Dr. Carlos Medina,
Facultad de Ingeniería Eléctrica, UTP¹

M.Sc. Julio Mario Daza Escorcía
Docente Investigador² y Estudiante Doctorando³

M.Sc. Jesús Javier Alcantar Peña
Asistente de Investigación⁴

Dr. Frederick Wittel
Docente Administrador⁵

Dr. David Álvarez
Docente Investigador⁶

Afiliaciones

1. Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.
2. Politécnico de la Costa Atlántica, Colombia.
3. Universidad de Valencia, España.
4. Universidad de Texas en Dallas, Estados Unidos.
5. Assoc. Dean of Math, Science, & Health Professions at Richland College, Dallas, Estados Unidos.
6. Universidad de Los Andes - Bogotá, Colombia.

La Revista de I+D Tecnológico (RIDTEC) es una revista indexada abierta (OA) con publicación semestral de la Universidad Tecnológica de Panamá, especializada en las áreas de las ciencias básicas e ingeniería y otras áreas del conocimiento.

Actualmente, la RIDTEC forma parte del Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal (LATINDEX), y The European Reference Index for the Humanities and the Social Sciences (ERIH PLUS).

Cada artículo es evaluado mediante el método de "revisión por pares" para conocer su calidad técnica, la originalidad, la contribución científica, entre otros criterios relevantes. La revisión por pares se rige por el método de "doble ciego" para garantizar un proceso de evaluación libre de sesgo o conflicto de interés.



Ing. Libia Batista
Directora

Licda. Sandra Siebert
Sr. Armando Pinillo
Mercadeo y Ventas

Sección de Diseño Gráfico
Diseño y diagramación

Licdo. Rafael Saturno
Idea y diseño original de la portada

Licda. Klenya Morales
Corrección de estilo

Lic. Huriviades Calderón
Coordinación y logística
Dirección de Investigación, UTP.

Escribir en I+D Tecnológico
<http://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico>

Plataforma para la Recepción de Artículos
<http://www.redinvestigadores.utp.ac.pa/revista+D/openconf/openconf.php>

© Derechos reservados, UTP

Impreso en Panamá, Ciudad de Panamá
Imprenta de la Universidad Tecnológica de Panamá
Tiraje: 300 ejemplares.

resentación

La Universidad Tecnológica de Panamá se complace en presentar a la comunidad científica en general su segunda edición del año 2017 de la Revista I+D Tecnológico, correspondiente al volumen 13 número 2. En esta edición se han incluido trabajos de gran interés, actualizados y variados en las áreas de Procesos de Manufactura y Ciencia de los Materiales, Ciencias Naturales y Ciencias Exactas, Energías Renovables Convencionales y no Convencionales y Ambiente, Ciencias de la Tierra, Recursos Hídricos y Cambio Climático, Innovación, Logística y Transporte, Robótica, Automatización e Inteligencia Artificial y en el área de Tecnologías de la Información y Comunicación.

En el área de Procesos de Manufactura y Ciencia de los Materiales López-Martínez, E. et. al. presentan una formulación Lagrangiana en 2D en estado inestable para modelar la transferencia de calor durante la solidificación en el proceso de colada. El modelo fue simplificado mediante la utilización del concepto de conductividad térmica efectiva en la fase líquida modelada como sólido. El modelo utiliza diferencias finitas implícito de dirección alternante como método de solución y el mismo fue verificado y validado comparando la solución analítica y los resultados experimentales.

En el área de Ciencias Naturales y Ciencias Exactas Tuñón, A. y Diallo, A. presentan un modelo simple de Iteración Bosónico 2 (IBM-2) utilizando el Spin-F para estimar las masas de núcleos semi-pesados par-par en la región $50 \leq Z \leq 82$, $82 \leq N \leq 126$ con resultados bastante precisos para toda la región por lo que emplear este método para el caso de otros núcleos lejos de la línea de estabilidad se aprecia con optimismo.

El artículo presentado por Venegas V., D. et. al. en el área de Energías Renovables Convencionales y no Convencionales y Ambiente tiene como objetivo plantear señalamientos sobre los incumplimientos con los lineamientos mínimos establecidos en normas nacionales e internacionales con respecto a las instalaciones de almacenamiento y transporte del gas licuado de petróleo en Panamá. También se presentan algunas recomendaciones con la finalidad de mejorar la

seguridad y reducir el riesgo que genera el manejo de estos sistemas.

De León O., R. y Fábrega, J. presentan el modelo CALPUFF, recomendado por la EPA para recorridos mayores de 50 km con cambios de cobertura, para modelar la dispersión y el transporte de óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre emitidos por la Planta Termoeléctrica de Miraflores. Este modelo requiere de datos continuos en tiempo y espacio para generar resultados válidos por lo que se recurre al modelo meteorológico WRF por la falta de cobertura en estaciones meteorológicas superficiales. Los resultados generan puntos de concentración promedio que arrojan buenos índices de calidad del aire. Abud, J. y colaboradores presentan un estudio sobre los flujos de agua que llevan partículas sólidas y sustancias químicas en el área de descarga que sirve como cuerpo receptor del afluente industrial generado en la planta de alúmina de la empresa Bauxilum, Guayana, Venezuela. Para el estudio se tomaron muestras de suelo y realizaron pruebas de granulometría y química a fin de determinar el tipo de suelo SC o arenoso con tamaños de partículas uniformes, arcillas inorgánicas de baja plasticidad y material gravoso y altamente alcalinos con altas concentraciones de sodio, aluminio lo que indica un gran potencial de afectación de contaminación ambiental para el área.

También en el área de Ciencias de la Tierra el trabajo de Serrano, E.Z. y colaboradores presentan un estudio que precisa cuantificar la cantidad de CO_2 que fluye en el suelo de una parcela en un bosque tropical húmedo, en Cerro Pelado, Gamboa, dentro de la Cuenca del Canal de Panamá con 21 puntos de muestreo. Para este estudio se midieron, además, la temperatura, porcentaje de humedad de suelo, intensidad lumínica y pendiente. Los resultados muestran que la temperatura y la humedad ejercen un control significativo sobre la emisión de este gas hacia la atmósfera.

Calvo G., L. E. y Colonna R., P.C presentan un modelo de elementos finitos no-hidroestático integrado en la profundidad con elementos cuadrilaterales cuadráticos para la aproximación de las velocidades horizontales y

elementos cuadrilaterales lineales para la aproximación de las elevaciones de la superficie del agua y las presiones no hidrostáticas. El mismo es verificado con una solución analítica y validado usando datos experimentales.

En el área de Innovación, Logística y Transporte, Rodríguez L., M.G., et. al. Describen en su trabajo como las herramientas de análisis e inteligencia de negocios aportan al rendimiento empresarial fijando los indicadores claves de desempeño (KPI) para aclarar los objetivos organizacionales previa realización de un sondeo local de alta confianza con una mayor efectividad si se enfoca al desarrollo de nuevas alternativas con servicios diferenciados e innovadores. Para el estudio se indagaron 81 empresas pequeñas de nivel medio para evaluar distribución geográfica de clientes, fuerza de ventas, tasa de consumo de productos más y menos vendidos, satisfacción de clientes, productos nocivos para el medio ambiente, entre otros, y se representa cómo medir algunos de ellos.

En esta misma área, Fossati C., A. y Batista, D. presentan un análisis econométrico cuantitativo serie de tiempo (ARIMA) para la generación de patentes PCT por millón de habitantes en los últimos diez años, en comparación a otros países evaluados como USA e Israel, así como también una regresión lineal para analizar la disponibilidad de científicos e ingenieros en Panamá. El resultado obtenido indica que seguir planificando con el comportamiento de estas variables de patentes no ayudará a elevar el índice de innovación en Panamá.

Además, Abad A., I. C., junto a sus colaboradores presentan una metodología estructurada que determina, las ecocompetencias en gestión empresarial que requieren los microempresarios, ubicados en la isla San Cristóbal, el el Archipiélago de Galápagos, Ecuador. La técnica de recolección de datos fue la encuesta diseñada *ad hoc* que constó de 46 bloques de preguntas, con una muestra de 230 personas, una por cada microempresa. Para el procesamiento y análisis estadístico se utilizó el *software* SPSS versión 23. Los resultados determinaron las ecocompetencias empresariales, o variables de desarrollo sostenible y las variables de competencias empresariales que requieren utilizar para alcanzar el desarrollo económico, social y ambiental sostenible en sus empresas.

En el área de Robótica, Automatización e Inteligencia Artificial Chérigo, C. y Rodríguez, H. evalúan y comparan tres algoritmos de procesamiento de datos más usados en sistemas de referencia de orientación y

rumbo (AHRS, por sus siglas en inglés), en vehículos aéreos no tripulados (UAVs, por sus siglas en inglés) los cuales implementan procesos de filtrado y de fusión de datos para determinar que se adapta mejor a sistemas con diferentes características. Entre el Filtro de Kalman, el de Mahony y el de Madgwick el algoritmo que mejor funcionó es el filtro complementario de Robert Mahony debido a su mayor velocidad de convergencia.

Las autores Collado, E y Sáez, Y. a través del presente artículo, desarrollan estrategias que permiten obtener valores óptimos de parámetros relevantes en la interpretación de los *bits* de la clave mientras se asegura que los errores se mantengan dentro de los valores aceptables. Los resultados muestran que las técnicas permiten manejar eficientemente los recursos del sistema al utilizar valores óptimos de los parámetros importantes en el análisis de error y también aseguran que los errores se mantengan dentro de valores aceptables.

Finalmente, y también en área de Tecnologías de la Información y Comunicación los autores Jara Obregón, L., Ferruzola Gómez, E y Rodríguez López, G. muestran la conceptualización de los principales delitos, que se cometen comúnmente al utilizar las redes sociales. Se enfoca el estudio en Facebook por ser considerada la red social con mayor número de usuarios. Se investigó sobre el marco jurídico y se consultó el Código Penal de Ecuador para verificar la existencia de un marco legal que penalice comportamientos antijurídicos en las redes sociales. Se emplearon entrevistas y encuestas para determinar procesos actuales empleados en este tipo de delitos con resultados que se contraponen a la realidad.

Se hace extensiva una cordial invitación a todos los autores de las ciencias básicas e ingeniería y otras áreas del conocimiento, para compartir por este medio sus publicaciones de investigación de las diversas áreas temáticas de la revista en beneficio del fortalecimiento de la gestión y desarrollo de proyectos de I+D .

Dra. Deyka García
Directora del Comité Editorial
Octubre de 2017

Contenido

5

Análisis de sensibilidad de los parámetros que afectan al espesor de la capa solidificada en el proceso de colada continua de aceros

Sensitivity analysis of parameters affecting the thickness of the solidified layer in the continuous casting process of steels

Edgar López-Martínez | Octavio Vázquez-Gómez | Gaspar R. León-Gil

15

Determinación de masas de núcleos pesados a partir del Spin -F

Heavy nuclei mass calculation using F- Spin

Armando Tuñón | Abdoulaye Diallo

22

Manejo inseguro del gas licuado de petróleo en Panamá

Unsafe handling of liquefied petroleum gas in Panama

Diego Venegas Vásconez | Marisol Arrocha Carrera | Santiago Celi Ortega Juan Rocha Hoyos | Cesar Ayabaca Sarria Euro Mena Mena

31

Modelado CALPUFF-WRF de la dispersión de PM_x, NO_x y SO₂ emitidos por la Termoeléctrica de Miraflores en el Canal de Panamá

Modeling CALPUFF-WRF of the dispersion of PM_x, NO_x and SO₂ emitted by the Thermoelectric of Miraflores in the Panama Canal

Ricardo De León Ortega | José Fábrega

41

Caracterización del efluente en el proceso de transformación de bauxita a alúmina en la empresa Corporación Venezolana de Guayana - Bauxilum, Ciudad Guayana, Venezuela

Characterization of the effluent in the transformation process of bauxite to alumina at the company Corporación Venezolana de Guayana - Bauxilum, Ciudad Guayana, Venezuela

Jorge Abud | Luis Araya | Jessica López

50

Respiración de dióxido de carbono de suelo, en bosque tropical húmedo - Gamboa Panamá

Carbon Dioxide Soil Respiration in a Tropical Rainforest - Gamboa, Panama

Eny Zahily Serran | María Nuñez | Erick Valleter

56

Modelo de Elementos Finitos No-Hidrostático Integrado en la Vertical para la Propagación de Olas

Depth Integrated Non Hydrostatic Finite Element Model for Wave Propagation

Lucas E. Calvo Gobbetti | Paulo C. Colonna Rosman

67

Análisis e inteligencia de negocios con evaluación de indicadores claves de desempeño

Analysis and business intelligence with evaluation of key performance indicators

Manuel Guillermo Rodríguez López | Flor Isabel Salazar Vázquez | Luis Stalin Jara Obregón

Contenido

76

Análisis de la generación de patentes de invención, disponibilidad de ingenieros en Panamá y su relación con el índice de innovación

Analysis of the generation of invention patents, availability of engineers in Panamá

Aníbal Fossatti Carrillo | Delva Batista

82

Ecocompetencias en gestión empresarial en el Archipiélago de Galápagos, Ecuador
Ecocompetences in business management in the Galapagos Archipelago, Ecuador

Inova Candy Abad Arévalo | Juan Carlos López Gutiérrez | Fermín Ferriol Sánchez | Alina Pascual Barrera

91

Evaluación de algoritmos de fusión de datos para estimación de la orientación de vehículos aéreos no tripulados

Evaluation of data fusion algorithms for attitude estimation of unmanned aerial vehicles

Cristóbal Chérigo | Humberto Rodríguez

101

Optimización aplicada al sistema de intercambio de clave segura KLJN con garantía de error máximo fijo

Optimization applied to the KLJN secure key exchange system with maximum fixed error guarantee

Edwin Collado | Yessica Sáez

122

Delitos a través redes sociales en el Ecuador: una aproximación a su estudio

Crimes through social networking sites in Ecuador: an approach to their study

Luis Jara Obregón | Enrique Ferruzola Gomez | Guillermo Rodríguez López

Revista indexada en:



www.latindex.unam.mx

Análisis de sensibilidad de los parámetros que afectan al espesor de la capa solidificada en el proceso de colada continua de aceros

Sensitivity analysis of parameters affecting the thickness of the solidified layer in the continuous casting process of steels

Edgar López-Martínez^{1*}, Octavio Vázquez-Gómez^{2,3}, Gaspar R. León-Gil⁴

¹ Campus Tehuantepec, Universidad del Istmo, ² Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, ³ División de Estudios de Postgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Morelia, ⁴ Campus Tehuantepec, Universidad del Istmo
¹ lopeze@sandunga.unistmo.edu.mx, ^{2,3} ovazquezgo@conacyt.mx, ⁴ leon.gil.gaspar@gmail.com

Resumen– Se realizó un análisis de sensibilidad del efecto del flujo de calor, la temperatura y velocidad de colada en la estimación del espesor de la capa solidificada en el proceso de colada continua. Debido a las dificultades experimentales para la determinación de este espesor, se formuló un modelo matemático de la transferencia de calor durante la solidificación, el cual consistió en una formulación Lagrangiana en 2D en estado inestable. Para simplificar la solución, se utilizó el concepto de conductividad térmica efectiva en la fase líquida, con lo que esta fase fue modelada como si se tratara de un sólido. La solución del modelo se llevó a cabo numéricamente con el método de diferencias finitas implícito de dirección alternante. El modelo fue verificado y validado mediante la comparación de una solución analítica y con resultados experimentales obtenidos de la literatura respectivamente. Se observó que a diferentes temperaturas de colada es posible obtener un espesor de la capa solidificada similar a la salida del molde.

Palabras claves– Flujo de calor, método de diferencias finitas implícito de dirección alternante, solidificación.

Abstract– A sensitivity analysis of the effect of the heat flow, casting temperature and casting rate in estimating the thickness of the solidified layer in the continuous casting was performed. Due to experimental difficulties for determining this thickness, a mathematical model of heat transfer during solidification, which consisted of a Lagrangian formulation in unstable state 2D was formulated. To simplify the solution, the concept of effective thermal conductivity was used in the liquid phase, so this phase was modeled as if it were a solid. With the alternating direction implicit method, the solution was obtained. The model was verified and validated by comparing the analytical solution and experimental results from the literature respectively. It was observed that with different casting temperatures, it is possible obtain a solidified layer similar to the mold outlet.

Keywords– Heat flow, finite difference alternating direction implicit method, solidification.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 4 de julio de 2017

Fecha de Aceptación: 25 de septiembre de 2017

1. Introducción

Durante su proceso de fabricación, la mayoría de los componentes metalúrgicos-mecánicos pasan por una fase de solidificación, aun aquellos componentes fabricados por procesos de conformado mecánico. Se sabe que el comportamiento durante la fabricación o en servicio de estos componentes muchas veces está influenciado por el proceso de solidificación. Características como tamaño de grano, porosidades, segregación, esfuerzos residuales, distorsión y demás, se

pueden generar y/o ser controlados durante esta etapa. En particular, en el proceso de colada continua, la solidificación se presenta en las paredes del molde (figura 1), produciéndose una capa solidificada. En el análisis del proceso de colada continua es importante examinar cómo afectan las variables del proceso en el espesor de la capa solidificada, ya que si ésta no presenta un espesor mínimo, podría llegar a romperse, llevando a un paro del proceso con las subsiguientes pérdidas económicas [1]. Las variables más importantes

para controlar el espesor de esta capa son el flujo de calor entre la capa solidificada y el molde, la temperatura de colada y la velocidad de colada. Modificando estas variables, por ejemplo maximizando el flujo de calor, y minimizando la temperatura y velocidad de colada, se podría asegurar un espesor suficiente de la capa solidificada, pero esto traería consigo la disminución de la productividad. Por esta razón, el objetivo de este trabajo es determinar la influencia del flujo de calor, la temperatura y velocidad de colada en el espesor de la capa solidificada que sale del molde. Para estimar o determinar este espesor, se pueden realizar mediciones directamente en planta [2], variando la temperatura y velocidad de colada y midiendo el perfil de temperaturas en el molde, pero esto resulta muy poco viable debido al número de pruebas que se necesitan realizar, a las dificultades en el diseño experimental para determinar el espesor y a las dificultades técnicas y económicas. Debido a que no es posible realizar mediciones en laboratorio que representen al proceso, y que un modelo físico no es posible, la otra forma de estudiar el comportamiento es mediante la formulación de un modelo matemático [3-5].

Los modelos matemáticos son una poderosa herramienta en el análisis, diseño y optimización de procesos metalúrgicos. Estos procesos suelen desarrollarse en un régimen no permanente, en donde las propiedades termofísicas y parámetros del proceso son función de la temperatura y de otras variables. Generalmente los procesos metalúrgicos son descritos por ecuaciones diferenciales parciales, las cuales necesitan ser resueltas con sus respectivas condiciones de frontera para poder analizar el efecto de las variables independientes. A causa de la no linealidad de la formulación matemática de estos procesos, no es posible obtener una solución analítica de las ecuaciones diferenciales, por lo que se vuelve necesario implementar un método numérico de solución. Sin duda se tendrán que realizar mediciones en planta para poder validar el modelo y para obtener las condiciones de frontera, pero una vez que se ha hecho esto, las variables que controlan el proceso pueden ser estudiadas para analizar su efecto sobre el comportamiento de la colada continua.

Uno de los parámetros más importantes a considerar en la modelación matemática del proceso de colada

continua, es la correcta estimación de las condiciones de frontera, en especial la frontera entre la superficie de la capa solidificada y el molde, la cual suele ser caracterizada con la estimación de un coeficiente global de transferencia de calor. Esto se debe a que el acero se contrae durante la solidificación, por lo que hay un contacto entre la capa solidificada y el molde. Con esto, en esta frontera, los mecanismos que gobiernan la transferencia de calor son los de convección y radiación. Existen muchas dificultades para la correcta estimación de este coeficiente, en donde se sabe que no puede ser considerado constante, ya que varía a lo largo del molde [6].

Un análisis de sensibilidad se puede realizar para determinar el efecto de los parámetros del proceso o para determinar el efecto de la adecuada estimación de las propiedades térmicas [7, 8]. En este trabajo se decidió la formulación de un modelo matemático para realizar un análisis de sensibilidad del flujo de calor, temperatura y velocidad de colada en la estimación del espesor de la capa solidificada en la colada continua.

2. Formulación matemática

En el proceso de colada continua, acero líquido fluye a través de un molde de cobre enfriado con agua, en donde debido a la extracción de calor que se presenta, se desarrolla una capa solidificada que crece en espesor en la dirección perpendicular a la superficie del molde (figura 1). Dependiendo del punto de vista, el proceso puede ser analizado en estado estable o inestable. Si en una posición dada se analiza como cambia la temperatura en función del tiempo, se tratará de un problema en estado inestable. Por el contrario, si se analiza como cambia la temperatura en función de la posición en la dirección z , se trata de un problema de estado estable.

2.1 Definición del sistema

La formulación matemática en estado estable, corresponde a una formulación Euleriana, y en estado inestable corresponde a una formulación Lagrangiana. Debido a las dificultades en la obtención de las condiciones a la frontera en estado estable, se decidió utilizar una formulación Lagrangiana en dos dimensiones en el plano xy . La figura 2 muestra el sistema bajo estudio. Este sistema presenta simetría, por

lo que es conveniente modelar solo una cuarta parte del sistema.

Para resolver el problema, se hacen las siguientes suposiciones:

1. La temperatura de colada (temperatura inicial) es uniforme en todo el sistema.
2. Se ignora la conducción de calor en la dirección z , debido a que su magnitud es mucho menor en comparación con la conducción en las direcciones x e y .
3. Se desprecian los efectos de convección en la fase líquida.
4. Las propiedades térmicas son función de la temperatura.
5. El coeficiente de transferencia de calor global es función del tiempo de morada (t_M) en el molde.

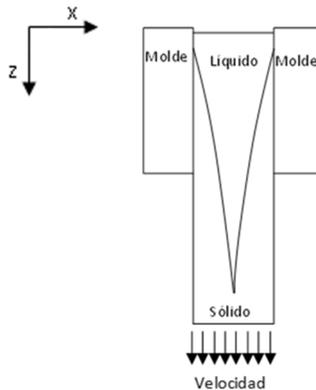


Figura 1. Esquema de la colada continua.

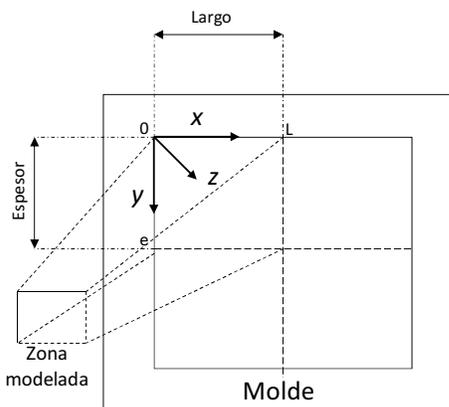


Figura 2. Definición del sistema bajo estudio.

2.2 Balance

Usando el método de la entalpía [9] y bajo las consideraciones dadas, la ecuación (1) define al sistema en estado inestable:

$$\rho \left(\frac{\partial H}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

donde ρ es la densidad, k la conductividad térmica, y H la entalpía. Debido a que se desprecian los efectos convectivos en el líquido, la conductividad térmica se puede determinar como una combinación lineal entre las conductividades térmicas del sólido (k_s) y del líquido (k_l):

$$k = (1 - g)k_s + gk_l \quad (2)$$

donde g es la fracción de líquido. La entalpía se determina como:

$$H = (1 - g)Cp_s(T - T_{ref}) + gCp_l(T - T_{ref}) + gH_L \quad (3)$$

donde k_s , k_l , Cp_s y Cp_l son las conductividades térmicas y capacidades caloríficas de las fases sólida y líquida respectivamente, H_L es el calor latente de solidificación y T_{ref} es una temperatura de referencia.

Las condiciones de frontera e inicial son:

Condición de frontera 1: En $x = 0$, el flujo de calor por conducción que llega a la frontera es el que se transfiere por convección para cualquier posición y :

$$-k \frac{\partial T(0, y, t)}{\partial x} = -h_w (T - T_\infty) \quad (4a)$$

donde h_w es el coeficiente de transferencia de calor global entre la superficie de la capa solidificada y el molde.

Condición de frontera 2: En $y = 0$ el flujo de calor por conducción que llega a la frontera es el que se transfiere por convección para cualquier posición x :

$$-k \frac{\partial T(x, 0, t)}{\partial y} = -h_N (T - T_\infty) \quad (4b)$$

donde h_N es el coeficiente de transferencia de calor global entre la superficie de la capa solidificada y el molde ($h_w = h_N$).

Condición de frontera 3: En $x = L$ no existe transferencia de calor a través de la frontera debido a la

simetría del sistema (frontera aislada) para cualquier posición y :

$$-k \frac{\partial T(L, y, t)}{\partial x} = 0 \quad (4c)$$

Condición de frontera 4: En $y=e$ (donde e es el espesor, ver figura 2) no existe transferencia de calor a través de la frontera debido a la simetría del sistema (frontera aislada) para cualquier posición x :

$$-k \frac{\partial T(x, e, t)}{\partial y} = 0 \quad (4d)$$

Condición inicial: La temperatura inicial del sistema es uniforme para cualquier posición (temperatura de colada):

$$T(x, y, 0) = T_0 \quad (4e)$$

Con esto, la formulación matemática queda totalmente definida.

3. Solución

Se obtuvieron dos soluciones de la ecuación (1), 1) una solución numérica y 2) una solución analítica, con ciertas suposiciones, para verificar la consistencia de la primera solución.

3.1 Solución numérica

La ecuación (1) no se puede resolver analíticamente, por lo que se requiere de un método numérico. El método que se seleccionó es el de diferencias finitas implícito de dirección alternante [10]. Este método consiste en discretizar el sistema y realizar un balance de energía dentro de un volumen de control. En la mitad de un tiempo dado, el balance se realiza explícitamente en una dirección e implícitamente en la otra, y en la siguiente mitad de tiempo los balances se realizan ahora explícitamente los que primeramente se realizaron implícitamente y viceversa. La figura 3 muestra la discretización del sistema, en donde se puede apreciar que se necesitan nueve ecuaciones de diferencias finitas diferentes para la descripción completa del sistema.

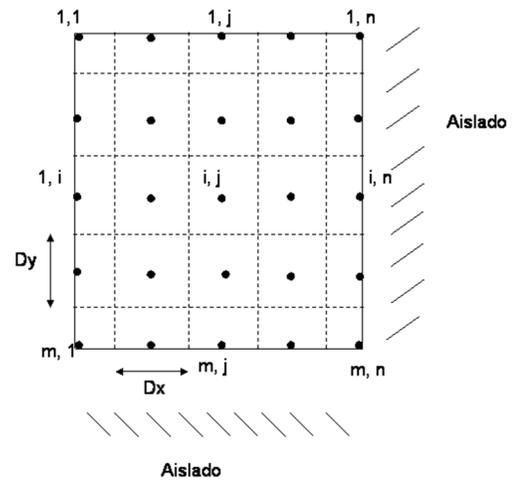


Figura 3. Discretización del sistema.

La obtención de las ecuaciones se realiza por medio de un balance de energía en cada volumen de control del sistema. Para los nodos internos (i, j) , realizando balances explícitos en la dirección y e implícitos en la dirección x , el balance total queda como:

$$\begin{aligned} & -k_N \frac{(T_{i,j}^p - T_N^p) A_N}{\Delta y} - k_S \frac{(T_{i,j}^p - T_S^p) A_S}{\Delta y} \\ & -k_W \frac{(T_{i,j}^{p+1/2} - T_W^{p+1/2}) A_W}{\Delta x} - k_E \frac{(T_{i,j}^{p+1/2} - T_E^{p+1/2}) A_E}{\Delta x} \quad (5) \\ & = \rho V_{i,j} \frac{(H_{i,j}^{p+1/2} - H_{i,j}^p)}{\Delta t/2} \end{aligned}$$

reordenando, se tiene:

$$\begin{aligned} & H_{i,j}^{p+1/2} + \left(\frac{k_{EP} A_E \Delta t}{2V_{i,j} \rho \Delta x} + \frac{k_{WP} A_W \Delta t}{2V_{i,j} \rho \Delta x} \right) T_{i,j}^{p+1/2} \\ & - \frac{k_{EP} A_E \Delta t}{2V_{i,j} \rho \Delta x} T_E^{p+1/2} - \frac{k_{WP} A_W \Delta t}{2V_{i,j} \rho \Delta x} T_W^{p+1/2} \quad (6) \\ & = H_{i,j}^p - \left(\frac{k_{SP} A_S \Delta t}{2V_{i,j} \rho \Delta y} + \frac{k_{NP} A_N \Delta t}{2V_{i,j} \rho \Delta y} \right) T_{i,j}^p \\ & + \frac{k_{SP} A_S \Delta t}{2V_{i,j} \rho \Delta y} T_S^p + \frac{k_{NP} A_N \Delta t}{2V_{i,j} \rho \Delta y} T_N^p \end{aligned}$$

Para un tiempo dado (p) , el valor del lado derecho de la ecuación (6) es conocido, y del lado izquierdo solo se desconoce las entalpías y temperaturas a la mitad del

tiempo siguiente ($p+1/2$), por lo que al realizar todos los balances en los volúmenes de control y reordenando, estas ecuaciones se pueden presentar en la forma compacta:

$$[A]\{B_{i,j}^{p+1/2}\} = \{d_{i,j}\} \quad (7)$$

donde la matriz $[A]$ contiene los coeficientes que multiplican al vector de variables desconocidas $\{B_{i,j}^{p+1/2}\}$, y el vector $\{d_{i,j}\}$ representa a los términos conocidos del lado derecho del sistema de ecuaciones. En total se obtiene un sistema de $m*n$ ecuaciones simultáneas, donde m y n son el número de nodos en las direcciones y y x respectivamente.

3.2 Solución analítica

Como ya se mencionó, la ecuación (1) no puede resolverse analíticamente; sin embargo, para verificar la solución numérica, se requiere de una solución analítica. Para poder obtener una solución analítica, se asumen ciertas simplificaciones, las cuales consisten en:

1. Aislar la frontera norte para convertir el problema de 2D a 1D.
2. Aumentar el largo del molde lo suficientemente como para que el centro del molde no cambie de temperatura durante el proceso, es decir, convertir al sistema en un sistema semi-infinito.
3. Asumir que la condición a la frontera entre el molde y la capa solidificada es del tipo Dirichlet tomando el valor de la temperatura del molde (T_{sup}).
4. Las propiedades termofísicas no son función de la temperatura.

Con estas suposiciones, la ecuación (1) puede ser resuelta analíticamente, obteniendo la solución para un sólido semi-infinito:

$$\frac{(T - T_{sup})}{(T_0 - T_{sup})} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (8)$$

Con esta solución de la ecuación (1) se puede calcular el perfil térmico en cualquier posición en cualquier tiempo dentro del sistema.

4. Verificación

Para poder verificar la solución numérica, se obtuvieron resultados con suposiciones similares a la solución analítica, las cuales consistieron en:

1. Se aisló la frontera norte, es decir el coeficiente de transferencia de calor global, h_N , se igualó a cero, con lo que la condición de frontera 2 quedó como:

$$-k \frac{\partial T(x,0,t)}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

2. El coeficiente de transferencia de calor global en el oeste, h_W , se le dio un valor muy “grande” con el propósito de hacer que durante la simulación, la temperatura de la superficie de la capa solidificada baje casi inmediatamente hasta la temperatura del molde.

3. Las propiedades termofísicas fueron asumidas para tomar un valor constante a lo largo de todo el proceso.

4. Se aseguró que la temperatura del centro se mantuviera a la temperatura de colada, la cual es una condición necesaria para que se pueda tratar de un sólido semi-infinito.

La figura 4 muestra la respuesta térmica obtenida numéricamente con las simplificaciones antes mencionadas y se compara con la solución analítica obtenida con la ecuación (8). Se observa que las dos soluciones son semejantes, con lo que se puede decir que la solución numérica es consistente y por lo tanto queda verificada.

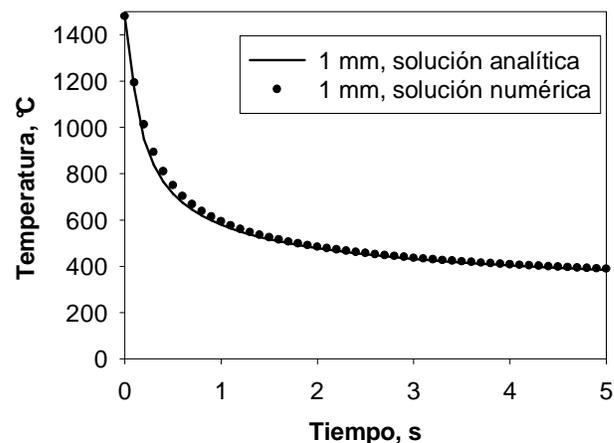


Figura 4. Comparación de las respuestas térmicas obtenidas mediante solución analítica y solución numérica. Las respuestas térmicas corresponden a una posición de 1 mm desde la superficie del molde.

5. Validación

Aunque el modelo ha sido verificado, aún no se sabe si las simplificaciones que se hicieron para su construcción son lo suficientemente fuertes como para que los resultados se alejen de la realidad. La manera de saberlo es comparar directamente los resultados numéricos con resultados experimentales obtenidos en planta. La figura 5 muestra mediciones del espesor de la capa solidificada obtenidas experimentalmente en la zona del molde [11], junto con los resultados simulados para el espesor y la temperatura de la superficie de la capa solidificada. Los parámetros utilizados para la simulación se presentan en la tabla 1. La simulación se llevó a cabo como si se tratase de un problema unidimensional como en el caso de la verificación. Se puede observar que los resultados experimentales concuerdan aceptablemente con los simulados, por lo que se puede decir que el modelo fue validado.

6. Análisis de sensibilidad

Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad con el fin de examinar la influencia de algunas variables del proceso de colada continua. Las variables que se analizaron fueron 1) flujo de calor, 2) temperatura de colada y 3) velocidad de colada. El análisis del flujo de calor se realizó con el fin de examinar la influencia de los mecanismos de transferencia de calor por convección y radiación entre la superficie de la capa solidificada y el molde, debido a que una inadecuada estimación de esta condición de frontera puede subestimar o sobre estimar este espesor [12], además porque la caracterización de la transferencia de calor en esta zona, lleva a la estimación de un coeficiente de transferencia de calor global, en donde se sabe que no siempre es posible obtener una buena estimación de este para una misma máquina de colada [11].

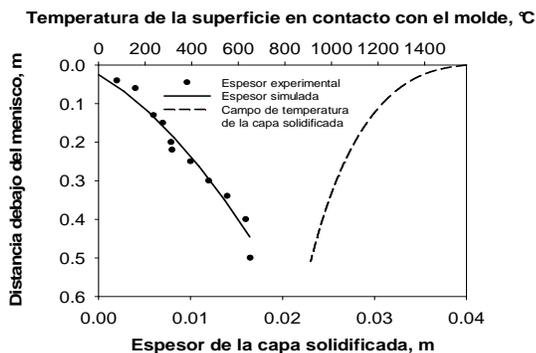


Figura 5. Espesor de la capa solidificada experimental

(símbolos, [11]) y simulada (línea sólida), y campo térmico simulado de la superficie en contacto con el molde (línea discontinua).

Con el modelo matemático verificado y validado, se determinó el espesor de la capa solidificada y el campo de temperaturas en la superficie de ésta capa que está en contacto con el molde. La simulación se llevó a cabo en dos dimensiones con los parámetros que se enlistan en la tabla 2. El resultado de esta simulación se le denomina escenario medio.

La figura 6 muestra el espesor de la capa solidificada y el campo de temperatura de la superficie en contacto con el molde para el escenario medio. La temperatura de superficie en contacto con el molde se refiere a la posición cuando $y = \text{espesor}$ y $x = 0$ (figura 2). En este mismo punto es donde se determina el espesor de la capa solidificada para evitar los efectos de las esquinas. En la figura 7 se muestra el campo térmico que se obtiene a la salida del molde. Las isoterma que están a una temperatura de 1495°C (temperatura solidus) indican el espesor de la capa solidificada con una magnitud de aproximadamente 0.02 metros. En el resto de la figura donde no se presentan isoterma, se encuentra la zona bifásica (sólido + líquido) y la zona líquida.

Tabla 1. Parámetros utilizados en la simulación de la colada continua para la validación del modelo matemático

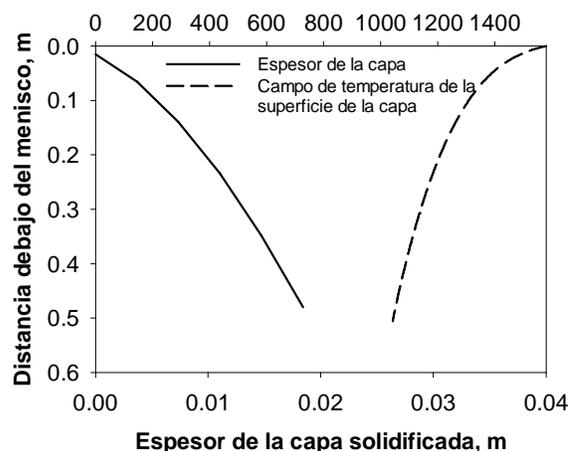
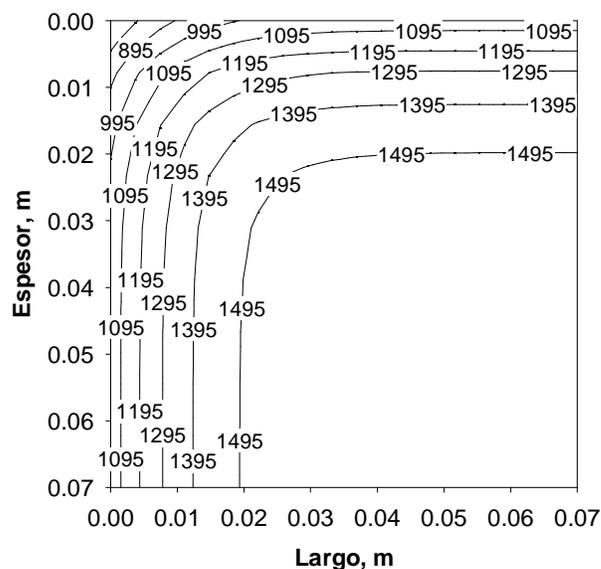
Dimensiones del molde	
Espesor	0.0635
Largo	0.5450
Velocidad de colada, m/s	0.0165
Temperatura de colada, °C	1580
Temperatura del medio, °C	227
Longitud del molde, m	0.51
Coeficientes de transferencia de calor global, $\text{W/m}^2\text{C}$	
h_w	1510
h_N	0
Numero de nodos	
en x	200
en y	3
Densidad, Kg/m^3	7400
Temperatura solidus, °C	1399
Temperatura liquidus, °C	1460
Capacidad calorífica, $\text{J/Kg}^{\circ}\text{C}$	681.7
Conductividad térmica $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$	$15.91+11.51(10^{-2})T$

Tabla 2. Parámetros utilizados en la simulación de la colada continua de un acero de bajo carbono (escenario medio)

Dimensiones del molde,	
Espesor, m	0.07
Largo, m	0.07
Velocidad de colada, m/s	0.0254
Temperatura de colada, °C	1580
Temperatura del medio, °C	227
Longitud del molde, m	0.51
Coeficiente de transferencia de calor global, W/m ² °C,s	
h _w	1694.52-16.15T _M
h _N	1694.52-16.15T _M
Número de nodos	
en x	20
en y	10
Densidad, kg/m ³	7400
Temperatura solidus, °C	1495
Temperatura liquidus, °C	1525
Capacidad calorífica, J/kg°C	681.7
Conductividad térmica W/m°C	15.91+11.51(10 ⁻²)T

Para realizar el análisis de sensibilidad del efecto del flujo de calor, se estimó el espesor de la capa solidificada para el caso en el que el valor del coeficiente global de transferencia de calor se disminuye a la mitad y para el caso en el que aumenta un 50% su valor con respecto al escenario medio. El efecto de aumentar o disminuir el coeficiente de transferencia de calor global se muestra en las figuras 8, 9 y 10. De la figura 8, se observa que cuando el coeficiente de transferencia de calor global disminuye a la mitad del valor del escenario medio, la formación de la capa solidificada tarda más en empezar a formarse, porque la eficiencia de extracción de calor por convección y radiación disminuye. Las figuras 9 y 10 presentan el campo térmico a la salida del molde para los casos en que el coeficiente de transferencia de calor global es aumentado y disminuido con respecto al escenario medio respectivamente. Se observa un mayor espesor de capa solidificada cuando el coeficiente es de mayor magnitud. Adicionalmente se observa que cuando aumenta el coeficiente de transferencia de calor global, aumenta el gradiente de temperatura entre la superficie de la capa solidificada que está en contacto con el molde y la superficie de la capa solidificada que está en contacto con el líquido. Visto de otra forma, cuando el coeficiente de transferencia de calor global disminuye, la capa solidificada a la salida del molde, presentara un menor gradiente térmico. De estos

resultados se vislumbra que el mecanismo controlante es el de transferencia de calor por convección y radiación.

Temperatura de la superficie en contacto con el molde, °C**Figura 6.** Espesor de la capa solidificada y campo de temperatura de la superficie en contacto con el molde del escenario medio. La temperatura de superficie en contacto con el molde se refiere a la posición cuando $y = \text{espesor}$ y $x = 0$ (figura 2).**Figura 7.** Campo térmico a la salida del molde del escenario medio.

Temperatura de la superficie en contacto con el molde, °C

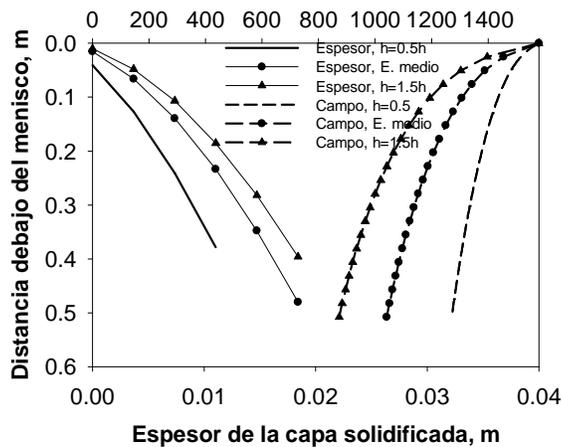


Figura 8. Temperatura de superficie y espesor de la capa solidificada cuando h fue aumentado y disminuido en un 50% con respecto al escenario medio.

En el caso del análisis de la velocidad de colada, se analizó una velocidad más alta y otra velocidad más baja en comparación con el escenario medio (figura 11). Se puede observar que cuando la velocidad de colada es lenta, el tiempo de morada en el molde de colada continua se incrementa; esto lleva a que el espesor de la capa solidificada en la salida sea de mayor magnitud en comparación con velocidades de colada rápidas. Cuando se manejan velocidades de colada altas, no se permite que el metal esté suficientemente tiempo en una zona para la extracción de calor provocando que la temperatura no disminuya tan rápido como a velocidades lentas.

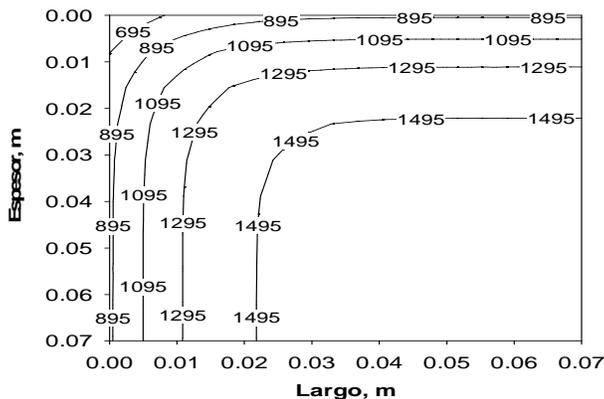


Figura 9. Campo térmico a la salida del molde cuando $h=1.5h$.

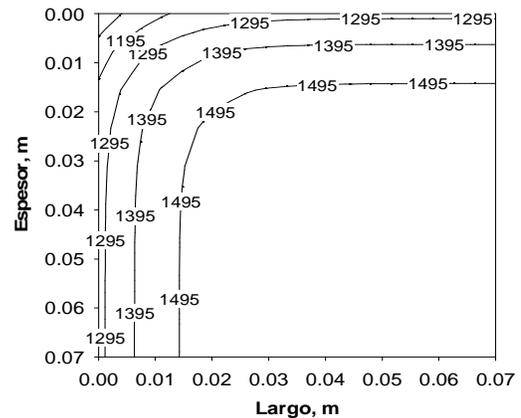


Figura 10. Campo térmico a la salida del molde cuando $h=0.5h$.

Si la temperatura de colada está muy cercana a la temperatura líquida, se obtendrá un espesor de capa solidificada de mayor magnitud; lo anterior se debe a que no hay que extraer calor sensible extra, lo que hace que la solidificación empieza casi inmediatamente (figura 12). Mientras más alta se la temperatura de colada en comparación con la temperatura de *liquidus*, más calor sensible tendrá el sistema, por lo que antes de que comience a solidificar el metal, tendrá que extraerse ese calor; a causa de esto el comienzo de la solidificación de la capa se retrasa, provocando (como en los casos anteriores), que el flujo de calor que llega a la superficie sea más grande que el que se transfiere por convección y radiación. En la figura 12 también se observa que a la temperatura de 1580°C se obtiene el mismo espesor que a temperaturas superiores, por lo que no es necesario un sobrecalentamiento mayor para obtener un espesor de capa solidificada dada; aunque tampoco se debería de tener un sobrecalentamiento menor porque esto causaría un crecimiento excesivo.

Temperatura de la superficie en contacto con el molde, °C

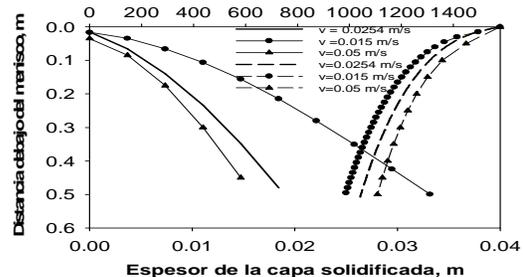


Figura 11. Temperatura de superficie y espesor de la capa solidificada para diferentes valores de velocidad de colada. La temperatura de colada para todos los casos es de 1580°C.

Temperatura de la superficie en contacto con el molde, °C

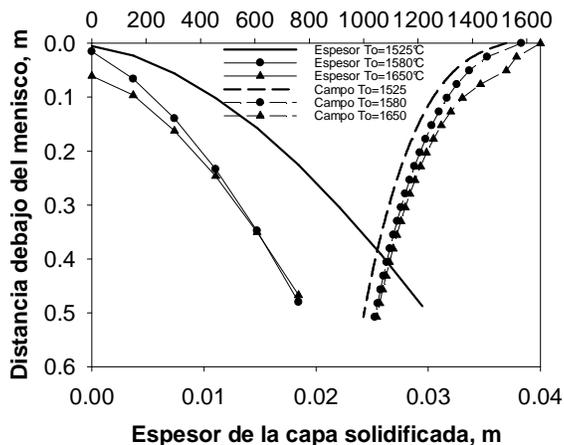


Figura 12. Temperatura de superficie y espesor de la capa solidificada para diferentes valores de temperatura de colada. La velocidad de colada para todos los casos fue de 0.0254 m/s.

Cuando la temperatura de colada es de 1650°C, el campo de temperatura de la superficie de la capa solidificada que está en contacto con el molde, presenta un comportamiento diferente en comparación con temperaturas de colada inferiores. Esto se debe a que a esta temperatura se tiene una mayor cantidad de calor sensible, con lo que, bajo estas condiciones de enfriamiento, se presenta un retraso en la extracción de calor que provoca que la temperatura sea mayor en esta zona del molde.

7. Conclusiones

Se analizó el efecto del flujo de calor, la temperatura y velocidad de colada en el espesor de la capa solidificada en la colada continua. Para esto, se formuló y se implementó un modelo matemático que puede predecir el espesor de esta capa.

Del análisis de los resultados se concluye:

1. Un conocimiento preciso de la condición de frontera es necesario para una adecuada predicción.
2. La temperatura y la velocidad de colada determinan el espesor de la capa solidificada durante la colada continua. Si la velocidad es alta, la capa solidificada que se producirá no tendrá el suficiente espesor como para cumplir con los requerimientos de resistencia mecánica.
3. Igual que la velocidad, también es necesaria una temperatura de colada adecuada para obtener un espesor

de capa solidificada. Aunque se observó que a temperaturas mayores de colada se puede obtener un mismo espesor que con temperaturas menores, es preferible la temperatura más baja posible para minimizar los gastos de energía.

8. Referencias

- [1] S. Mazudar y S. K. Ray. "Solidification control in continuous casting of steel." *Sadhana*, vol. 26, pp. 179-198, 2001.
- [2] J. K. Brimacombe. "Design of continuous casting machines based on a heat-flow analysis: state-of-the-art review." *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol. 15, pp. 163-175, 1976.
- [3] A. Ramírez, R. Morales, A. Ramos y G. Solorio. "Desarrollo de simuladores para procesos industriales. Parte I. (Colada continua)." *Revista de Metalurgia*, vol. 42, pp. 203-208, 2006.
- [4] B. A. Pereira, J. A. de Castro, A. J. da Silva y J. A. R. Durán. "Modelado del Proceso Convencional de Colada Continua de Aceros Libres de Interticios." *Información Tecnológica*, vol. 21, pp. 3-12, 2010.
- [5] L. Sowa y A. Bokota. "Numerical model of thermal and flow phenomena the process growing of the cc slab." *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 56, pp. 359-366, 2011.
- [6] Z. Malinowski, T. Telejko y B. Hadala. "Influence of the Heat transfer boundary conditions on the temperature field of the continuous casting ingot." *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 57, pp. 325-331, 2012.
- [7] R. Manojlovic. "Mathematical modeling of solidification process of continuous casting steel slabs." *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, vol. 48, pp. 419-427, 2013.
- [8] K. Milkowska-Piszczek, J. Falkus y P. Drozd. "The influence of enthalpy and specific heat on the distribution of temperature in the continuous steel casting process." *Acta metallurgica Slovaca – Conference*, vol. 4, pp. 82-89, 2014.
- [9] C. R. Swaminatha y V. R. Soller. "A General Enthalpy Method for Modeling Solidification Processes." *Metallurgical Transactions B*, vol. 23B, 1992.
- [10] B. G. Thomas, I. V. Samarasekera y J. K. Brimacombe. "Comparison of Numerical Modeling Techniques for Complex, Two-Dimensional, Transient Heat-Conduction Problems." *Metallurgical Transactions B*, vol. 15B, pp. 307-318, 1984.
- [11] J. E. Lait, J. K. Brimacombe y F. Weinberg. "Mathematical modelling of heat flow in the continuous casting of steel." *Ironmaking and Steelmaking*, vol. 2, pp. 90-97, 1974.
- [12] M. Rywotycki, K. Milkowska-Piszczek y L. Trebacz. "Identification of the Boundary Conditions in the continuous casting of steel." *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 57, pp. 385-393, 2012.

Determinación de masas de núcleos pesados a partir del Spin -F

Heavy nuclei mass calculation using F- Spin

Armando Tuñón ^{1*}, Abdoulaye Diallo ¹

¹ Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Tecnológica de Panamá
armando.tunon@utp.ac.pa, abdoulaye.diallo@utp.ac.pa

Resumen— Usando el Spin-F del Modelo de Interacción Bosónico 2 (IBM-2) [8, 13], y la parametrización propuesta por E. D. David, B. R. Barrett y A. F. Diallo [11, 14], se estiman las masas de núcleos semi-pesados y pesados par-par en la región $50 \leq Z \leq 82$, $82 \leq N \leq 126$. No obstante la simplicidad del modelo, los resultados son bastante precisos en toda la región, lo que da optimismo en su uso para el caso de otros núcleos lejos de la línea de estabilidad, en particular cerca de la línea de goteo.

Palabras claves— Energía de Enlace, Modelo de Interacción Bosónica, Espín F.

Abstract— The F spin as introduced in the Interacting Boson Model 2 (IBM-2) [8, 13] is used as proposed by E. D. David, B. R. Barret y A. F. Diallo [11, 14] to determine the masses of medium to heavy even-even nuclei in the region $50 \leq Z \leq 82$, $82 \leq N \leq 126$. This simple model yields very goods results, a fact that encourages it usage for other nuclei far from the stability, particularly along the drip line.

Keywords— Binding Energy, Interacting Boson Model, F-Spin.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 21 de abril de 2017

Fecha de Aceptación: 25 de septiembre de 2017

1. Introducción

El estudio de las estructuras nucleares representa un campo fértil de aprendizaje que se ha desarrollado durante décadas.

El núcleo es una estructura formada por partículas (protones y neutrones) colectivamente llamadas nucleones. Se trata de una pequeña sociedad donde la interacción entre sus miembros crea un rico y diverso conjunto de propiedades. Esta interacción es dominada por la llamada fuerza nuclear fuerte, con un aporte de la fuerza electromagnética que aumenta con el número de protones también conocido como número atómico (Z).

Se necesita un estudio sistemático del núcleo para establecer regularidades en sus propiedades. Estas propiedades pueden ser descritas mediante modelos que simulan algunos de los atributos reales de los núcleos. Uno de los modelos más exitosos, es el modelo de capas, el cual sirvió de marco para entender muchas de las características más sobresalientes del núcleo, particularmente las propiedades de los núcleos con pocos nucleones de valencia.

El modelo nuclear de la gota líquida explica de manera sencilla algunas propiedades colectivas del núcleo, así como el mecanismo de reacciones nucleares a baja energía. Esta es una descripción macroscópica que no considera las propiedades individuales de los nucleones.

En este modelo, el núcleo se asimila a una gota líquida y los nucleones desempeñan el papel de las moléculas en el líquido. Las moléculas están ligadas por fuerzas de tipo de Van der Waals, mientras que los nucleones por fuerzas nucleares.

El modelo conduce a una ecuación semi-empírica de la masa (fórmula de Weizsäcker), y sirve para calcular la energía de enlace en función de solo dos parámetros, Z (número atómico que corresponde al número de protones presentes en el núcleo), A (número de protones y neutrones presentes en el núcleo) y es dada por:

$$BE(Z,A) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_{as} \frac{(A-2Z)^2}{A} \pm \delta(A) \quad (1)$$

donde BE representa la energía de enlace (Binding Energy en Inglés) los otros los términos corresponden a los efectos de volumen a_v , superficie a_s , repulsión Coulombiana a_c , simetría a_{as} y apareamiento δ respectivamente. La energía de enlace de los núcleos es uno de los parámetros que más informaciones provee sobre sus propiedades. Esta energía nos permite, por ejemplo, predecir la estabilidad de los núcleos y sus modos de decrecimiento.

En nucleosíntesis, los científicos tienen una necesidad imperativa de estimar la energía de enlace sobre todo para núcleos que están lejos de la línea de estabilidad y a veces cerca de las líneas de goteo tanto protónica como neutrónica. Esto, con miras a un mejor entendimiento del proceso r (que provoca las capturas rápidas de neutrones en estudio de nucleosíntesis en la Astrofísica) de generación de los elementos.

Los diferentes coeficientes de la ecuación (1) se determinan mediante ajustes a los datos experimentales. Tales valores han sido refinados con el tiempo y la tabla 1 muestra los resultados obtenidos por los investigadores más comúnmente citados:

Tabla 1. Valores empíricos de los coeficientes de la fórmula de Weizsäcker

	N, Z	Handbuch [1]	Wapstra [2]	Rohlf [3]
a_v (MeV)		15.8	14.1	15.8
a_s (MeV)		23.2	19.0	23.7
a_c (MeV)		0.714	0.595	0.711
a_{as} (MeV)		23.2	19.0	23.7
$\delta(A)$	par, par	$\frac{+11.2}{A^{1/2}}$	$\frac{+33.5}{A^{3/4}}$	$\frac{+11.2}{A^{1/2}}$
	par, impar impar, par	0	0	0
	impar, impar	$\frac{-11.2}{A^{1/2}}$	$\frac{-33.5}{A^{3/4}}$	$\frac{-11.2}{A^{1/2}}$

El quinto y último término de la ecuación (1) corresponde a la energía de apareamiento. Este término dado por la ecuación (2), representa una corrección que aparece por la tendencia que poseen los neutrones y protones de estar apareados de dos a dos. La estabilidad disminuye para N, Z impar y es mínima para los núcleos impar-impar. Esta contribución es dada por:

$$\delta(A) = \pm \frac{a_{ap}}{A^{1/2}} = \pm \frac{a'_{ap}}{A^{3/4}} \quad (2)$$

Se utiliza el signo positivo para los núcleos par-par, negativo para los núcleos impar- impar y se anula para

los núcleos impar-par o par- impar es decir un número de masa A impar. Las constantes a_{ap} y a'_{ap} son empírica y tienen los valores que se muestran en la tabla 1 según cada autor.

Los núcleos más estables tienen un número par de protones y neutrones, cuyo efecto también se refleja en su abundancia natural. La tabla 2 [4] a continuación, muestra la relación entre la abundancia de núcleos estables en la naturaleza y la paridad en el número de protones y de neutrones.

Tabla 2. Isótopos estables conocidos según la paridad de los números de protones y de neutrones

Protones	Neutrones	No. de isótopos estables
impar	impar	4
impar	par	50
par	impar	53
par	par	157

La ecuación (1) no considera el efecto de los números mágicos, lo cual constituye una limitante en este modelo para los núcleos ligeros (especialmente en el caso del ^4He) o de pocos nucleones de valencia, pero proporciona ajustes buenos para los núcleos deformados.

La discrepancia en el valor experimental de la energía de enlace y la ecuación (1) es más pronunciada para los números de protones o neutrones específicamente para: 20, 28, 50, 82, y 126. Estos constituyen los números mágicos en estructuras nucleares. Este es el efecto capas que no puede ser explicado por el modelo de la gota líquida. Uno de los modelos que nos permite estimar las energías de enlace de los núcleos es el IBM-2 (Interacting Boson Model). Se usan entonces los números de bosones protónicos y neutrónicos de valencia (N_π y N_ν) para determinar las energías de Enlaces y por consecuencia, las masas nucleares. Se ha usado este modelo para el cálculo de BE de núcleos individuales, y en [5], se sistematiza este formalismo usando el spin F para determinar las masas nucleares para una amplia región de la tabla periódica, específicamente $50 < Z < 82$, $82 < N < 126$.

En el IBM-2, el concepto del espín F facilita la discusión de la simetría protón – neutrón, asociados a estos grados de libertad. Los estados pueden clasificarse en términos del número de bosones como número cuántico, de modo que el sistema tiene un total de estados de spin F que cumplen con la siguiente

condición $F_z \leq F \leq F_m$, $F_m = (N_\pi + N_\nu)/2$ y $F_z = (N_\pi + N_\nu)/2$.

La idea aquí es usar este formalismo para determinar las masas de los núcleos de la región donde existen datos experimentales y extenderlo a los núcleos que se encuentran lejos de la línea de estabilidad o cercanas a la línea de goteo tanto neutrónica como protónica.

2. Aplicación del espín F y fórmula de masa

Una consecuencia de la invariancia del spin F es la existencia de múltipletes de spin F. Estos múltipletes constarán de núcleos que tienen el mismo número total de bosones de valencia pero diferentes valores de F_z . En virtud de que $[H, F \odot F] = 0$, el Hamiltoniano tiene autovalores degenerados por lo que se puede escribir $E(F_m, F_z) = E(F_m)$, lo cual conduce a una dependencia parabólica, es decir:

$$BE(F_m, F_z) = E_0(F_m) + E_1(F_m)F_z + E_2(F_m)F_z^2, \quad (3)$$

La energía de enlace que representa los autovalores del Hamiltoniano dada por (3), puede ser generalizada mediante el funcional:

$$BE(F_m, F_z) = \theta_1 + \theta_2 F_m + \theta_3 F_m^2 + \theta_4 F_z + \theta_5 F_z^2 + \theta_6 F_m F_z \quad (4)$$

donde los coeficientes θ_k son parámetros a determinar.

Este modelo teórico fue propuesto original y fenomenológicamente por E. D. David, B. R. Barret y A. F. Diallo [11, 14] para núcleos par-par en la región de la tabla periódica $50 \leq Z \leq 82$, $82 \leq N \leq 126$.

3. Esquema de regiones y Energía de enlace

Para determinar los coeficientes y verificar las limitaciones del modelo propuesto, los núcleos con N y Z par-par seleccionados son clasificados según el esquema descrito a continuación. La información de datos experimentales para la energía de enlace, es tomada de las dos fuentes más actualizadas que disponemos: [6, 8].

Estos núcleos se han subdividido en regiones $R_{\pi\nu}$ bosón protón – bosón neutrón según el número de bosones de valencia relativo a los números mágicos específicamente para $50 \leq Z \leq 102$ y $50 \leq N \leq 162$. Esto genera una muestra de 451 núcleos para los cuales se tenía acceso a datos experimentales.

El esquema se representa en la figura 1, donde se aprecian las subregiones identificadas en código de colores y símbolos para las configuraciones: pp

(partícula- partícula), ph (partícula- hueco), hp (hueco- partícula) y hh (hueco- hueco).

Los números mágicos para nucleones ya sean protones o neutrones son: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 y 184, y muestran los cierres de capas nucleares. Para los bosones protónicos de 50 hasta 82, la primera mitad se clasifica como partícula (p) y abarca de 50 a 66, mientras que la segunda mitad como hueco (h) abarca de 66 hasta 82. De igual forma se precede con los bosones neutrónicos de manera que se generan regiones $R_{\pi\nu}$ en formato matricial. La región por ejemplo R_{12} corresponde a una sección de configuración: "partícula" para bosón protónico y "hueco" para el bosón neutrónico es decir ph (partícula-hueco) para núcleos con $50 \leq Z \leq 66$ y $66 \leq N \leq 82$.

Las capas nucleares están definidas por los números mágicos, de manera que desde 50 hasta 82 por ejemplo, existe una capa nuclear que contiene una configuración "partícula" y otra "hueco" para los bosones ya sea protónico y neutrónico, lo que significa, que cada región $R_{\pi\nu}$ representa una cuarta parte de la capa nuclear, i.e. una capa nuclear contiene las configuraciones pp (partícula-partícula), hp (hueco-partícula), ph (partícula-hueco) y hh (hueco-hueco).

La muestra de datos recolectados también fue organizada por capas $C_{\pi\nu}$ según el número mágico (ver Figura 2), donde por ejemplo C_{21} , define una capa nuclear con bosones protónicos y neutrónicos en el rango: $82 \leq Z \leq 126$ y $50 \leq N \leq 82$.

El propósito de esta estructuración tiene la finalidad de analizar la correlación entre regiones de la misma capa analíticamente y verificar las limitaciones del modelo en una misma capa.

Se depuró la muestra eliminado aquellos núcleos con un número de bosones protónicos y neutrónicos iguales a cero por estar cercanos al cierre de las capas.

4. Resultados

Se procesaron las regiones individualmente con muestras significativas, donde aquí solo se muestran los resultados de las regiones específicamente R24, R11 y R35 en el esquema de la figura 1. Las tablas 3, 4 y 5 aparecen identificados los núcleos y las cadenas de isótopos en las regiones mencionadas.

Los análisis gráficos comparando el ajuste del modelo teórico y los valores experimentales para cada región específica aparecen en las figuras 3, 4 y 5. Los ajustes teóricos para a energía de enlace $BE(F_m, F_z)$

es representada por (4), donde finalmente los coeficientes θ_k están organizados en la tabla 6.

Para la correlación de las regiones para una misma capa, basada en el esquema de la figura 2, se realiza un ajuste para las regiones de una misma capa cuando hay

suficientes datos, específicamente C12. La tabla 6, se muestran los resultados obtenidos para cada región y capa específica. A futuro se quiere incluir todas las regiones en un solo ajuste.

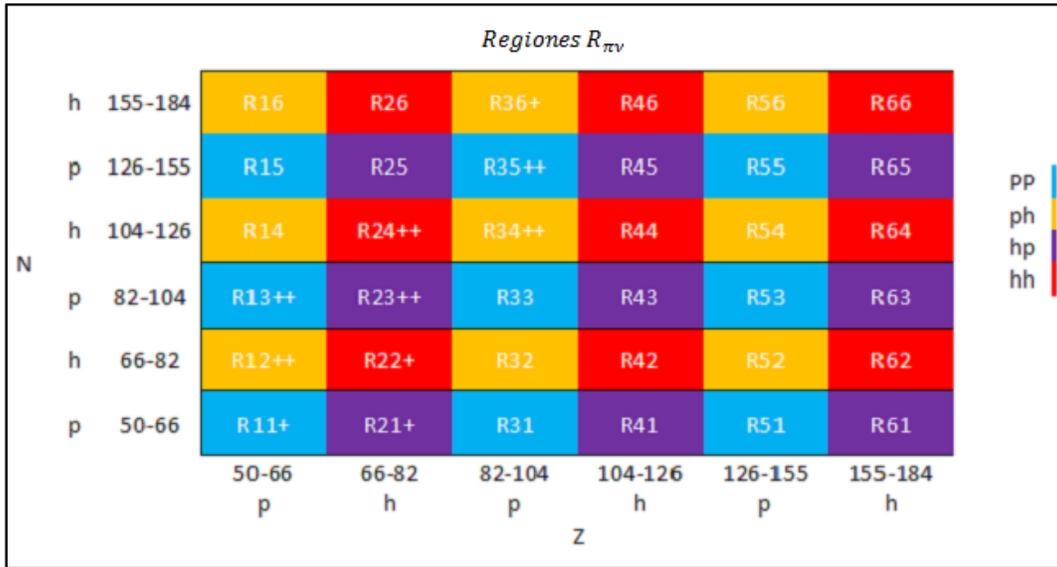


Figura 1. Esquema de Regiones de bosones protónicos y neutrónicos. Los signos + y ++ indican que son muestra significativa de datos para núcleos par-par.

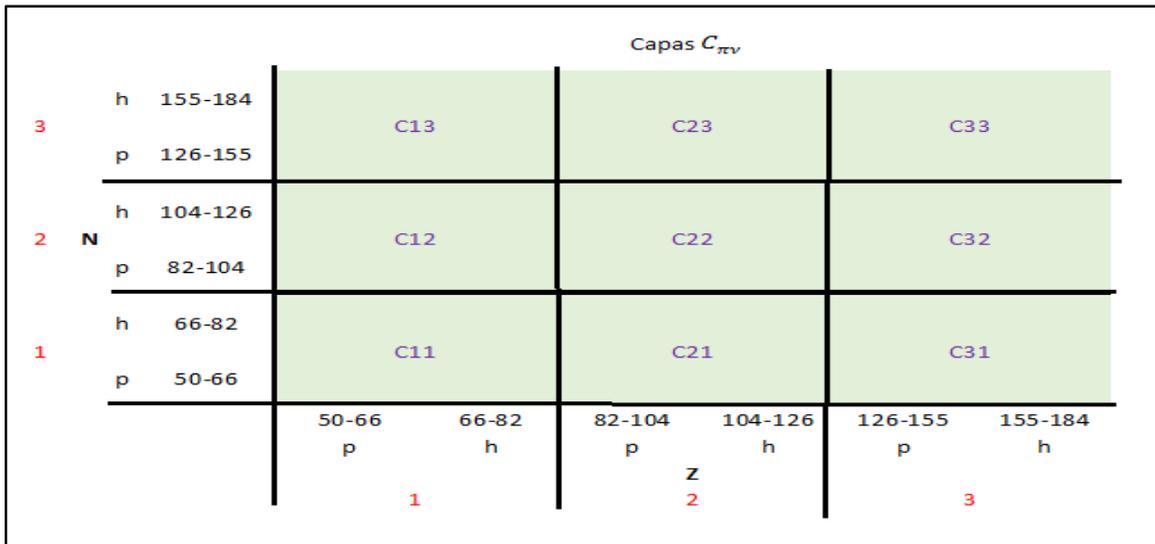


Figura 2. Esquema de Capas de bosones protónicos y neutrónicos.

4.1 Región R24

En la región, se analizaron un total de 39 núcleos pertenecientes a 7 cadenas de isótopos de tipo hueco-hueco, se muestran en la tabla 3, dando el ajuste un error estándar de 0,28%.

La figura 3, muestra los resultados del modelo teórico (curva continua) y los valores experimentales (puntos) donde se puede observar que las curvas de ajustes para cada F_{max} convergen con los puntos

experimentales y su característica parabólica es bien acentuada.

Tabla 3. Núcleos analizados en región R24

Elemento	Símbolo	cantidad
Erbio	Er	1
Iterbio	Yb	3
Hafnio	Hf	7
Wolframio	W	4
Osmio	Os	9
Platino	Pt	8
Mercurio	Hg	7
		Total 39

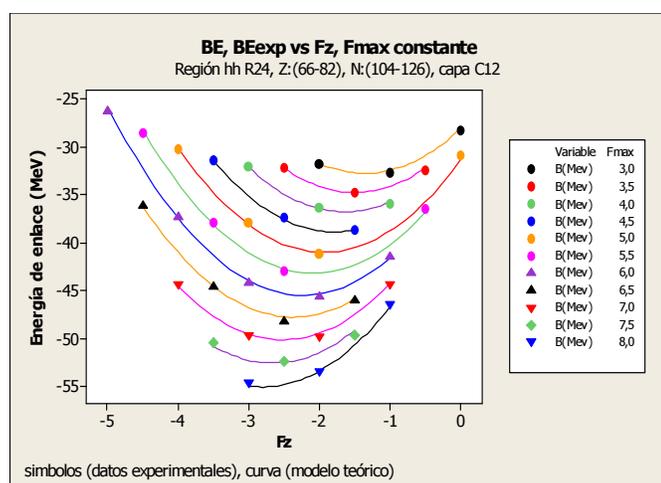


Figura 3. Energía calculada (línea continua) vs datos experimentales en la región hh R24- capa C12.

4.2 Región R11

Para esta región R11 cuya configuración es del tipo partícula- partícula, se analizaron las 4 cadenas de isótopos mostrados en la tabla 4.

La gráfica de la figura 4, muestra los resultados del modelo teórico con los valores experimentales de la energía de enlace en función de la proyección del Spin F, con un error estándar de 0,13%.

Otro aspecto relevante en los resultados gráficos de los 10 núcleos analizados para $50 \leq Z \leq 66$, $50 \leq N \leq 66$ es la tendencia cuadrática del modelo propuesto por (4) para la energía de enlace BE en MeV.

Las 3 curvas del modelo teórico están definidas para valores constantes del Spin F con $F_m = 2,5$; 3,0 y 3,5.

Tabla 4. Núcleos analizados en región R11

Elemento	Símbolo	cantidad
Estaño	Sn	3
Telurio	Te	3
Xenón	Xe	3
Bario	Ba	1
		Total 10

4.3 Región R35

Esta región es de configuración partícula- partícula y fueron analizadas 10 cadenas de isótopos con un total de 79 núcleos mostrados en la tabla 5.

El resultado de la región R35 se muestra a continuación en la figura 5, con un error estándar de 0,83% definida para $82 \leq Z \leq 104$, $126 \leq N \leq 155$.

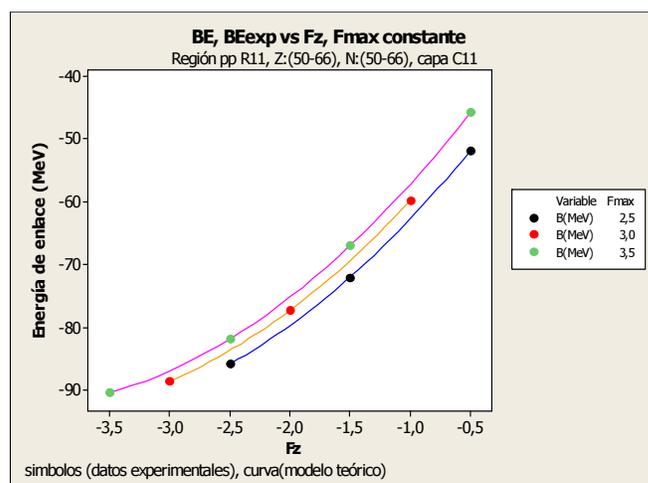


Figura 4. Energía calculada (línea continua) vs datos experimentales en la región pp R11- capa C11.

Tabla 5. Núcleos analizados en región R35

Elemento	Símbolo	cantidad
Polonio	Po	3
Radón	Rn	7
Radio	Ra	10
Torio	Th	2
Mercurio	Hg	21
Plutonio	Pu	10
Curio	Cm	9
Californio	Cf	8
Fermio	Fm	6
Nobelio	No	3
		Total 79

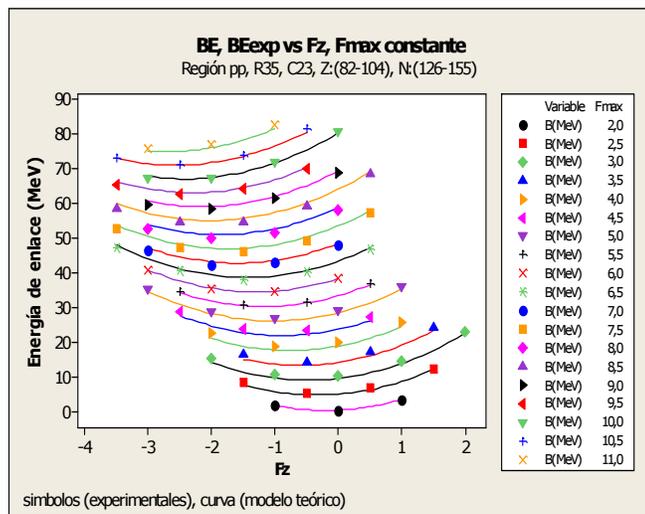


Figura 5. Energía calculada (línea continua) vs datos experimentales en la región pp R35- capa C23.

4.4 Correlación entre regiones para C12

Se realizó un ajuste en el caso particular de la capa C12 que está integrada por las regiones R13, R23 y R24.

El análisis gráfico se muestran en la figura 6, con un error estándar de 1.09% e incluye un mayor número de núcleos con configuraciones de partícula-hueco variadas para $50 \leq Z \leq 82$, $82 \leq N \leq 126$.

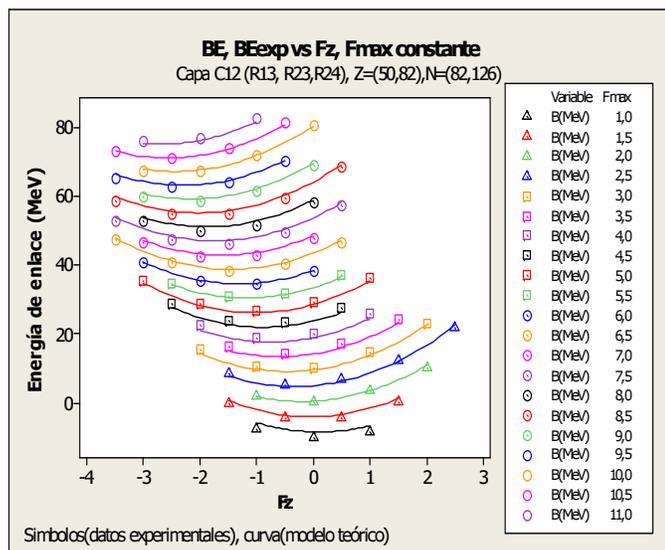


Figura 6. Energía calculada (línea continua) vs datos experimentales en la capa C12.

Los resultados de los ajustes para los coeficientes de la ecuación (4) en forma resumida, se presentan en la tabla 6 para las regiones analizadas con núcleos par-par

en la región $50 \leq Z \leq 102$ y $50 \leq N \leq 162$. La cantidad de cifras significativas es consistente con datos obtenidos de “The Ame2003 atomic mass evaluation” [6], correspondientes a los valores experimentales de energía de enlace BE en keV, para los elementos de la tabla periódica. Esta fuente de datos experimentales fue actualizada y comparada con otra fuente: “The NUBASE2012 evaluation of nuclear properties.”[8], publicada en 2012 en Chinese Physics C.

Es de notar que el error estándar es en todos los casos no pasa de 1%, lo que representa un resultado excepcional cuando se describen más de 400 núcleos en diferentes regiones de la tabla periódica.

Este acuerdo con los datos experimentales presagian de la validez del modelo en su uso para regiones lejos de las líneas de estabilidad. Este es particularmente útil para estudios de nucleosíntesis donde no se disponen de valores medidos de las masas nucleares y se intenta tener alguna idea de sus valores.

Queda todavía unificar todas estas regiones en una transformación de similitud partícula-hueco que permita la descripción del conjunto con un solo *set* de valores de los coeficientes de (4) para la energía de enlace $BE(F_m, F_z)$.

5. Conclusiones

Los núcleos seleccionados fueron organizados en regiones y capas según la naturaleza de los bosones de valencia y su ubicación en la tabla periódica. Se aplicó el funcional propuesto por el modelo teórico para la energía de enlace en función de los parámetros F_m, F_z .

Los resultados obtenidos presentan errores estándar bastante aceptables, mostrando una aproximación excelente de los valores de energía de enlace comparados con los datos experimentales.

En cuanto a la correlación de regiones en una misma capa, específicamente C12 que contiene 3 regiones, R24 hh (39), R23 hp (66) y R13 pp (46) para un total de 151 núcleos se obtuvo un funcional para toda la capa con un error estándar de 1,09%.

Se ha hecho uso de una expresión analítica que puede describir la masa de los núcleos en función de su contenido en *spin* F, donde se ha verificado su funcionamiento en la región de núcleos pesados y presumimos que se pueden hacer predicciones a lo largo de las líneas de goteo y del proceso r en el estudio de Nucleosíntesis en la Astrofísica.

Tabla 6. Cuadro de coeficientes de energía de enlace

Capa	Región	Z,N	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	EE(%)
C11	R12	ph	-74,3550	-12,5840	2,6341	-2,5436	0,2364	1,3786	0,1436
	R11	pp	-61,0870	10,0464	-0,5788	23,7984	3,1367	1,0323	0,1282
C12	R24	hh	-21,5433	-2,4897	0,1026	2,5096	2,5594	1,4837	0,2833
	R23	hp	59,5781	-33,1569	-2,1780	-13,2715	0,2402	1,2915	0,3728
	R13	pp	-75,0612	1,2602	-0,0391	-16,6486	2,7078	1,7137	0,3133
C22	R34	ph	-21,6738	2,4530	1,7902	6,9971	0,3018	1,0051	0,0935
C23	R35	pp	-17,2542	8,5928	0,1172	-1,8259	2,1990	1,2823	0,8317
C12	R13,R23, R24	pp,hp,hh	-17,1012	8,4992	0,1240	-1,6595	2,2151	1,2462	1,0934

6. Referencias

- [1] Handbuch der Physik, XXXVIII/1. *Äußere Eigenschaften der Atomkerne. / External Properties of Atomic Nuclei. Gebundene Ausgabe – 1958 pp. 10-39.*
- [2] Wapstra, A. H. *Atomic Masses of Nuclides. External Properties of Atomic Nuclei.* Springer, 1958, pp. 1–37. doi: 10.1007/978-3-642-45901-6_1. ISBN 978-3-642-45902-3.
- [3] Rohlf, J. W. *Modern Physics from α to Z α .* John Wiley & Sons. 1994, ISBN 978-0471572701.
- [4] Pignanelli F. Web Química General.[en línea], http://quimica-gral.blogspot.com/2011/01/patrones-de-estabilidad-nuclear_28.html [Consulta: 2 abril 2015].
- [5] Gabriele E. Korner. Web NUPEX (Nuclear Physics Experience). Physick Department, Technische Universitat Munchen, Germany. [en línea]. <http://nupeu.eu/index.php?g=textcontent/nuclearapplications/nuclearinmed&lang=nl> [Consulta: 2 abril 2015]
- [6] G. Audi, A. H. Wapstra, C. Tribault. “The Ame2003 atomic mass evaluation.” *Nuclear Physics A*, Vol. 729, Issues 1, Dec. 2003, pp 337-976.
- [7] César Barbero, Jorge G. Hirsch, Alejandro E. Mariano. “Deformation and shell effects in nuclear mass formulas.” *Nuclear Physics A*, Vol. 874, January 2012, pp 81-97.
- [8] G. Audi, F. G. Kodev, M. Wang, B. Pfeiffer, X. Sun, J. Blachot, M. MacCormick, “The NUBASE2012 evaluation of nuclear properties.” *Chinese Physics C*, Vol. 36, No. 12, Dec. 2012, pp 1157-1286.
- [9] B.R. Barrett, E. D. Davis and A.F. Diallo. “g-boson panacea for magnetic properties of the nuclear groundstate band.” *Phys. Lett. B*. Vol. 295. Issue 1-2, Nov. 1992, pp 5-10.
- [10] A. F. Diallo. “F-spin study of rare-earth nuclei using F-spin multiplets and angular momentum projected intrinsic states.” Ph.D Thesis. University of Arizona, Tucson. U.S. May 1993.
- [11] C. K. Lin and L. Zamick . “Variation after projection in the weak deformation limit.” *Phys. Rev. C* . Vol. 23, Art. 2338. May 1981.
- [12] D. Bonatsos. *Interacting Boson Models of Nuclear Structure.* 1st Ed. Oxford Science Publications, Oxford. 1988 , pp 1-129.
- [13] A. F. Diallo, E. D. David and B.R. Barrett. “An Improved Asymptotic Realization of the Projected Intrinsic State Approximation in IBM.” *Annals of Physics*. Vol. 222, Issue 2, Mar 1993, pp 159-186.
- [14] A. Tuñón, “Estudio sistemático de masas nucleares y fórmula de masa para núcleos pesados en la aproximación VAP-Variation After Angular Momentum Projection.” M.Sc Tesis. Universidad Tecnológica de Panamá, Marzo 2017.

Manejo del gas licuado de petróleo en Panamá

Handling of liquefied petroleum gas in Panama

Diego Venegas Vásquez^{1*}, Santiago Celi Ortega², Juan Rocha Hoyos³, Cesar Ayabaca Sarria⁴, Euro Mena Mena⁵

¹Facultad de Ingeniería Universidad de Concepción, ²Facultad de Arquitectura e Ingeniería Universidad Internacional SEK, ³Facultad de Arquitectura e Ingeniería Universidad Internacional SEK, ⁴Departamento de Ingeniería Mecánica Escuela Politécnica Nacional, ⁵Departamento de Energía y Mecánica Universidad de las Fuerzas Armadas
¹diegofvenegas@udec.cl, ²santiago.celi@uisek.edu.ec, ³carlos.rocha@uisek.edu.e, ⁴cesar.ayabaca@epn.edu.ec, ⁵ermena@espe.edu.ec

Resumen— Para satisfacer varias de las necesidades energéticas en Panamá se utiliza el gas licuado de petróleo (GLP) en aplicaciones residenciales, comerciales e industriales. Para poder utilizar este combustible se requiere de sistemas que incluyen recipientes para el almacenamiento y tuberías para su transporte hacia los equipos de consumo. La instalación de estos sistemas debe satisfacer requerimientos mínimos de seguridad establecidos por normas nacionales e internacionales que la Autoridad Competente del país reconoce y adopta. Se han podido verificar algunas fallas recurrentes en instalaciones para este combustible en Panamá, por lo cual este documento no solamente indica estos no cumplimientos con los lineamientos mínimos establecidos en las normas nacionales e internacionales, sino que plantea algunas recomendaciones destinadas a mejorar la seguridad y reducir el riesgo que genera el manejo de este combustible en el territorio panameño.

Palabras claves— Gas licuado de petróleo, normas técnicas, recipientes, tuberías, seguridad, instalaciones en Panamá.

Abstract— To meet several of the energy needs in Panama, liquefied petroleum gas (LPG) is used in residential, commercial and industrial applications. In order to use this fuel, systems are required that include vessels and pipes for transportation to consumer equipment. The installation of these systems must meet minimum safety requirements established by national and international standards that the Competent Authority of the country recognizes and adopts. It has been possible to verify some recurring faults in facilities for this fuel in Panama, so that this document not only indicates these non-compliances with the minimum guidelines established in national and international standards, but also proposes some recommendations aimed at improving safety and reducing the risk generated by the handling of this fuel in the Panamanian territory.

Keywords— Liquefied petroleum gas, technical standards, vessels, pipelines, security, installations in Panama.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 5 de junio de 2017

Fecha de Aceptación: 25 de septiembre de 2017

1. Introducción

El gas licuado de petróleo (GLP) es un combustible muy explosivo e inflamable [1] utilizado como fuente de energía en aplicaciones residenciales, comerciales e industriales [2], el cual brinda varias ventajas entre las que se pueden mencionar:

- Satisface varias necesidades energéticas [3].
- Alto poder calorífico comparado con otras fuentes de energía [4].
- Limpio en términos de emisiones de gases contaminantes [5].

- Es fácil de transportarlo y almacenarlo reduciendo su temperatura y aumentando su presión [6].
- No es tóxico para el ser humano [7].

En Panamá se utiliza este combustible como fuente de energía para equipos residenciales (cocción de alimentos, calentamiento de agua, secado de ropa), comercial (cocción de alimentos) e industrial (hornos, calderas, entre otros), y para llegar a estos equipos de consumo se utilizan cilindros o tanques para su almacenamiento y tuberías para su transporte.

La Autoridad Competente de Panamá [8] regula con Normas y Reglamentos la utilización del GLP, y como

un proceso de adopción [9][10][11], está recurriendo a los Códigos y Normas establecidos por la National Fire Protection Association (NFPA), la cual mantiene reuniones a nivel mundial [12] y regional [13] con el fin de precautelar la seguridad e integridad humana y física.

Para el GLP, las normas bases de NFPA son la NFPA 58 [14] y NFPA 54 [15], las cuales establecen

los criterios mínimos que deben establecerse al momento de dimensionar, planificar y ejecutar instalaciones del combustible en aplicaciones residenciales, comerciales e industriales.

En cuanto al almacenamiento, NFPA 58 establece las distancias mínimas de seguridad desde los recipientes hacia terceros, que se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Materiales recomendados para instalaciones de GLP [14]

Capacidad de agua por recipiente		Distancias mínimas					
		Recipientes subterráneos o en montículo ^a		Recipientes sobre superficie ^b		Entre Recipientes ^c	
gal	m ³	pies	m	pies	m	pies	m
<125 ^d	<0,5 ^d	10	3	0 ^e	0 ^e	0	0
125-250	0,5-1,0	10	3	10	3	0	0
251-500	1,0+ -1,9	10	3	10	3	3	1
501-2000	1,9+ -7,6	10	3	25 ^f	7,6	3	1
2001-30.000	7,6+ -114	50	15	50	15	5	1,5
30.001-70.000	114+ -265	50	15	75	23		
70.001-90.000	265+ -341	50	15	100	30		
90.001-120.000	341+ -454	50	15	125	38	¼ de la suma de los diámetros de recipientes adyacentes	
120.001-200.000	454+ -757	50	15	200	61		
200.001-1.000.000	757+ -3785	50	15	300	91		
>1.000.000	>3785	50	15	400	122		

Para el transporte del combustible desde los recipientes hasta los puntos de consumo, se utilizan tuberías de varios materiales mostrados en la tabla 2.

Tabla 2. Materiales aceptados para conducción de GLP según NFPA con sus normas de fabricación

Tubería	Norma de referencia
Acero	ASTM A 53 [16] ASTM A106 [17]
Acero inoxidable	ANSI/CSA 6.26 [18]
Cobre	ASTM B 88 [19] ASTM B 280 [20]
Polietileno	ASTM D 2513-09 [21]

Este trabajo presenta las deficiencias más recurrentes observadas desde el punto de vista de la seguridad en instalaciones de GLP en Panamá, los incumplimientos de las Normas aplicables para este

tipo de sistemas y las formas como se puede mejorar y corregir estos aspectos.

Las recomendaciones y conclusiones de este trabajo son emitidas desde un punto de vista de seguridad, ya que el interés es crear conciencia de prevención en los usuarios. Por el gran incremento de edificios de departamentos en Panamá, deficiencias de seguridad en estos afectarán a la integridad de gran cantidad de usuarios, lo mismo aplica como principio de seguridad en sistemas de GLP comerciales, ubicados cerca a grandes concentraciones de público.

2. Metodología

Como parte del servicio brindado por PLOPinsa S.A. para diseño, instalación y mantenimiento de sistemas de GLP, han sido visitados 50 usuarios entre residencias, comercios e industrias (tabla 3), principalmente ubicados en ciudad de Panamá y también en Chiriquí, que han solicitado servicios para

sus sistemas de GLP y se han podido detectar falencias de seguridad tanto en el almacenamiento como en las tuberías de transporte del combustible.

Tabla 3: Cantidad de usuarios sobre los cuales se hace el estudio

Usuarios	Cantidad
Residencial	26
Comercial	18
Industrial	6
Total	50

En base a la experiencia adquirida y las capacitaciones recibidas sobre manejos normativos de NFPA se plantean las deficiencias más recurrentes desde el punto de vista de seguridad en instalaciones de GLP. Esto desemboca en acciones a realizar para mejorar y precautelar la integridad física y humana en territorio panameño.

3. Presentación de resultados

Al ser el GLP un combustible, su manipulación genera riesgos, las fugas pueden ocasionar incidentes con consecuencias graves para los usuarios, y en caso de una fuga de líquido, al contacto con la atmósfera la expansión se produce con una relación en volumen de 273/1 [22]. Las observaciones de inseguridad se han centrado sobre dos partes sensibles dentro de las instalaciones de GLP:

3.1 Almacenamiento

El almacenamiento del GLP se tiene en cilindros para recambio y en tanques estacionarios cuya recarga se la hace en sitio a través de camiones cisterna. Hay varios incumplimientos con los requerimientos mínimos de seguridad exigidos en las normativas, y en algunos casos estos incumplimientos son en más de uno de los ítems marcados los principales problemas encontrados en instalaciones son los siguientes:

3.1.1 Tanques al alcance de la manipulación de público

Se pueden observar recipientes de almacenamiento instalados en espacios públicos, o espacios privados, pero que no tienen protección, ni restricción al paso de extraños que pueden manipular los accesorios del

recipiente, y pueden ocasionar un accidente, como se muestra en la figura 1.



Figura 1. Tanque en espacio al alcance de la manipulación de terceras personas.

3.1.2 Ubicación junto a motores de combustión

Siendo un combustible muy inflamable [1], es obvio pensar que debe establecerse distancias de seguridad desde un recipiente de almacenamiento de GLP hacia equipos y maquinarias que funcionen con motores de combustión, los cuales durante el proceso de encendido generan chispas. La figura 2 muestra un tanque estacionario de 0,5 m³ ubicado junto a un estacionamiento vehicular.



Figura 2. Tanque junto a vehículo a motor.

Ubicar recipientes en zonas de estacionamientos no es recomendable, ya que en ellas se producen chispas durante el encendido de los vehículos, y esto puede ser el detonante en caso de una fuga del combustible.

Tampoco es aconsejable que el recipiente se encuentre bajo la edificación, ya que obstruye la línea de desfogue de la válvula de alivio instalada en él.

3.1.3 Ubicación junto a grasas y combustibles

Por regla general no se debe tener el almacenamiento del combustible junto a otras fuentes combustibles que pueden magnificar un incidente en presencia de fuego. La figura 3 muestra un tanque estacionario de 2 m³ de capacidad junto a recipientes de almacenamiento de grasas y combustibles.



Figura 3. Tanque junto a recipientes de almacenamiento de grasas y combustibles.

3.1.4 Recipientes que no satisfacen la demanda de vaporización

Al interior de los recipientes se produce la vaporización o cambio de fase de líquido a vapor por la transferencia de calor desde la atmósfera hacia el combustible, a través de las paredes de éstos. El vapor transformado es el que va hacia los equipos de consumo a través de las tuberías.

La superficie del recipiente delimitada por el GLP que está en estado líquido se conoce como “zona mojada”, mientras mayor sea esta zona mojada, mayor será la capacidad de vaporización [23].

Mientras mayor es el tamaño del recipiente, mayor es la zona mojada y por lo tanto mayor es la capacidad de vaporización. También habrá más vaporización si la temperatura exterior al recipiente es mayor.

Si ya no se puede producir la vaporización en un recipiente, este no entregará el suficiente caudal de gas, ni a la presión adecuada para el buen funcionamiento de los equipos. El GLP no entregado al consumo se llama remanente [24], el cual en los cilindros es

devuelto a la comercializadora provocando un perjuicio al usuario.

Para vaporizar más combustible en los cilindros, estos son ubicados dentro de recipientes llenos de agua caliente, con el fin de incrementar la temperatura exterior y alcanzar una mayor vaporización (figura 4).



Figura 4. Cilindro al que se le “ayuda” a vaporizar.

3.1.5 Resultados de falencias en el abastecimiento

La figura 5 corresponde a los problemas más recurrentes observados específicamente en la parte del abastecimiento. Cabe indicar que algunos usuarios tienen más de una observación deficiente.

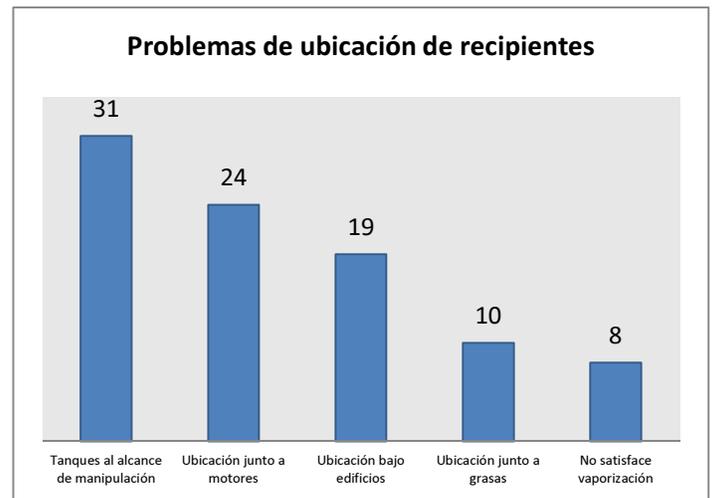


Figura 5. Problemas de ubicación de recipientes.

3.2 Transporte por tuberías

El transporte del combustible desde los recipientes a los puntos de consumo se realiza a través de tuberías, las cuales deben cumplir con las normas de fabricación

que se indicaron en la tabla 1, y además deben cumplir con lo siguiente [25][26][27]:

- Deben ser compatibles químicamente con el combustible.
- Deben soportar las condiciones de uso de presión y caudal requeridos en los equipos, con una caída de presión del 10% como máximo permitido.
- Deben soportar las pruebas y ensayos de verificación, calificación y recalificación.

Los problemas más recurrentes con respecto a las tuberías de conducción son los siguientes:

3.2.1 Instalación con materiales no aprobados por NFPA

Uno de los materiales que se están utilizando en instalaciones al interior de edificios de departamentos por la facilidad que involucra en su instalación desenvolver rollos, es la tubería de polietileno-aluminio-polietileno, sin embargo esta tubería no está aprobada por NFPA. El mayor problema visto con esta tubería es que los instaladores no toman en cuenta las curvaturas al instalarla, y durante el montaje se las miden y cortan en tramos como si fueran rectas, y al pretender empalmarlas no alcanzan, por lo que hay que completar con tramos pequeños y uniones en espacios reducidos, lo que incrementa la probabilidad de aparición de fugas, como se muestra en la figura 6.



Figura 6. Tubería de P-Al-P instalada al interior de edificios.

A esto se debe sumar que en este tipo de instalaciones con P-Al-P se están quitando las manijas de las válvulas que controlan el flujo del combustible para varios usuarios, lo cual no es deseable, ya que, en

caso de fugas, bastaría con cerrar estas válvulas para cortar el flujo del combustible mientras se realizan las reparaciones del caso (figura 7).

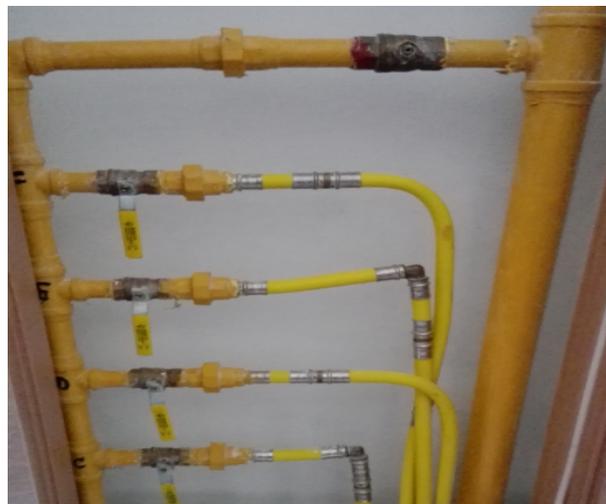


Figura 7. Tubería de P-Al-P instalada al interior de edificios.

3.2.2 Falta de mantenimiento en tuberías

Aquellas tuberías que atraviesan espacios grasosos, se contaminan con esa grasa, y el problema se agudiza cuando no reciben mantenimiento ni limpieza por parte de los usuarios [28] (figura 8).



Figura 8. Tuberías en espacios de rasa que no han recibido limpieza ni mantenimiento.

Como falta de mantenimiento también se observan tuberías metálicas oxidadas, estas tuberías deben ser repintadas de acuerdo a los colores identificativos para GLP (amarillo ocre).

3.2.3 Tuberías empotradas

No es agradable para la vista una tubería de color amarillo cuando esta tiene que atravesar un ambiente por lo cual es muy común ocultarlas. Esto hace que se las instale empotradas, es decir que pasen a ser parte estructural de la edificación [22], y en caso de una fuga, para poder acceder a ella a inspeccionarla hay que destrozar todo aquello que la cubre (figura 9).



Figura 9. Tubería empotrada de GLP.

3.2.4 Modificaciones a la instalación original

Una de las prácticas más rutinarias en el comercio y la industria es realizar modificaciones a la instalación original. Estas modificaciones están asociadas al incremento de equipos de consumo, y se observa que estos incrementos no son realizados por personal calificado para el efecto (figura 10).



Figura 10. Modificaciones a instalación original.

3.2.5 Ubicación incorrecta de tuberías

La instalación de tuberías plásticas de polietileno está autorizada únicamente para aplicaciones enterradas [27].

Cuando se las instala vistas (figura 11), al entrar en contacto con los rayos solares, éstas se cristalizan, fragilizan, y se incrementa la probabilidad de ruptura y fuga del combustible.

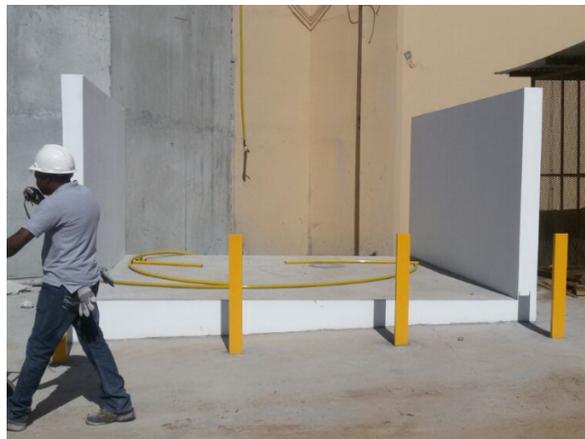


Figura 11. Tubería de polietileno instalada vista y a la intemperie.

3.2.6 Utilización de mangueras para servicio no especificado

Las mangueras de conexión a los equipos deben ser especificadas para conducir el combustible y deben soportar la presión de operación.

En la figura 12 se muestra un cilindro que ha sido conectado con una manguera para servicio de agua.



Figura 12. Manguera plástica para agua utilizada en la conexión de aparatos a gas.

3.2.7 Resultados de falencias en el transporte del combustible

En la figura 13 se pueden observar los problemas

más reiterativos en cuanto al montaje de las tuberías y conexiones de los sistemas de combustible.

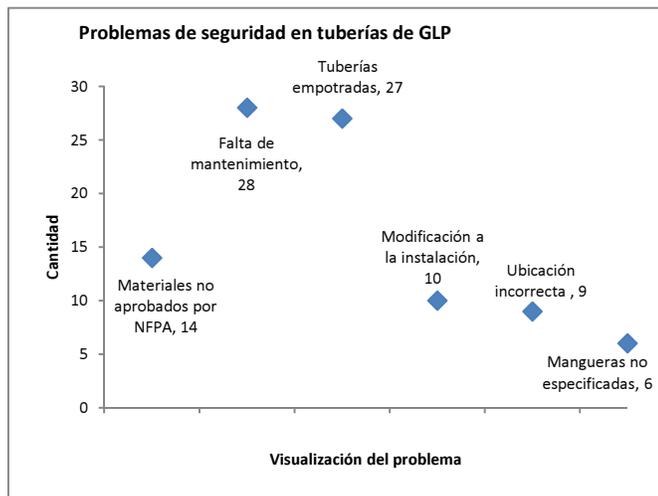


Figura 13. Problemas en tuberías de GLP.

4. Análisis de resultados

Se dividió en dos zonas los problemas encontrados: en el almacenamiento (recipientes), y en el transporte (tuberías), por las diferentes fases que se encuentran en estas dos áreas (líquido y vapor respectivamente).

La parte más crítica para el análisis de seguridad en un sistema de gas licuado de petróleo está en el almacenamiento (ubicación de recipientes), ya que aquí se maneja el combustible en fase líquida, y una fuga en esta fase equivale volumétricamente a 273 veces más que tener una fuga en fase vapor (en las tuberías y accesorios) [22].

Los accidentes ocasionados con fugas de combustible en fase líquida desencadenan en la Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion “BLEVE” [29], que es una súbita explosión ocasionada por una fuga de líquido que súbitamente se expande, genera una liberación brusca de gran cantidad de energía [30] y destruye todo lo que encuentra en su paso [31][32].

Dada la devastación ocasionada por este fenómeno con reporte de accidentes graves a nivel mundial [33], muchos esfuerzos se concentran en minimizar su ocurrencia [34].

Los reportes sobre accidentes en fase vapor ocasionados por fugas en tuberías y accesorios deben tenerse en cuenta, ya que estos ocurren al interior de viviendas, locales comerciales e industrias, y afectan gravemente a cientos de personas [35][36][37][38].

Más alarmante es el hecho que los resultados mostrados en las figuras 5 y 13 reflejan que existen varios usuarios que tienen más de uno de los problemas en sus sistemas instalados, lo cual incrementa la probabilidad de ocurrencia de un accidente. Por ejemplo en la figura 14 se muestra un tanque horizontal de 2 m³ de una instalación comercial que esta accesible a que terceras personas lo puedan manipular, en un sitio de estacionamiento cercano al accionamiento de motores, ubicado en bases que no son firmes y sin anclaje a estas bases de concreto.

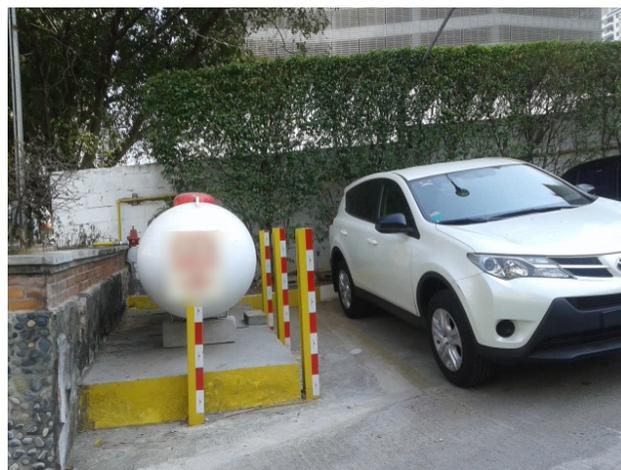


Figura 14. Tanque de GLP junto a motores de combustión, accesible a manipuleo, y sin anclaje fijo.

La figura 15 muestra una combinación de malas prácticas en las tuberías de conducción de GLP.



Figura 15. Falencias en instalación de tuberías de conducción de GLP.

Se ha mostrado una tubería de acero empotrada sobre la cual se hace una derivación en cobre (también empotrada), con una válvula sin la manija de control,

que en caso de una emergencia no está disponible para cierre, y finalmente se observan en las uniones acumulación de grasa, signo que la tubería no ha recibido mantenimiento.

5. Acciones a tener en cuenta para mejorar la seguridad de las instalaciones de GLP en Panamá

La cantidad de usuarios sobre los cuales se ha realizado este análisis es menor comparado con la totalidad de usuarios que utilizan el combustible en Panamá, sin embargo, la ocurrencia de un incidente como una BLEVE o una fuga de gas en fase gaseosa puede involucrar a una gran cantidad de inocentes, los cuales son ajenos a una instalación con problemas.

En instalaciones residenciales estos incidentes suelen acontecer por desconocimiento del sistema instalado y del manejo de los elementos de prevención y seguridad. En los usuarios comerciales e industriales se observa exceso de confianza sobre la seguridad en el manejo del combustible por lo que se descuidan aspectos básicos como el mantenimiento que se debe dar a estos sistemas.

Entre las acciones a tomar en cuenta para el almacenamiento y el transporte del GLP, cumpliendo con los lineamientos mínimos de la Norma Técnica NFPA 58 [14] se pueden mencionar las siguientes:

- Respetar las distancias de seguridad desde los tanques de almacenamiento hasta terceros (tabla 1) con el fin de separar a estos de posibles puntos fuentes de ignición o que pueden magnificar eventos en presencia de fuego.
- No realizar modificaciones de las instalaciones sin las recomendaciones de personal técnico calificado.
- No utilizar materiales no previstos en la norma para conducción del combustible.
- Utilizar los métodos de unión recomendados para los materiales con sus accesorios con el fin de garantizar la hermeticidad.
- Es responsabilidad de los usuarios asesorarse con personal calificado con el fin de disponer de planes de mantenimiento para sus instalaciones.
- Es responsabilidad de la autoridad competente disponer las acciones para supervisión e inspección de los sistemas de GLP cada cierto tiempo, con el fin de garantizar los requerimientos mínimos exigidos en la Norma por parte de los usuarios.

6. Conclusiones

- Las normas y reglamentos establecidos para sistemas de GLP establecen los lineamientos mínimos de seguridad que se deben tener en cuenta en las mismas, por tanto todas las acciones tomadas en pro de la seguridad y que estén sobre dichas normas son válidas y acogidas.
- El riesgo del manejo de un combustible se puede ver magnificado cuando los sistemas que lo almacenan y transportan no brindan condiciones mínimas que están establecidas en normas de referencias tanto nacionales como internacionales.
- El área de mayor riesgo de un sistema de GLP es aquella que contiene los recipientes de almacenamiento del combustible, por lo que las acciones de prevención deben garantizar que estos espacios sean lo más seguro posibles, y que estos recipientes estén alejados de posibles puntos de ignición.
- Cada tubería tiene su aplicación y sus formas correctas de instalarlas, y deben ser instaladas por personal calificado para el efecto.
- Siendo el GLP un combustible de uso generalizado en la población panameña, la seguridad que deben brindar sus sistemas deben interesar a todos, desde el Gobierno Nacional representado por la autoridad competente, pasando por las comercializadoras del combustible, hasta el usuario final.

7. Referencias

- [1] M. A. Johnsen and G. Nardini, "Manual de seguridad: Aspectos de inflamabilidad de los gases hidrocarburos," Naciones Unidas, 2009. [Online]. Available: <http://www.unep.fr/ozonaction/information/mmcfiles/4487-s-safetyfirst.pdf>.
- [2] K. J. Morganti, T. Mun, M. J. Brear, Y. Yang, and F. L. Dryer, "The Research and Motor octane numbers of Liquefied Petroleum Gas (LPG)," *Fuel*, vol. 108, pp. 797–811, 2013.
- [3] R. Kities, P. Mulder, and P. Rietveld, "Energy poverty reduction by fuel switching. Impact evaluation of the LPG conversion program in Indonesia," *Energy Policy*, vol. 66, pp. 436–449, 2014.
- [4] P. Boggavarapu, B. Ray, and R. V Ravikrishna, "Thermal Efficiency of LPG and PNG-fired burners : Experimental and numerical studies," *Fuel*, vol. 116, pp. 709–715, 2014.
- [5] L. Raslavi, S. Mockus, N. Ker, and M. Starevi, "Liquefied petroleum gas (LPG) as a medium-term option in the transition to sustainable fuels and transport," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 32, pp. 513–525, 2014.

- [6] D. Venegas and C. Ayabaca, *Instalaciones de gas licuado de petróleo*, First Edit. 2017.
- [7] F. Chica, F. Espinoza, and N. Rivera, "Gas licuado de petróleo como combustible alternativo para motores diésel con la finalidad de reducir la contaminación del aire," *Ingenius Rev. Cienc. y Tecnol.*, vol. 4, pp. 73–81, 2010.
- [8] Gobierno de Panamá, "Decreto Ejecutivo N.- 25,340 Establecimientos que se dedican a la venta de gas licuado de petróleo para uso automotor," 2005.
- [9] A. Macías, "El proceso de adopción en América Latina," *NFPA J. Latinoam.*, vol. 2, no. 1, p. 6, 2015.
- [10] A. Macías, "Adoptando NFPA en América Latina," *NFPA J. Latinoam.*, vol. 4, no. 1, p. 6, 2013.
- [11] A. Macías, "La adopción de códigos y normas de seguridad ayuda al desarrollo de nuestros países," *NFPA J. Latinoam.*, vol. 3, no. 2, pp. 4–5, 2014.
- [12] D. Bliss, "Normas sin fronteras," *NFPA J. Latinoam.*, vol. 2, no. 1, p. 6, 2016.
- [13] A. Macías, "Primer Foro Latinoamericano de Adopción e Inspección de la Normativa NFPA," *NFPA J. Latinoam.*, vol. 3, no. 2, pp. 8–9, 2016.
- [14] NFPA, *NFPA 58 Código del Gas Licuado de Petróleo Edición 2014*. National Fire Protection Association, 2014.
- [15] NFPA, *NFPA 54 Código Nacional de Gas Combustible*. National Fire Protection Association, 2012.
- [16] ASTM, *ASTM A 53, Especificación estandarizada para tubos, de acero, negro y galvanizado en caliente, con y sin costura*. American Society of Testing and Materials, 1999.
- [17] ASTM, *ASTM A 106, Especificación estandarizada para tubos de acero al carbono sin costura para servicio a altas temperaturas*. American Society of Testing and Materials, 1999.
- [18] ANSI/AGA, *ANSI/AGA LC-1, Sistemas interiores de tuberías de gas combustible que utilizan tuberías de acero inoxidable corrugado*. ANSI/AGA, 1991.
- [19] ASTM, *ASTM B 88, Especificación estandarizada para tubos de cobre sin costura para agua*. American Society of Testing and Materials, 1999.
- [20] ASTM, *ASTM B 280, Especificación estandarizada para tubos de cobre sin costura para servicios de aire acondicionado y refrigeración in situ*. American Society of Testing and Materials, 1999.
- [21] ASTM, *ASTM D 2513, Especificación estandarizada para tuberías y accesorios termoplásticos para gas a presión*. American Society of Testing and Materials, 2000.
- [22] R. Pérez Carmona, *Diseño de instalaciones hidrosanitarias y de gas para edificaciones*, 3a Edición. Bogotá, 2001.
- [23] S. P. Kumar, B. V. S. S. Prasad, G. Venkatarathnam, K. Ramamurthi, and S. S. Murthy, "Influence of surface evaporation on stratification in liquid hydrogen tanks of different aspect ratios," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 32, pp. 1954–1960, 2007.
- [24] H. Albán, "Agencia de Regulación y Control Hidrocarburofero (ARCH) Comercialización del gas licuado de petróleo en el Ecuador," 2016.
- [25] RegO Products, "RegO Catálogo L-102-SV Equipo de Gas LP y Amoníaco Anhidro," 2011. [Online]. Available: <http://www.regoproducts.com/pdfs/L-102SV.pdf>.
- [26] J. Fuentes Rojas and J. Celis, "Instalaciones de gas natural," 2004. [Online]. Available: http://insanita.weebly.com/uploads/5/4/0/0/5400602/instalaciones_de_gas_natural.pdf.
- [27] D. Venegas, J. Yanez, S. Celi, C. Ayabaca, L. Tipanluisa, D. Bastidas, and M. Arrocha, "Materiales recomendados por las Normas Internacionales para utilizar en una instalación de GLP," in *Asociación Española de Ingeniería Mecánica*, 2016.
- [28] D. Venegas, J. Yanez, S. Celi, C. Ayabaca, L. Tipanluisa, D. Bastidas, and M. Arrocha, "Mantenimiento necesario en instalaciones de GLP," in *Asociación Española de Ingeniería Mecánica*, 2016.
- [29] R. K. Eckhoff, "Boiling liquid expanding vapour explosions (BLEVEs): A brief review," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 32, no. 1, pp. 30–43, 2014.
- [30] G. R. Astbury, "A review of the properties and hazards of some alternative fuels," vol. 6, no. January, pp. 397–414, 2008.
- [31] T. Abbasi and S. A. Abbasi, "The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, consequence assessment, management," *J. Hazard. Mater.*, vol. 141, pp. 489–519, 2007.
- [32] G. A. Pinhasi, A. Ullmann, and A. Dayan, "1D plane numerical model for boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE)," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 50, pp. 4780–4795, 2007.
- [33] T. Abbasi and S. A. Abbasi, "The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE) is fifty ... and lives on!," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 21, no. 4, pp. 485–487, 2008.
- [34] D. Venegas and Ó. Farías, "La BLEVE, un motivo para la seguridad en las instalaciones de GLP," in *13o Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica CIBEM*, 2017.
- [35] Panamá América, "Los bomberos atienden dos casos de fugas de gas al día," 2013.
- [36] La Prensa, "Un herido por explosión de gas en apartamento de Río Abajo," 2015.
- [37] La Estrella de Panamá, "Explosión por fuga de gas de cocina en el edificio City Towers," 2015.
- [38] Panamá América, "Accidente de camión de transporte de tanques de gas deja dos heridos," 2015.

Modelado CALPUFF-WRF de la dispersión de PM_x, NO_x y SO₂ emitidos por la Termoeléctrica de Miraflores en el Canal de Panamá

Modeling CALPUFF-WRF of the dispersion of PM_x, NO_x and SO₂ emitted by the Thermoelectric of Miraflores in the Panama Canal

Ricardo De León Ortega ^{1*}, José Fábrega ¹

¹Programa de Doctorado en Ingeniería de Proyectos, Universidad Tecnológica de Panamá, ¹Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas, Universidad Tecnológica de Panamá

¹ricardo.leon2@utp.ac.pa, ¹jose.fabrega@utp.ac.pa

Resumen– En esta primera etapa de la investigación se modeló la dispersión y el transporte de material particulado, óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre emitidos por la Planta Termoeléctrica de Miraflores. Se escogió el modelo CALPUFF por ser el recomendado por la EPA para recorridos mayores de 50 km y donde se presentan cambios de cobertura: agua, suelo. Este modelo, además de ser complejo, requiere el uso de datos continuos en tiempo y espacio para generar resultados válidos. A falta de una cobertura total en estaciones meteorológicas superficiales, recurrimos al uso del modelo meteorológico WRF con el cual se pudo simular el campo de vientos tridimensional para un dominio de 50x50km² con resolución de 4x4km². Los resultados obtenidos que se presentan en este artículo muestran los puntos de mayor concentración promedio de 1h de contaminantes, cuyos valores aplicando la metodología EPA para Puerto Rico como referencia, arrojan buenos índices de calidad del aire.

Palabras claves– Modelado atmosférico, dispersión, CALPUFF, WRF, termoeléctrica de Miraflores, Canal de Panamá.

Abstract– In this first stage of the research the dispersion and transport of particulated material, nitrogen oxides and sulfur dioxide emitted by the Miraflores Thermoelectric Plant were modeled. The CALPUFF model was chosen because it is recommended by the EPA for routes over 50 km and where changes in coverage are presented: water, soil. This model, besides being complex, requires the use of continuous data in time and space to generate valid results. In the absence of total coverage in surface meteorological stations, we used the WRF meteorological model with which the three-dimensional wind field could be simulated for a 50x50km² domain with 4x4km² resolution. The results obtained in this article show the points with the highest average concentration of 1h of pollutants, whose values applying the EPA methodology for Puerto Rico as a reference, yield good air quality.

Keywords– Atmospheric modeling, dispersion, CALPUFF, WRF, thermoelectric power plant in Miraflores, Panama Canal.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 27 de febrero de 2017

Fecha de Aceptación: 25 de septiembre de 2017

1. Introducción

La mayoría de las actividades humanas y los procesos naturales producen contaminantes al aire, no todos problemáticos, sin embargo, algunas formas se estiman estar relacionadas con muertes prematuras en todo el mundo [1]. La concentración en la cual un contaminante atmosférico alcanza a la población depende directamente de cuán disperso esté el mismo en el aire. El modelado de dispersión es una técnica poderosa para evaluar si una fuente emisora de

contaminantes atmosféricos representa o no un problema. Históricamente el modelado de dispersión ha sido campo para meteorólogos, sin embargo, en la actualidad es una herramienta importante en estudios académicos de calidad de aire y en la práctica profesional de ingenieros ambientales. La aproximación basada en clases de estabilidad atmosférica de los modelos de dispersión utilizados en el pasado, ha sido reemplazada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de

América (EPA) por modelos numéricos que requieren de la parametrización continua de las variables, meteorológicas y de emisión, relacionadas con la dispersión atmosférica. Esto conlleva, un método semi-empírico donde las ecuaciones matemáticas de la dispersión se calibran con observaciones para que el modelo genere resultados. En esta investigación se utilizó el modelo de dispersión de licencia libre más reciente aprobado por la EPA: CALPUFF v.5.8.5 [2]. Es un modelo gaussiano de dispersión de contaminantes en forma de nubes (*puff*), cuya primera versión fue desarrollada a finales de los 80's [3]. El objetivo fue modelar la dispersión y el transporte de material particulado (PM_x), óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de azufre (SO₂) que son los contaminantes típicos de la combustión fósil. Se escogió como fuente fija la Planta Termoeléctrica de Miraflores del Canal de Panamá, dada la importancia relevante del área utilizada para múltiples actividades donde convergen residentes y visitantes tanto nacionales como extranjeros. Este tipo de trabajo no ha sido realizado en el Canal de Panamá y se espera que las concentraciones de contaminantes atmosféricos calculadas por CALPUFF, a partir de las emisiones medidas, sirvan de referencia para una gestión ambiental en el área y el buen funcionamiento de la Planta. CALPUFF requiere un modelo meteorológico CALMET, la caracterización de la fuente de emisión para calcular la dispersión y el transporte con CALPUFF y finalmente, el cálculo de concentraciones en la zona de estudio con CALPOST.

2. Caracterización de la Planta Termoeléctrica de Miraflores como fuente fija de emisión

La Planta Termoeléctrica de Miraflores, ubicada a un costado de las esclusas del mismo nombre a la entrada Pacífica del Canal de Panamá, inicia en 1925 como Planta de Generación Eléctrica con la instalación de máquinas de pistones en el edificio donde operaba una subestación desde 1914, cuando el Canal de Panamá inició sus operaciones [4].

Al momento de esta investigación, la misma contaba con 8 motores (ver tabla 1), unos a diésel y otros a búnker, de los cuales se contaba con el informe de emisiones de los motores 6, 7 y 8 medidas en febrero de 2012 (ver tabla 3). El informe de 2013 estaba bajo revisión aún.

Las unidades 6, 7 y 8 pertenecen a un motor de combustión interna que utiliza búnker para su operación y diésel para el arranque y parada de la unidad [5].

La ubicación geográfica de las chimeneas de estos motores se muestra en la figura 1 y en la tabla 2 [6].

Tabla 1. Motores operativos en la Planta Termoeléctrica de Miraflores al momento de la investigación

Unidad	Tipo de Máquina	Combustible	P en MW	Condición
1	Turbina de gas	Diésel	9	No operativa
2	Turbina de gas	Diésel	9	No operativa
3	Turbina de vapor	Búnker	22	Fuera de servicio por averías
4	Turbina de vapor	Búnker	24	Fuera de servicio por averías
5	Turbina de gas	Diésel	18	No operativa
6	Motor de combustión interna	Búnker	18	Operativa
7	Motor de combustión interna	Búnker	18	Operativa
8	Motor de combustión interna	Búnker	18	Operativa



Figura 1. Localización de las chimeneas de los motores 6, 7 y 8 de la Planta Termoeléctrica de Miraflores. Imagen de Google Earth.

Tabla 2. Coordenadas UTM WGS84 de las chimeneas de los motores 6, 7 y 8 de la Planta Termoeléctrica de Miraflores

Unidad	Latitud Y en m Norte	Longitud X en m Este
6	995 209	654 899
7	995 193	654 888
8	995 190	654 899

Tabla 3. Emisiones de PMx, NOx y SO₂ en los motores 6, 7 y 8 de la Planta Termoeléctrica de Miraflores medidas del 27 al 29 de febrero de 2012

Unidad	Caudal Medido (Nm ³ /s)	Concentración Medida (mg/Nm ³)		
		PMx	NOx	SO ₂
6	67.6044	30.44	85.25	435.89
7	59.4391	56.34	70.66	376.62
8	54.5018	40.46	75.56	375.00
Emisión ponderada (mg/Nm ³)		41.91	77.54	398.15
Emisión ponderada (ton/día)		0.20	0.39	2.06
Emisión ponderada (ton/año)		79.83	147.21	755.80
Método de medición		EPA Método 5	EPA Método 7	EPA Método 6

Tabla 4. Datos de la Chimenea Equivalente como Fuente Fija de Emisión para el Modelado CALPUFF

Unidad	Diámetro interior (m)	Altura (m)	Velocidad del gas (m/s)	T (K)
6	1.61	-----	33.2073	621.73
7		-----	29.1965	596.40
8		-----	26.7713	597.82
Equivalente	1.61	30*	29.72	605.32
Latitud, m	995 199.5			
Longitud, m	654 895.7			
Elevación, m	19.60**			

*estimación in situ, de la base respecto al NMM.

**valor calculado por el programa CALPUFF utilizando el Modelo Digital del Terreno.

Para la modelación CALPUFF [7] se reemplazaron las tres chimeneas por una sola equivalente cuya posición se calculó en el centroide del triángulo formado por las chimeneas 6, 7 y 8. Esta chimenea equivalente tiene la misma configuración geométrica de

las chimeneas originales. Altura de 30 m y diámetro interno de 1.61 m. La emisión, calculada a partir de las concentraciones medidas, será la ponderada de los tres motores de acuerdo a lo establecido en el Decreto Ejecutivo No.5 de 4 de febrero de 2009, "Por el cual se dictan normas ambientales de emisiones de fuentes fijas" [6]. El factor de ponderación para cada motor será igual a su caudal medido entre el caudal total emitido por los tres motores. La suma de los productos de cada factor de ponderación por la concentración medida del contaminante dará como resultado su emisión ponderada.

3. Modelado Meteorológico CALMET

3.1 Datos de Entrada

El modelo WRF (*Weather Research and Forecasting Model*) [8] es un sistema numérico de última generación para la predicción del clima a mesoescala (de 10 Km hasta cientos de km) que puede generar simulaciones atmosféricas utilizando datos reales (observaciones o análisis) o condiciones idealizadas.

Para la investigación se escogió un dominio de 50x50 km², cuyo centro se ubicó aproximadamente en el centro del Canal de Panamá (9°06'44"N, 79°45'55"W, WGS84) con un cuadrículado de 4x4 Km², 35 niveles verticales con el nivel más bajo a 20 m del suelo. El modelo WRF generó, a partir de datos reales (medidos y de análisis) una meteorología simulada tridimensional para el dominio de estudio, correspondiente al año 2014, del 1 de enero a las 0:00 h hasta el 31 de diciembre a las 23:00 h. (ver figura 2).



Figura 2. Dominio para el modelo meteorológico WRF.

Este modelo meteorológico tridimensional se georeferenció a una cuadrícula de mayor resolución que contenía el uso y la cobertura del suelo, además de la

configuración del terreno. Como Modelo Digital del Terreno se utilizó el SRTM1 (*Shuttle Radar Topography Mission Global Coverage*) Versión 3, cuya precisión es de 30 m (aproximadamente 1") [9]. Este modelo contiene información sobre las elevaciones utilizando el WGS84 como referencia geodésica con una cobertura global entre 56° de Latitud Sur a 60° de Latitud Norte (ver figura 3).

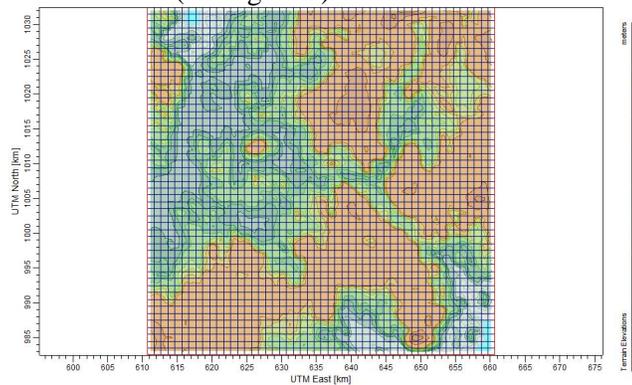


Figura 3. Modelo del Terreno extraído del SRTM1 para el dominio de estudio en una cuadrícula de 1x1 km² de resolución espacial.

Para el uso del suelo y cobertura se utilizó el GLCC (*Global Land Cover Characterization*) [10], específicamente los datos de Uso del Suelo y Cobertura para América del Norte. Este modelo de uso del suelo y cobertura global tiene una resolución de 1 km (30" aproximadamente), la información contenida fue obtenida por la unidad de ciencias de la Tierra y sensorado remoto (*Earth Science and Remote Sensing Unit, ESRS*) de la NASA (Agencia Espacial de los Estados Unidos de América) y utiliza la proyección Lambert Equiárea Azimutal como referencia cartográfica (ver figura 4).

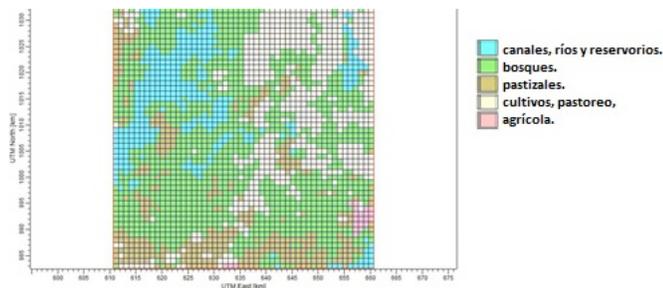


Figura 4. Modelo de uso del suelo y cobertura extraído del GLCC para el dominio de estudio en la cuadrícula de 1x1 km² de resolución espacial.

3.2 Procesado y Resultados

Con los datos de entrada geodésicos (modelo digital del terreno, uso del suelo y cobertura) y los datos del modelo WRF postprocesados para que fueran compatibles con CALMET [11], se especificó una cuadrícula de 1x1 km² para generar el campo de vientos tridimensional que se ajuste a la forma del terreno y al tipo de cobertura. Los resultados del procesado CALMET se muestran en las figuras 5 y 6.

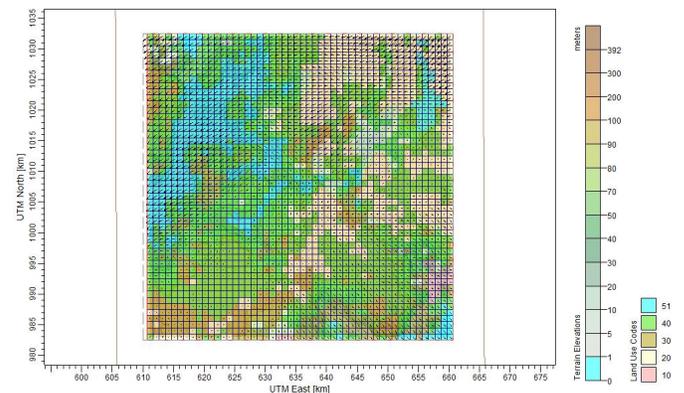


Figura 5. Modelo Meteorológico CALMET donde se muestra la dirección del viento en cada celda para el dominio de estudio en una cuadrícula de 1x1 km² de resolución espacial.

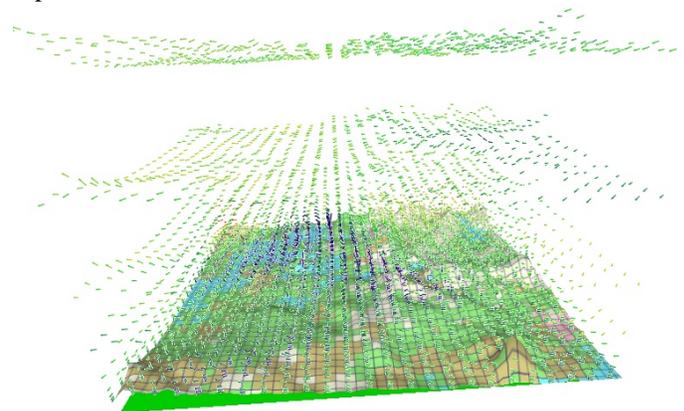


Figura 6. Modelo Meteorológico CALMET muestra la variación tridimensional de los vientos tanto en dirección como en velocidad, entre otras variables meteorológicas.

4. Modelado de dispersión CALPUFF

4.1 Área de Muestreo y cuadrícula discreta

Adicional al campo de vientos tridimensional generado por CALMET, el programa permite escoger un área de muestreo y análisis menor al dominio de estudio, para evitar errores de borde y demorar menos los cálculos de CALPUFF.

Para ello, CALPUFF pidió el rango de pixeles a considerar en las direcciones X e Y. El dominio total fue de 50 pixeles de 1x1 km² en cada dirección, se le indicó al programa que considerara como cuadrícula de muestreo del 2 al 50 en ambas direcciones. Una vez definida la cuadrícula de muestreo, ésta se transformó a una red de puntos llamados receptores. Para ello, CALPUFF calculó las coordenadas del centro de cada pixel transformando la cuadrícula a discreta.

4.2 Fuente de Emisión de Contaminantes a modelar

Como fuente puntual fija se escogió la chimenea equivalente a los motores 6, 7 y 8. El programa CALPUFF requiere como datos de entrada: las coordenadas de la chimenea equivalente, la elevación de la base respecto al Nivel Medio del Mar (NMM), la altura de la chimenea, la temperatura promedio del gas en la chimenea en Kelvin, el diámetro interior en m y la velocidad del gas en la salida de la chimenea en m/s.

4.3 Contaminantes a modelar

Finalmente, se escogieron las especies a modelar: PMx, NOx, SO₂ y se introdujeron las emisiones estimadas en ton/año a partir de las concentraciones medidas de los contaminantes en los gases de salida, suministradas por la ACP en el Informe de Ensayo de Emisiones de 2012. Debido a que la medición se realiza una vez al año con los motores trabajando a la potencia recomendada por el fabricante (17 MW), la emisión de contaminantes se consideró constante para el modelado.

4.4 Procesado y resultados

Se corrió CALPUFF con los parámetros recomendados en defecto. En estos receptores, el programa calculó las concentraciones y los flujos de deposición horarios de cada contaminante modelado.

Para esta investigación fue de interés solo las concentraciones calculadas a nivel de terreno.

5. Procesado y resultados CALPOST

CALPOST es el tercer componente modelador de CALPUFF, el cual calculó la concentración promedio a nivel de terreno y el flujo de deposición promedio de cada contaminante modelado para periodos específicos de tiempo (1 h, 3 h, 24 h, 1 año), a partir de los resultados CALPUFF (ver tabla 5). Igualmente, determinó en qué receptores se dan las concentraciones

promedios más altas para cada contaminante y en qué momento (ver tabla 6). CALPOST arrojó los resultados en tablas y gráficos (ver figuras 7 a 10) con el visor CALPUFF View v 8.4.0 de *Lakes Environmental Software*.

Tabla 5. Concentraciones máximas calculadas por CALPUFF para la dispersión y transporte de PMx, NOx y SO₂ emitidos por la Planta Termoeléctrica de Miraflores para el año 2014

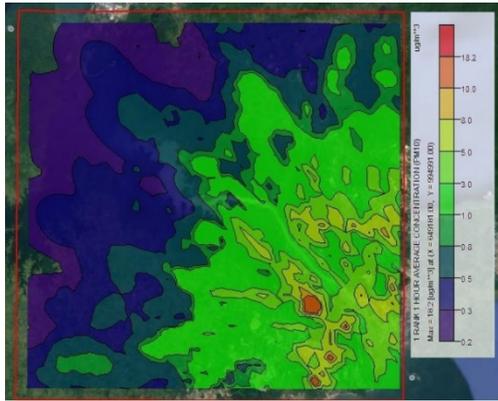
Periodo	Concentración máxima (µg/Nm ³)			Momento y lugar	
	PMx	NOx	SO ₂	Día Hora	Y (m, N) X (m, E)
1h	18.186	33.097	169.950	12/oct 4:00	994 991 649 181
3h	6.948	12.648	64.948	12/oct 2:00	
24h	1.367	2.479	12.730	11/oct 23:00	
1 año	0.119	0.222	0.113	----	995 991 654 181

Tabla 6. Concentraciones máximas promedio en 1h calculadas por CALPUFF para la dispersión y transporte de PMx, NOx y SO₂ emitidos por la Planta Termoeléctrica de Miraflores para el año 2014 y su correspondiente Índice de Calidad de Aire calculado con los parámetros de la EPA

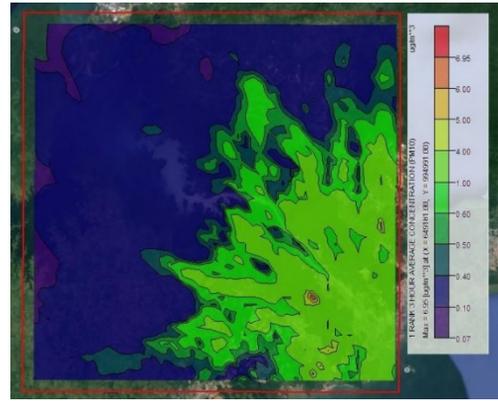
Contaminante Periodo	Concentración en µg/Nm ³ y ppb	AQI** (EPA)	Categoría Efecto a la salud	Personas en riesgo
PMx 1h	18.186 ----	17	Bueno Ninguno	Personas con enfermedades respiratorias.
NOx 1h	33.097 17.601*	16	Bueno Ninguno	Personas con asma u otra enfermedad respiratoria, los adultos mayores y niños.
SO ₂ 1h	169.950 64.959*	86	Moderado Ninguno	Personas con asma.

*Calculado con el convertidor de µg/Nm³ a ppb para gases.

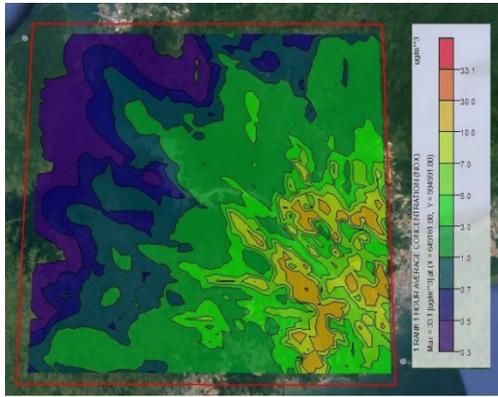
** Air Quality Index calculado a partir de las concentraciones en ppb para los gases y en µg/m³ para las PMx.



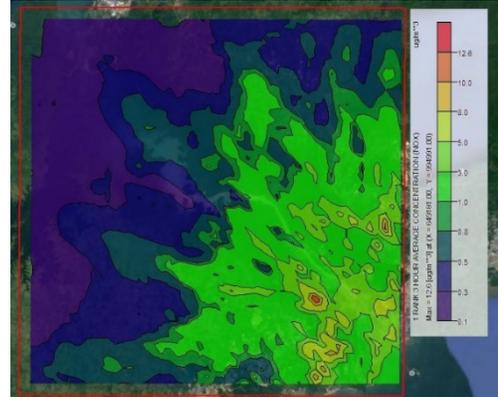
PMx



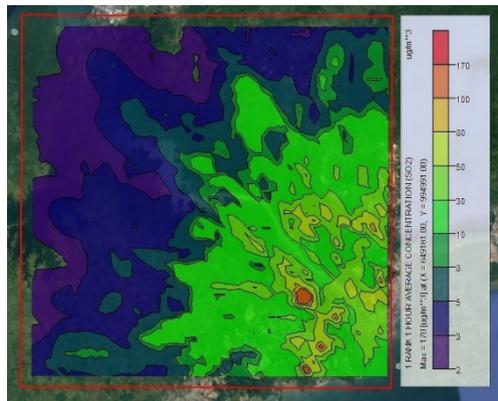
PMx



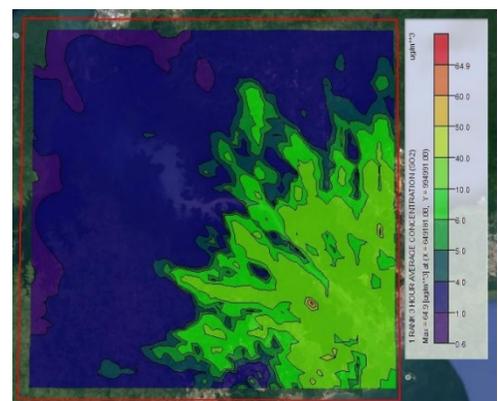
NOx



NOx



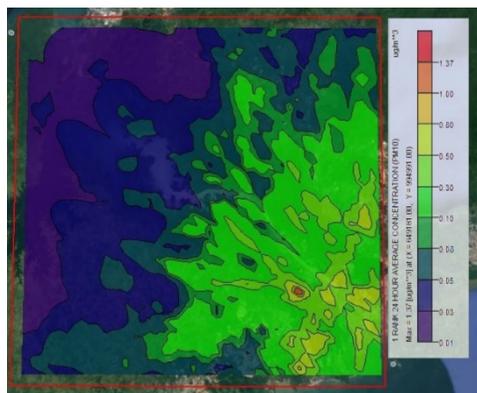
SO₂



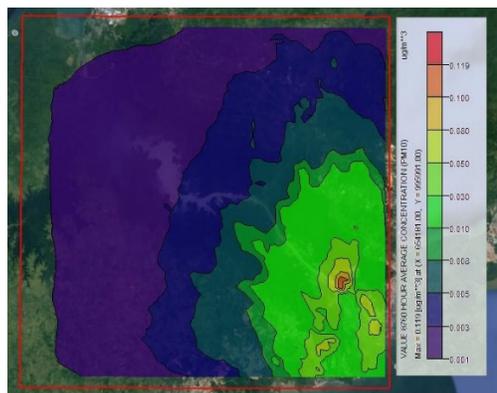
SO₂

Figura 7. Concentraciones promedio en 1h para PMx, NOx y SO₂ en el dominio de estudio en µg/Nm³. Gráficos de CALPUFF View v.8.4.0 montados sobre una imagen de Google Earth del área.

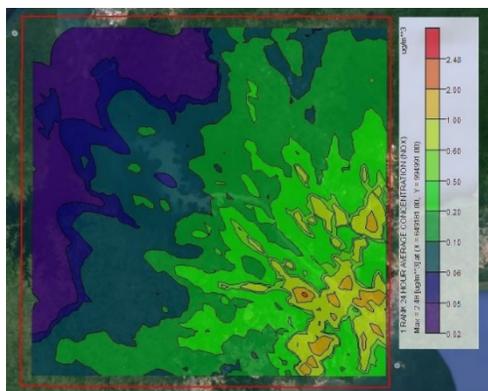
Figura 8. Concentraciones promedio en 3h para PMx, NOx y SO₂ en el dominio de estudio en µg/Nm³. Gráficos de CALPUFF View v.8.4.0 montados sobre una imagen de Google Earth del área.



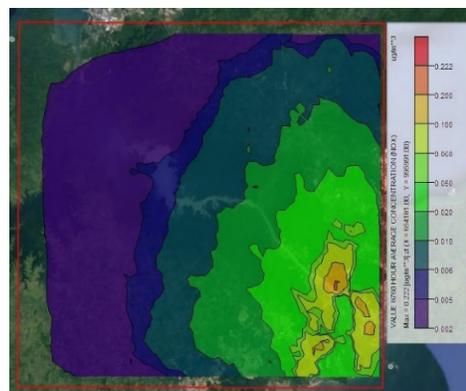
PMx



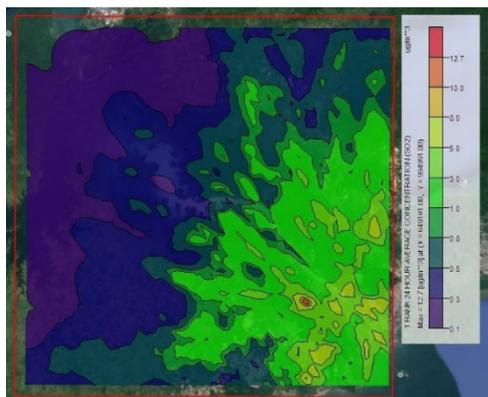
PMx



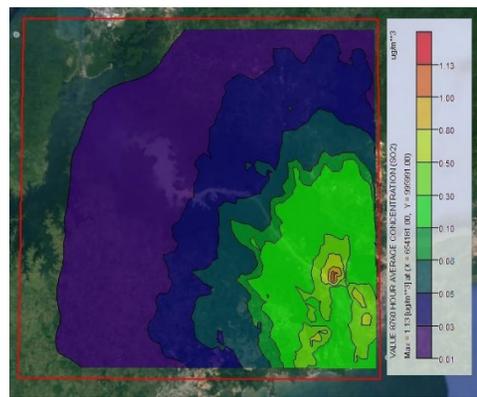
NOx



NOx



SO₂



SO₂

Figura 9. Concentraciones promedios en 24h para PMx, NOx y SO₂ en el dominio de estudio en µg/Nm³. Gráficos de CALPUFF View v.8.4.0 montados sobre una imagen de Google Earth del área.

Figura 10. Concentraciones promedios en 1 año para PMx, NOx y SO₂ en el dominio de estudio en µg/Nm³. Gráficos de CALPUFF View v.8.4.0 montados sobre una imagen de Google Earth del área.

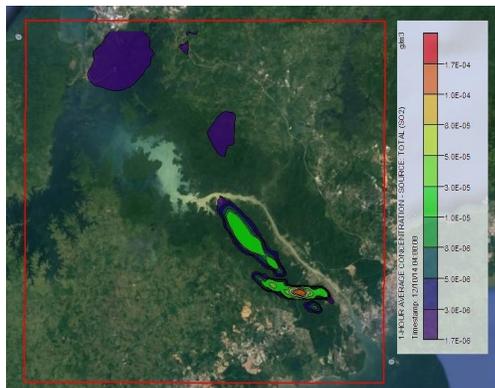


Figura 11. Pluma de dispersión de contaminantes provenientes de la Planta Termoelectrica de Miraflores en el momento de mayor concentración promedio de 1h: 12 de octubre de 2014 a las 4:00 h. Gráfico de CALPUFF View v.8.4.0 montado sobre una imagen de Google Earth del área.

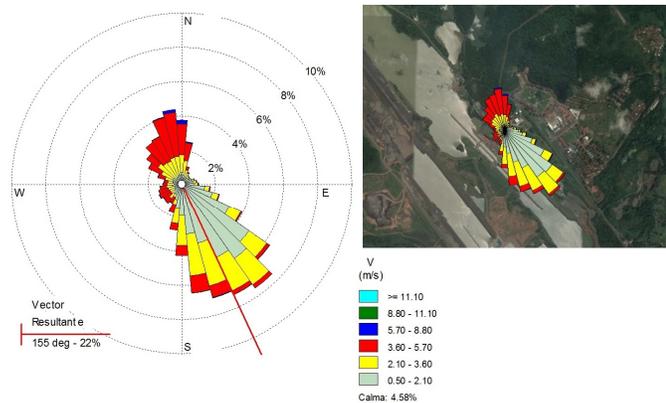


Figura 12. Rosa de los vientos localizada en Planta Termoelectrica de Miraflores. Muestra la distribución estadística de los vientos durante el año 2014. Gráfico de CALPUFF View v.8.4.0 montado sobre una imagen de Google Earth del área.

6. Resultados

Para los tres contaminantes modelados, el comportamiento de dispersión fue similar. Las concentraciones promedio mayores se presentaron en un período de 1h y fueron disminuyendo al aumentar el periodo de modelado como era de esperarse. Siendo los valores mayores para las concentraciones de SO₂ y los menores para el material particulado PM_x. (ver figuras 7 a 10).

Las gráficas presentan, además, la distribución espacial de las concentraciones de contaminantes en el dominio de estudio. Los rangos de valores de concentraciones en 1h variaron de 0.2 a 18.2 µg/Nm³ para las PM_x, de 0.3 a 33.1 µg/Nm³ para los NO_x y de 2 a 170 µg/Nm³ para los SO₂. Las máximas concentraciones para los tres contaminantes se presentaron a 5 718.5 m al Suroeste de la fuente de emisión y la distribución de concentraciones de mediano valor en la escala de variación fue la de mayor cobertura espacial (ver figuras 7 y 13).

Los rangos de valores de concentraciones en 3h variaron de 0.07 a 6.95 µg/Nm³ para las PM_x, de 0.1 a 12.6 µg/Nm³ para los NO_x y de 0.6 a 64.9 µg/Nm³ para los SO₂. La distribución de concentraciones para este período de modelado fue de menor cobertura espacial que para 1h, sin embargo, las máximas concentraciones de contaminantes se presentaron en el mismo punto (ver figura 8).

Los rangos de valores de concentraciones en 24h variaron de 0.01 a 1.37 µg/Nm³ para las PM_x, de 0.02 a 2.48 µg/Nm³ para los NO_x y de 0.1 a 12.7 µg/Nm³ para los SO₂. La distribución de concentraciones para este período de modelado fue bastante similar que para 1h, tanto en cobertura espacial de valores medios de concentración en la escala de variación como en el punto donde se presentaron las mayores concentraciones (ver figura 9).

Los rangos de valores de concentraciones en 1 año variaron de 0.001 a 0.119 µg/Nm³ para las PM_x, de 0.002 a 0.222 µg/Nm³ para los NO_x y de 0.01 a 1.13 µg/Nm³ para los SO₂. La distribución de concentraciones para este periodo de modelado fue la de menor cobertura espacial y las mayores concentraciones se presentaron a 1 066 m al Noroeste de la Fuente de Emisión (ver figuras 10 y 13).



Figura 13. Localización de la Fuente de Emisión Fija y los receptores para mayor concentración de contaminantes

modelados en periodos de 1h, 3h, 24h y 1 año en 2014. Imagen de *Google Earth* del área de estudio.

Otras herramientas del programa *CALPUFF View* v.8.4.0 de *Lakes Environmental* incluyen la animación de la pluma de dispersión para el período de modelado. En la figura 11 se muestra la simulación de la pluma para el momento de mayor concentración promedio de 1h, el 12 de octubre de 2014 a las 4:00 h.

Otra herramienta de utilidad es la rosa de los vientos presentada en la figura 12, donde se da la distribución de los vientos por rangos de velocidad, dirección y frecuencia de ocurrencia expresada en porcentaje. Durante 2014, se presentaron períodos de calma en 4.8%, vientos de 5.70 a 8.80 m/s en 0.6%, de 3.60 a 5.70 m/s en 19.8%, de 2.10 a 3.60 en 27.8% y de 0.5 a 2.10 m/s en 47%. El vector promedio hacia donde sopló el viento, tomando como referencia la chimenea equivalente de la Planta Termoeléctrica de Miraflores, tuvo una dirección de 141° con frecuencia de ocurrencia de 22%.

Comparando las figuras 11 y 12 se observa que el momento de mayores concentraciones coincide con vientos de 3.6 a 5.70 m/s de 19.8% de frecuencia de ocurrencia y en dirección opuesta al vector promedio que representa la dirección preponderante del viento, según la data del año 2014.

7. Conclusiones

Esta investigación aplicada, en su primer avance de modelado, utilizó los datos de mediciones de las emisiones de contaminantes provenientes de los tres motores de combustión interna operativos en enero de 2014, en la Planta Termoeléctrica de Miraflores, suministrados por la ACP. Actualmente, la planta cuenta con dos motores adicionales de combustión interna a base de búnker (motores 9 y 10) conectados a un precipitador de partículas, lo cual disminuye la contaminación, sin embargo, las emisiones de estos dos motores deberán tomarse en cuenta en el próximo modelado.

Los resultados obtenidos de la distribución de concentraciones han sido de utilidad para determinar el área real de influencia de la Planta Termoeléctrica de Miraflores e identificar los puntos receptores donde el programa calculó las mayores concentraciones de contaminantes. Estos resultados deberán ser comparados, en la próxima etapa de la investigación,

con mediciones en campo de las concentraciones de PMx, NOx y SOx. Teniendo en cuenta la actividad propia del Canal de Panamá, con toda seguridad las concentraciones medidas en campo estarán influenciadas por otras fuentes de estos contaminantes. Sin embargo, se espera puedan ser correlacionados con los resultados calculados por el modelo CALPUFF.

La fortaleza de este primer modelado radica en la utilización de los datos del modelo meteorológico regional WRF con el cual se logra un modelo meteorológico tridimensional más completo que el obtenido con datos meteorológicos superficiales. Sin embargo, el problema es la resolución de 4x4km², con la cual CALMET trabajó para ajustar los datos a una cuadrícula de 1x1km². En la siguiente etapa de la investigación se desea complementar los datos del modelo WRF con los datos meteorológicos de por lo menos dos estaciones superficiales cercanas a la fuente fija (Aeropuerto de Albrook, Esclusas de Pedro Miguel) y los datos de radiosonda lanzada cada 15 días en Corozal. De esta forma se logrará un modelo meteorológico CALMET con resolución 1x1km² más acorde al área de estudio.

Esta investigación solo contempla el transporte y la difusión de los contaminantes modelados. Sin embargo, para contaminantes que sufren transformaciones químicas, como el NOx, será interesante ajustar los valores calculados por CALPUFF tomando en cuenta estas transformaciones.

Finalmente, las concentraciones máximas promedios en 1h para los tres contaminantes modelados, se utilizaron para calcular el Índice de Calidad de Aire (*Air Quality Index*, AQI). Este índice varía para cada región y al no contarse con los mismos para Panamá, se utilizó el calculador de AQI con los datos de Puerto Rico y la metodología establecida por la EPA [12].

8. Agradecimiento

Agradecemos a los directivos y personal técnico de la División de Ambiente de la Autoridad del Canal de Panamá, por la información suministrada para esta investigación durante la pasantía realizada del 15 de enero al 15 de abril de 2014.

El reconocimiento a la empresa canadiense *Lakes Environmental Software* por el apoyo con la data WRF para el dominio de estudio y el visor de resultados

CALPUFF View v.8.4.0 sin los cuales los resultados de esta investigación hubiesen sido limitados.

El reconocimiento al Dr. José Fábrega, director de esta investigación y al personal del CIHH de la Universidad Tecnológica de Panamá por su apoyo técnico durante el desarrollo de este avance.

9. Referencias

- [1] A. D. Visscher, *Air Dispersion Modeling: Foundations and Applications*, Nueva York: John Wiley & Sons, Inc., 2014.
- [2] United State Environmental Protection Agency, «Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling,» EPA, 27 septiembre 2016. [En línea]. Available: https://www3.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm. [Último acceso: 22 febrero 2017].
- [3] Joseph S. Scire, David G. Strimaitis, Robert J. Yamartino. *A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model (Version 5)*, Concord: Earth Tech Inc., 2000.
- [4] A. G. González, «Una visita a la termoeléctrica Miraflores en el Canal de Panamá,» *Panama Hitek*, 25 marzo 2015. [En línea]. Available: <http://panamahitek.com/una-visita-a-la-termoelectrica-miraflores-en-el-canal-de-panama/>. [Último acceso: 20 febrero 2017].
- [5] Instituto Especializado de Análisis de la Universidad de Panamá, *Informe de Mediciones provenientes de la Planta Termoeléctrica de Miraflores*, Panamá: Universidad de Panamá, 2009.
- [6] Laboratorio Ambiental y de Higiene Ocupacional EnviroLAB S.A., *Informe de Ensayo de Emisiones de Fuentes Fijas Significativas*, Panamá: EnviroLAB S.A., 2012.
- [7] Jesse L. Thé, Cristiane L. Thé, Michael A. Johnson. *Calpuff View: User Guide V.8.4*, Ontario: Lakes Environmental Software, 2016.
- [8] Weather Research and Forecasting Model, «Home page,» WRF Board, abril 2016. [En línea]. Available: <http://wrf-model.org/index.php>. [Último acceso: 20 febrero 2017].
- [9] USGS, «Home page,» Shuttle Radar Topography Mission (STRM), enero 2015. [En línea]. Available: <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc>. [Último acceso: 22 febrero 2017].
- [10] USGS, «Home page,» Global Land Cover Characterization (GLCC), enero 2015. [En línea]. Available: <https://lta.cr.usgs.gov/GLCC>. [Último acceso: 20 febrero 2017].
- [11] Joseph S. Scire, Françoise R. Robe, Mark E. Fernau, Robert J. Yamartino. *A User's Guide for the CALMET Meteorological Model (Version 5)*, Concord: Earth Tech Inc., 2000.
- [12] Air Now, «Air Quality Index (AQI) Basics,» AQI, 31 agosto 2016. [En línea]. Available: <https://airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.aqi>. [Último acceso: 20 febrero 2017].

Caracterización del efluente en el proceso de transformación de bauxita a alúmina en la empresa Corporación Venezolana de Guayana – Bauxilum, Ciudad Guayana, Venezuela

Characterization of the effluent in the transformation process of bauxite to alumina at the company Corporación Venezolana de Guayana - Bauxilum, Ciudad Guayana, Venezuela

Jorge Abud¹, Luis Araya^{2*}, Jessica López³

¹ Departamento de Geología, Universidad de Oriente, ² Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Oriente,

³ Departamento de Minas, Universidad Central de Venezuela.

¹ Jorgeabuds@yahoo.com, ² le.araya@udo.edu.ve, ³ jessimerlop@gmail.com

Resumen- El área de descarga que sirve como cuerpo receptor del efluente industrial que se genera en la planta de alúmina de la empresa Bauxilum, recorre un canal abierto de aproximadamente 650 metros de longitud. Sin embargo, se observan flujos de agua que llevan consigo partículas sólidas y sustancias químicas que se dirigen al canal. Se tomaron 15 muestras de suelo, se seleccionaron 6 de ella. Los análisis granulométricos indican que estos suelos son del tipo SC (suelos arenosos con tamaños de partículas uniformes, con arcillas inorgánicas de baja plasticidad y material gravoso de transición entre roca descompuesta y el suelo). En relación con los análisis químicos se determinó que los suelos son altamente alcalinos, presentando altas concentraciones de sodio (rango entre 5,59% y 8,22%), hierro (rango entre 5,56% y 7,53%) y aluminio (rango entre 10,15% y 18,36%), considerándose ser suelos alcalinos. Estos sedimentos tienen altos niveles de contaminación ambiental, por lo tanto, se deben valorizar para su uso industrial, de esta forma se podría disminuir la potencial afectación de las áreas aledañas a la planta de alúmina.

Palabras clave- Área de descarga, sedimento, efluente, partículas sólidas.

Abstract- Discharge area that serves as a receiving body of industrial effluent produced in the alumina plant Bauxilum company, runs an open channel of approximately 650 meters long. However, water flows that carry solid particles and chemicals that target channel are observed. 15 soil samples were taken, 6 are selected. According to the granulometric analysis obtained, these soils are SC type (sandy soils with uniform particle sizes, with inorganic clays of low plasticity and gravel material between broken rock and soil). In relation to chemical analysis it was determined that the soils are highly alkaline, having high concentrations of sodium (range from 5,59% to 8,22%), iron (range from 5,56% to 7,53%) and aluminum (ranging from 10,15% to 18,36%), which are considered to be alkaline soils. These sediments have high levels of environmental contamination, therefore, they must be valued for their industrial use, in this way it could reduce the potential impact of the areas surrounding the alumina plant.

Keywords- Discharge area, sediment, effluent, solid particles.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 22 de febrero de 2017

Fecha de Aceptación: 25 de septiembre de 2017

1. Introducción

La bauxita es un material heterogéneo que consiste principalmente en uno o más minerales de hidróxido de aluminio, tales como gibbsita [Al(OH)₃], boehmita [AlO(OH)] o diaspore [HAlO₂], además de diversos

combinaciones de sílice [SiO₂], aluminosilicatos (por ejemplo, arcilla), óxido de hierro [Fe₂O₃], óxido de titanio [TiO₂] y otras impurezas en cantidades traza [1]. Las cantidades de bauxita laterítica formada en climas ecuatoriales comprenden aproximadamente el 90% de

las reservas mundiales de bauxita explotables [2]. Los procesos de meteorización han dado lugar a un perfil típico en el que el material aluminoso valioso radica en su parte superior de una base de aluminosilicato (a menudo arcilla) y se ha formado a través de la lixiviación de sílice [3].

El lodo rojo es el residuo sólido generado por la refinación de alúmina del mineral de bauxita, principalmente mediante el proceso Bayer, que utiliza sosa cáustica para disolver el silicato de aluminio. La producción de 1 tonelada de alúmina genera entre 1 y 1,5 toneladas de lodo rojo [4]. En el proceso Bayer, la bauxita se disuelve en una solución de hidróxido de sodio a temperaturas que van desde 100 °C a 250 °C, dependiendo de la forma de la alúmina, corindón y esmeril, en la bauxita [5]. Con la creciente demanda de alúmina en todo el mundo, la generación de lodo rojo se estima en más de 120 millones de toneladas anuales, sobre una proyección de la tasa de producción para año 2015 [6]. El contenido sódico alcalino también causa la formación de superficies de polvo [7].

La bauxita es el principal mineral para la producción de metal de aluminio a través de un proceso de dos etapas que implica, en primer lugar, el refinado de la bauxita en alúmina por un proceso de lixiviación cáustica químico húmedo (el proceso Bayer) y, en segundo lugar, la reducción electrolítica de alúmina a metal aluminio (el proceso Hall-Hérault) [8].

El proceso Bayer es el principal método para la producción de alúmina a partir de bauxita en todo el mundo. La versión moderna del proceso (desarrollado en la década de 1880) todavía mantiene los pasos clave para la disolución de alúmina con presencia de minerales a través del proceso de solución cáustica caliente, es decir la separación de la insoluble mediante las fases de transformación de la bauxita a la alúmina, seguido de precipitación de gibbsita y la calcinación de la gibbsita a alúmina [9].

Como consecuencia de la descarga del efluente proveniente de la planta de alúmina de Bauxilum, el área que sirve como cuerpo receptor del mismo ha sufrido perturbaciones; ya que el líquido vertido se infiltra en la capa más superficial del suelo, acelerando su proceso de erosión por el aumento del agua de escorrentía durante la época de lluvia; el cual se ve acentuado debido a la baja presencia de cobertura vegetal. En tal sentido, en la búsqueda de alternativas de solución para la adecuación ambiental del canal colector de la planta de alúmina, se ha tomado la iniciativa de

realizar una caracterización del efluente en el proceso de transformación de la bauxita a alúmina.

En la empresa Bauxilum, el área de planta se encarga de los procesos de transformación de la bauxita a la alúmina mediante el proceso Bayer; durante este proceso de transformación se generan contaminantes sólidos y disueltos, producto de las actividades industriales, específicamente las actividades que realizan en el Área 55 (Lavado de Oxalato), Área 58 (Filtración de Semilla Gruesa y Producto), Área 45 (Calcinación) y Área 77 (Silos de alúmina); que se encuentran cercanas al efluente en estudio y que de alguna manera contribuyen a través de sus procesos de transformación a la contaminación del mismo. El principal problema es la alteración de la calidad del efluente producto de las actividades industriales, adicionalmente, este efluente descarga en un área donde se observa la degradación del suelo.

2. Materiales y métodos

La metodología que se utilizó en el área de descarga es de tipo analítica y de campo, se realizaron varias visitas preliminares para el reconocimiento y diagnóstico. A través de la observación directa se describieron las características del efluente y del área donde descarga este vertido. Para la caracterización de los suelos se realizaron análisis químicos de las muestras tomadas a lo largo del canal colector, con la finalidad de determinar los elementos químicos que contengan en los sedimentos.

Las muestras de sedimentos fueron tomadas en las zonas de mayor representatividad y de fácil acceso, los sitios para la toma de muestras se seleccionaron mediante un muestreo aleatorio. Luego se procedió a la elaboración de calicatas de 40 cm de ancho x 40 cm de largo, y la profundidad que se alcanzó fue la máxima permitida por el terreno, con un promedio de 30 cm.

En total se tomaron 15 muestras de suelo, se realizaron los análisis granulométricos, de los cuales a través de un muestreo aleatorio considerando el espaciamiento del terreno, se seleccionaron cada 100 m seis de ellas para realizarle los análisis físicos y químicos.

En la tabla 1 se presentan las herramientas que se utilizaron en campo para la recolección de muestras de suelo y de agua.

Tabla 1. Materiales y equipos utilizados para el muestreo

Tipo de muestra	Herramienta utilizada
Muestras de suelo	<ul style="list-style-type: none"> ○ Posicionador satelital (GPS) ○ Cinta métrica ○ Bolsas plásticas ○ Marcador ○ Libreta ○ Cámara fotográfica digital ○ Pala ○ Machete
Muestras de agua	<ul style="list-style-type: none"> ○ Posicionador satelital (GPS) ○ Marcador ○ Libreta ○ Cámara fotográfica digital ○ Muestreador de aguas ○ Envase para captar las muestras

Para tener un resultado confiable la muestra debe ser representativa de la masa de suelo. Como no es posible físicamente determinar el tamaño real de cada partícula independiente de suelo, a través de la práctica del tamizado se agrupa los materiales por rangos de tamaño. Para lograr esto, se obtiene la cantidad de material que pasan a través de los tamices por una malla determinada y que quedan retenidos en cada tamiz de acuerdo al tamaño del grano.

La información obtenida del análisis granulométrico se presenta en forma de curva. Para poder comparar los sedimentos y visualizar más fácilmente la distribución de los tamaños de granos presentes sería necesario recurrir a una representación logarítmica para los tamaños de partículas. Los procedimientos patrones utilizan el porcentaje que pasa (llamado también porcentaje más fino) como la ordenada en la escala natural de la curva de distribución logarítmica [10].

En los análisis químicos realizados se utilizó el método del doble ácido o Mehlich-I [11] para la obtención del contenido de metales a través del espectrofotómetro de absorción atómica: se pesan en un vaso de precipitado de 100 ml aproximadamente entre 0,080g – 0,090g de la muestra de suelo previamente pulverizada y pasada por el tamiz 120 (abertura de 0,125 mm), luego la muestra que queda en el PAN se humedece con agua destilada, se le agrega 40 ml de agua regia (combinación 3:1 de ácido clorhídrico y ácido nítrico), se realiza un proceso de digestión a ebullición lenta sobre una plancha por una hora y media, luego se retira de la plancha y se deja reposar hasta que se enfríe, se diluye en agua en un vaso de precipitado y este contenido se filtra, la sustancia que se obtiene es la que se utiliza para medir y determinar los metales

presentes con el equipo de absorción atómica. Este es un método químico muy específico de gran sensibilidad, que permite detectar elementos distintos a concentraciones tan bajas como partes por millón (ppm). Esta medición se realiza calibrando el equipo con los estándares de cada uno de los metales que se deseen, determinando los elementos químicos en los sedimentos y suelos como son Hg, Cr, Mg, Fe, Mn, Au, Ag, Al, Cu, Ca, Ni, Co, Sb, Zn, Ti, W, Si, Pb, Na, K, Pb, Nb, Li, Bi, Mo; en agua: Fe, Ca, Mg, Mn, Na, K, Al.

3. Resultados

El área de estudio comprende el efluente generado actualmente por la planta de alúmina de Bauxilum, y el área de descarga de este vertido líquido industrial. En la figura 1 se muestra parte del recorrido total que realiza el efluente, que es de aproximadamente 1000 metros de longitud, desde donde se genera el efluente (aguas arriba) hasta la parte final del cuerpo receptor del efluente (aguas abajo).



Figura 1. Vistas del recorrido del efluente a lo largo del canal perimetral dentro de la planta, túnel de salida y área de descarga.

El efluente líquido industrial se genera dentro de las instalaciones de la empresa recorriendo aproximadamente 310 metros de longitud (una parte se observa en la primera imagen de la figura 1), este es denominado canal perimetral, el cual se encuentra adyacente a las áreas industriales: Área 55 (Lavado de Oxalato), Área 58 (Filtración de Semilla Gruesa y Producto), Área 44 (filtración de Producto), Área 45 (Calcinación) y Área 77 (Silos de Alúmina). Finalmente, este líquido es descargado a un canal abierto (parte inferior de la figura 1). De acuerdo a [12], estos subproductos son altamente transformados y representan un impacto ambiental complejo.

El canal perimetral está diseñado como una vía de desplazamiento para las aguas de lluvias, sin embargo se observan flujos de agua que llevan consigo partículas sólidas que se dirigen al canal provenientes del lavado de los filtros del Área 81 (Sistemas de Aguas Industriales), y del Área 82 (Sistema de Agua Potable), además de presentarse situaciones eventuales tales como: la presencia de sustancias químicas y residuos sólidos que se desplazan a lo largo del canal perimetral, como se observa en la figura 2, debido a fallas internas que ocasionalmente ocurren en las diferentes áreas industriales durante el proceso de transformación de bauxita en alúmina de grado metalúrgico. En el canal perimetral también llegan partículas sólidas (alúmina e hidrato de alúmina) por acción de las aguas de escorrentía y/o el viento. Estos factores generan alteración en algunas de las propiedades físico-químicas del efluente en estudio, y por lo tanto afecta su calidad y la del cuerpo receptor hacia donde se desplaza el vertido.



Figura 2. Sustancias químicas cáusticas y residuos de alúmina que llegan al canal perimetral.

Con respecto a las condiciones del área de descarga, en la figura 3 se observa el impacto negativo causado por el vertido líquido industrial, el cual trae consigo contaminantes que actúan en contra de la estabilidad del suelo y la vegetación, y las aguas producto de las escorrentías que también contribuyen al deterioro acelerado del área.

El color turbio de las aguas, la presencia de sosa cáustica y cantidades considerables de desechos sólidos, son factores que pueden ser apreciados con claridad en la zona de descarga, además, de la poca vegetación, el lavado sustancial de los suelos y la acumulación de sedimentos erosionados. Esta situación ha provocado la degradación del área de descarga del efluente y por ende, la modificación de la capa superficial del suelo.



Figura 3. Área de descarga contaminada, las flechas indican la presencia de sosa cáustica solidificada.

En la tabla 2 se presentan los análisis granulométricos efectuados a las muestras de sedimentos.

Las muestras de sedimentos arrojaron en promedio un porcentaje total de arena de 78,61% con una desviación típica de 8,1%; de finos, el promedio de las

muestras correspondió a 11,24% con desviación típica de 4,9%. Las muestras MB 4, MB 6 y MB 8, tomadas en el área de descarga inmediata al efluente, presentan un porcentaje de grava muy heterogénea con media 14% y desviación estándar 11,8%; el porcentaje de arena es homogéneo con media de 81% y desviación estándar de 11,1%; el porcentaje de finos es heterogénea con media 5% y desviación estándar 2,6%. Los sedimentos en esta zona del área de descarga son predominantemente arena de grano medio a fino con poca presencia de grava. Las muestras MB 11, MB 13 y MB 15, que se encuentran en el área de descarga donde el efluente recorre

aproximadamente 650 m, tiene un porcentaje de grava muy variable con media 8% y desviación estándar 5,8%; el porcentaje de arena es homogénea con media 76% y desviación estándar 4,3%; el porcentaje de finos en esta zona es mayor que en la cercana a la descarga inmediata del efluente, con media 16% y desviación estándar 1,8%, es decir, su distribución es homogénea.

Los sedimentos de esta zona más alejada son predominantemente arena fina. Estos suelos son moderadamente permeables debido a la cantidad de arena que presentan.

Tabla 2. Resultado de los análisis físicos de los sedimentos del Área de Descarga del efluente de la planta de alúmina de la empresa C.V.G Bauxilum

Muestra	Granulometría total	Granulometría arena		Límites		S.U.C.S	
MB4	% Grava	30,55	% A. Gruesa	37,97	LL	-	SP
	% Arena	65,44	% A. Media	40,43	IP	-	
	% Finos	4,01	% A. Fina	21,59			
MB6	% Grava	4,70	% A. Gruesa	13,42	LL	-	SW – SP
	% Arena	86,71	% A. Media	47,50	IP	-	
	% Finos	8,59	% A. Fina	39,07			
MB8	% Grava	6,54	% A. Gruesa	15,23	LL	-	SW
	% Arena	90,85	% A. Media	51,99	IP	-	
	% Finos	2,61	% A. Fina	32,78			
MB11	% Grava	5,86	% A. Gruesa	5,60	LL	26,8	SC
	% Arena	78,73	% A. Media	33,18	IP	16,5	
	% Finos	15,41	% A. Fina	61,21			
MB13	% Grava	15,59	% A. Gruesa	25,23	LL	33	SC
	% Arena	70,22	% A. Media	46,98	IP	9	
	% Finos	14,19	% A. Fina	27,80			
MB15	% Grava	1,77	% A. Gruesa	10,33	LL	27	SC
	% Arena	79,70	% A. Media	41,39	IP	14,2	
	% Finos	18,54	% A. Fina	48,28			

Granulometría: distribución granulométrica de la muestra.
 Granulometría arena: distribución granulométrica de la arena.
 Límites: límites de Atterberg
 LL: límite líquido.
 IP: índice de plasticidad.
 S.U.C.S.: sistema unificado de clasificación de suelo.

La tabla 3 resume los valores obtenidos de los análisis químicos realizados a las muestras de sedimentos del área de descarga del efluente.

pH: los valores para las muestras de sedimentos analizados, se encuentran en el rango de los 7,75 a 9,05, siendo estos indicativos de que el suelo es moderadamente alcalino; esta alcalinidad puede ser explicada por la alta concentración de soda cáustica utilizada en el proceso de transformación de la bauxita. Según [13], el pH es altamente amortiguado por la presencia de sólidos alcalinos (varios hidróxidos, carbonatos, aluminatos y aluminosilicatos) que se

forman por la acción de la sosa cáustica en la bauxita durante el proceso Bayer. La presencia de tales procesos sólidos característicos del proceso Bayer, hace muy complejo el comportamiento de neutralización de ácido de los residuos y poco práctica la eliminación de la alcalinidad por simple lavado con agua.

Materia orgánica: los valores obtenidos se encuentran en el rango de 3,62% a 5,83 %, esta diferencia de valores en las muestras de sedimentos se debe a la afectación por factores geológicos, aporte de desechos sólidos y materia orgánica que son depositados al área de descarga. La alta concentración

de materia orgánica se debe a las aguas negras que son vertidas en el efluente y a las que provienen de las zonas aledañas al área de descarga.

Alúmina: con respecto a los elementos presentes en el suelo del área de descarga, estos resultados muestran que el principal componente de estos sedimentos es el aluminio, encontrándose en un rango entre los 10,15% a 18,36%, valores considerados como altos, que pueden ser explicados por el vertido directo de las aguas del efluente al área de descarga del mismo, ya que dichas aguas contienen alto contenido de este elemento producto de las labores de transformación, que se realizan en la planta de alúmina.

Hierro: los valores obtenidos, se encuentran en un rango entre 5,56% a 7,53%, estos valores se consideran

elevados tomando en cuenta que los sedimentos pertenecen a la Formación Mesa, la cual posee cantidades menores del elemento hierro.

Sodio: el contenido de sodio se encuentra en el rango de 5,59% a 8,22%; las mismas razones de un valor relativamente alto para el contenido de hierro, en los sedimentos del área de descarga, son válidas para el contenido de sodio. Los valores altos del elemento sodio se explican por la cantidad de soda cáustica que se utiliza en la planta para el proceso Bayer.

Potasio, calcio y magnesio: se determinó que la presencia de estos elementos en los sedimentos del área de descarga del efluente es muy baja, porcentualmente corresponde a menos de 2%.

Tabla 3. Parámetros químicos de los sedimentos del Área de Descarga del efluente de la planta de alúmina de la empresa C.V.G. Bauxilum

Muestra	Parámetros											
	pH	M. Org. (%)	Elementos mayoritarios (%)						Elementos trazas (ppm)			
			Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	Cu	Zn	Ni	Cr
MB 4	9,05	5,83	28,36	7,53	8,22	1,08	0,78	0,37	9,91	21,24	1,76	0,212
MB 6	8,24	5,11	25,94	6,92	8,15	1,06	0,72	0,30	8,87	17,25	1,38	0,211
MB 8	8,12	5,03	18,82	6,81	7,59	1,10	0,74	0,32	9,88	12,62	1,05	0,195
MB 11	8,26	4,03	16,19	6,36	6,48	0,99	0,62	0,33	6,72	7,2	0,73	0,153
MB13	8,04	3,79	15,78	5,92	5,93	1,01	0,65	0,35	4,78	6,35	0,51	0,145
MB 15	7,75	3,62	13,15	5,36	5,59	0,98	0,63	0,37	4,22	4,09	0,45	0,135

4. Discusión

Con respecto a las condiciones del área de descarga, en ella se observa el impacto negativo causado por el vertido líquido industrial, el cual trae consigo contaminantes que actúan en contra de la estabilidad del suelo y la vegetación, y las aguas producto de las escorrentías que también contribuyen al deterioro acelerado del área.

Los valores descritos anteriormente para las muestras MB 4, MB 6 y MB 8, tomadas de los sedimentos del área de descarga inmediata al efluente, indican que estos sedimentos son predominantemente arena de grano medio a fino con poca presencia de grava. Mientras que para los sedimentos representados por las muestras MB 11, MB 13 y MB 15, hay un predominio de arena fina; estos valores pueden ser explicados por el transporte al cual son sometidas las

partículas, debido a la acción del agua que es descargada en el área, y en concordancia al sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), se determinó que los suelos presentes en el área de descarga que sirve como cuerpo receptor del efluente son generalmente del tipo SC (suelos arenosos, mal gradados, con arcillas inorgánicas de baja plasticidad y material gravoso de transición entre roca descompuesta y el suelo).

La meteorización de los silicatos y su lavado de los suelos residuales, es lo que proporciona tales cantidades de elementos trazas presentes en los sedimentos, los cuales luego han de ser disueltos y forman iones en solución en las aguas. En la figura 4 se puede observar, que a mayor distancia del área inmediata donde es vertido el efluente, disminuyen los porcentajes de los elementos que se consideran representativos (aluminio,

sodio e hierro) y de materia orgánica, esto se debe al transporte y lavado del suelo.

De acuerdo a los resultados físicos y químicos, los criterios tomados relacionados a las diferentes áreas industriales son los siguientes:

Filtración del Producto –Área 44. La primera fracción que se obtiene (suspensión de producto), se bombea al área 44 donde es filtrada al vacío en cinco filtros horizontales. Estos filtros poseen un sistema de lavado con condensado que permite recuperar la máxima cantidad de soda cáustica y minimizar la humedad de la torta que pasa a la sección de secado y calcinación. En esta área se recupera soda cáustica de

las suspensiones de producto a través del lavado de los sólidos precipitados.

Evaporación –Área 46. El licor agotado que sale del proceso se envía a una serie de intercambiadores de calor donde su concentración de soda cáustica se vuelve al valor requerido al evaporar una cantidad de agua equivalente a la que se introdujo en el circuito de los licores.

Esta es una de las áreas donde se produce la mayor recuperación de soda cáustica, con una evaporación de agua según diseño, entre 12 y 20 g/L, lo cual permite concentrar aún más el licor de procesos y no utilizar soda cáustica concentrada para regenerar.

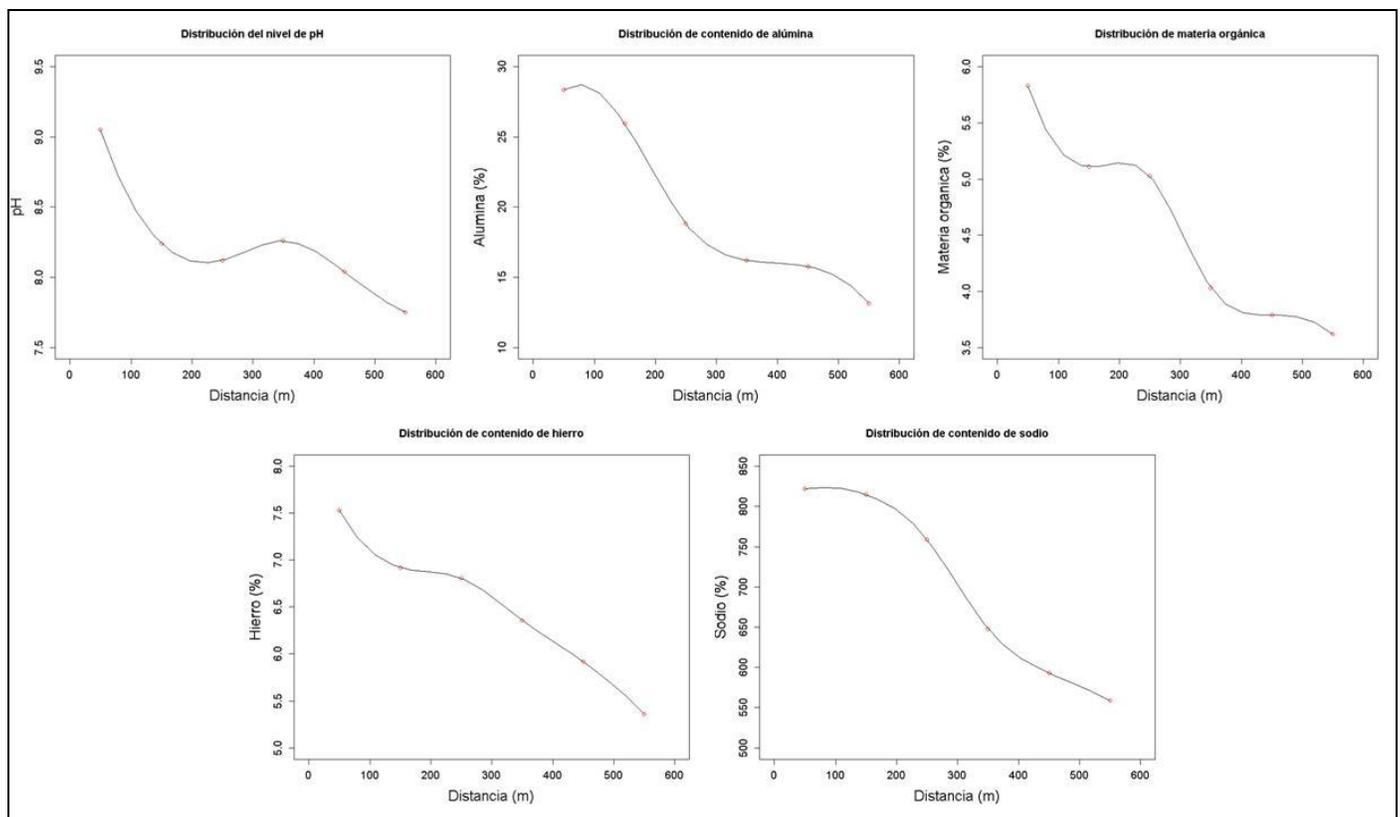


Figura 4. Comportamiento de los parámetros químicos mayoritarios del suelo de acuerdo a la distancia de separación de la descarga inmediata del efluente.

Control de Oxalatos – Área 55. El proceso en la planta de oxalato consiste en deslicorizar y lavar la semilla fina y gruesa provenientes del Área 42 (Clasificación de Hidratos), para remover el oxalato y otras impurezas orgánicas que precipitadas en la superficie impiden una buena aglomeración y crecimiento de las partículas durante el proceso de precipitación. Esto se realiza a través de la deslicorización de la semilla en los filtros

deslicorizadores, y donde la torta resultante es lavada con agua a 90°C, aproximadamente. La torta lavada se descarga a los tanques de lavado de semilla, donde se mezclan con un volumen de licor filtrado y con agua de lavado; de aquí se transfiere a los filtros donde se realiza un proceso de lavado con agua caliente y desaguado de la torta, la cual se envía a unos tanques donde se resuspende con Licor Madre proveniente del Área 39 para luego ser transportado al Área 41.

Filtración de Semilla Gruesa y Producto – Área 58.

La finalidad del Área 58 es deslicorizar toda la semilla gruesa y producto proveniente de la descarga inferior de ciclones, una parte se resuspende con la Suspensión de Aglomeración y enviada al Área 41; otra parte con filtrado proveniente del Área 44, y es enviada al área de filtración de producto.

Calcinación – Área 45. Esta es la última etapa del proceso Bayer, cuya finalidad es producir alúmina de grado metalúrgico a partir del hidrato proveniente de la filtración de producto. Las tortas obtenidas son precalentadas y secadas en un secador Venturi, una vez seca, la alúmina es enviada a un calcinador de lecho fluidizado que opera con gas natural o aceite liviano. Los sólidos obtenidos son descargados y enfriados a temperatura de 80°C en un ciclón de aire, posteriormente son enfriados a temperatura ambiente y luego descargados en un sistema de cintas transportadoras siendo trasladados hasta el silo de Alúmina en el Área 77 para su almacenamiento.

La mayor pérdida de soda cáustica se encuentra reflejada en los afluentes que van hacia las lagunas de Lodo Rojo de Planta (Área 75), la cual es más difícil de recuperar y el costo es aún mayor que el de las áreas 55, 58, 44 y 46.

5. Conclusiones

En el análisis de la situación actual del efluente, se determinó que estas aguas se ven afectadas directamente por la adición de sustancias químicas (licor cáustico e hidrato de alúmina) y residuos sólidos provenientes de las áreas industriales adyacentes.

El vertido de las aguas del efluente en el área de descarga incide en las condiciones naturales del ambiente, por cuanto produce la remoción acelerada de la vegetación, lo cual contribuye al lavado o erosión del suelo afectando de manera directa la topografía de la zona, además, de alterar las características químicas naturales del suelo.

Los suelos presentes en el área de descarga del efluente generado por la empresa, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, son generalmente del tipo SC, este tipo de textura fue determinado a las muestras MB11, MB13 Y MB15. Sin embargo, se observó una variación en el análisis de las muestras MB4, MB6 Y MB8, determinándose una textura del tipo SW-SP y SW respectivamente.

El tipo de suelo es residual con pocos cementados, lo que favorece los procesos de erosión, los cuales son muy comunes en estos tipos de suelos.

Químicamente los suelos presentes en el área de descarga, son suelos moderadamente alcalinos, siendo 9,05 el valor más alto de pH, presentado por la muestra MB4, además de presentar altas concentraciones de sodio (rango entre 8,22 % y 5,59%), hierro (rango entre 7,53% y 5,56%) y aluminio (rango entre 18,36% y 10,15%).

Debido a los altos niveles de contaminación ambiental que posee estos sedimentos, de acuerdo a la caracterización realizada en este estudio, es recomendable aplicar medidas correctivas urgentes que minimice la contaminación del efluente que es descargado de la planta de alúmina y considerar un plan urgente de descontaminación del suelo afectado. Adicionalmente, se debe valorizar para su uso industrial estos sedimentos cáusticos, así como también el material de desechos de las lagunas de lodos rojos, con esto se podría disminuir la potencial amenaza de afectación ambiental de las áreas aledañas, entre las cuales se tiene, por ejemplo, el río Orinoco y zonas urbanas. Ciudad Guayana es una urbe asiento de empresas básicas y de servicios, por lo tanto, desarrollar estas alternativas sería beneficioso también para su economía.

6. Referencias

- [1] Plunkert, P. A.: "Bauxite and Alumina". U.S. Geological Survey, 2005 Minerals Yearbook, Vol. I, Metals and Minerals (2007).
- [2] Freyssinet, P.H., Butt, C.R.M., Morris, R.C., Plantone, P.: "Ore forming processes related to lateritic weathering". Economic Geology 100th Anniversary Volume, Vol. 1 (2005) 681-722.
- [3] Bardossy, G., Aleva, G.J.J.: "Lateritic Bauxites". Developments in Economic Geology, Vol. 27 (1990).
- [4] Zhang, R., Zheng, S., Ma, S., Zhang, Y.: "Recovery of alumina and alkali in Bayer red mud by the formation of andradite-grossularhydrogarnet in hydrothermal process". J. Hazard. Mater, Vol. 189, N° 3 (2011) 827-835.
- [5] McCormick, P.G., Picaro, T., Smith, P.A.I.: "Mechanochemical treatment of high silica bauxite with lime". Minerals Engineering, Vol. 15, N° 4 (2002) 211-214.
- [6] Liu, W.: "The developing of red mud utilization in China". Presentada en: Bauxite residue valorization and best practices conference, (Leuven 5-7/10/2015).
- [7] Klauber, C., Harwood, N., Hockridge, R., Middleton, C.: Proposed mechanism for the formation of dust horizons on bauxite residue disposal areas. In: de Young, D.H. (Ed.), Light Metals. TMS, New Orleans, USA. (2008) 19-24.
- [8] Meyer, F., Happel, U., Hausberg, J., Wiechowski, A.: "The geometry and anatomy of the Los Pijiguas bauxite deposit, Venezuela". Ore Geology Reviews, Vol. 20, N° 1 (2002) 27-54.
- [9] Smith, P.: "The processing of high silica bauxites — Review of existing and potential processes". Hydrometallurgy, Vol. 98, N° 1 (2009) 162-176.

- [10] Bowles, J.: “Manual de Laboratorio de Suelos en la Ingeniería Civil”. Mc. Graw-Hill Latinoamericana, Bogotá, 1981.
- [11] McKean, Sh.: “Manual de análisis de suelos y tejido vegetal: documento de trabajo N° 129”. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Palmira, Colombia, 1993.
- [12] Klauber, C., Gräfe, M., Power, G.: “Bauxite residue issues: II. Options for residue utilization”. *Hydrometallurgy*, Vol. 108, N° 1 (2011) 11–32.
- [13] Gräfe, M., Power, G., Klauber, C.: “Bauxite residue issues: III. Alkalinity and associated chemistry”. *Hydrometallurgy*, Vol. 108, N° 1 (2011) 60–79.

Respiración de dióxido de carbono de suelo, en bosque tropical húmedo – Gamboa Panamá

Carbon Dioxide Soil Respiration in a Tropical Rainforest – Gamboa, Panama

Eny Zahily Serran ^{1*}, María Nuñez², Erick Vallester³

¹Facultad de Ingeniería Civil Centro Regional de Azuero, Universidad Tecnológica de Panamá

^{2,3} Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá

¹ eny.serrano@utp.ac.pa, ² maria.nunez@utp.ac.pa, ³erick.vallester@utp.ac.pa

Resumen– El almacenamiento del carbono en el suelo se produce a través de la formación y descomposición de la materia orgánica. Esta última es el producto del aporte constante de nutrientes al suelo por la acumulación de elementos como hojas, ramas, frutos, corteza y árboles enteros, que al descomponerse produce una serie de elementos que ayudan al crecimiento de árboles y otras plantas y la producción de CO₂ en el suelo.

El presente estudio precisa cuantificar la cantidad de CO₂ que fluye en el suelo de un bosque tropical húmedo, específicamente en una parcela de una hectárea (1 ha) ubicada en Cerro Pelado Gamboa, dentro de la cuenca del Canal de Panamá. Se utilizó un equipo marca Li-COR modelo 6400 XT -09 y que consta de un sistema de cámaras cerradas para medir en un tiempo corto la tasa de cambio de concentración de CO₂ a través la superficie del suelo.

En la parcela se establecieron 21 puntos de muestreo donde además del flujo de CO₂ se midieron la temperatura de suelo, porcentaje de humedad de suelo, intensidad lumínica y pendiente. Los resultados muestran que la tasa de flujo de CO₂ en suelo fue de 49.33 t CO₂ ha-1año-1 y que la temperatura y la humedad del suelo ejercen un control significativo sobre la emisión de este gas hacia la atmósfera.

Palabras claves– Analizador de gas Infrarrojo (IRGA), bosques tropicales, cambio climático, dióxido de carbono, emisiones de gases de efecto invernadero, respiración celular, reservorio.

Abstract– Carbon storage in the soil occurs through the formation and decomposition of organic matter. The constant supply of nutrients to the soil by the accumulation of elements such as leaves, twigs, fruit, bark and trees, which on decomposition produces a number of elements that help the growth of trees and other plants and production of CO₂ in the soil.

The current study search for quantify CO₂ soil flux in a 1 ha plot locate at Cerro Pelado Gamboa in the Panama Canal watershed. Close chambers system Li-COR 6400 XT-09 equipment was used to estimate in a short time the concentration rate of CO₂ through soil surface.

21 sampling points were defined into the plot where CO₂ flux, soil temperature, soil moisture; light intensity and slope measurements were carried out. Results show that the CO₂ soil rate flux was 49.33 t CO₂ ha-1 yr-1 and temperature and soil moisture exert significant control over emission rates of this gas into the atmosphere.

Keywords– Infrared gas analyzer (IRGA), tropical forests, climate change, carbon dioxide, greenhouse gas emissions, cellular respiration, reservoir.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 27 de febrero de 2017

Fecha de Aceptación: 25 de septiembre de 2017

1. Introducción

Los bosques funcionan como fuente y reservorio de Carbono del planeta, contienen el equivalente del 37%, sin embargo, sirven como sumideros aportando a la

atmósfera 3 Pg C año-1. La vegetación terrestre contiene como reservorio 650 Gt, el suelo contiene 1,500 Gt de carbono orgánico y 1700 Gt de carbono inorgánico, esto a una profundidad menor a 1 metro

[1],[2]. Las aportaciones brindadas por el suelo han sido valoradas en diversos ecosistemas con la finalidad de evaluar el reciclaje de los nutrientes y la dinámica entre raíces, actividad microbiana y flujo de carbono entre otros procesos [3], [4].

El inicio de la revolución industrial, aumentan las emanaciones de gases de efecto de invernadero (GEI) a la atmósfera, incrementando 70% desde los años 70 hasta el 2004, siendo el dióxido de carbono el gas más predominante. Las emisiones mundiales de GEI, asciende a 197.4 Gt CO₂-eq/año, de los cuales un 73.9% equivale a flujos de CO₂ producidos por combustibles de origen fósil y otras fuentes, además la deforestación degradación y turba [5].

Estudios establecidos en Panamá indican que la Biomasa Terrestre para un bosque tropical secundario (Cerro Pelado Gamboa) contiene 156.80 Mg ha⁻¹, la biomasa subterránea 37.63 Mg ha⁻¹, teniendo un total de biomasa de 193.43 Mg ha⁻¹, lo que representa 97.21 Mg ha⁻¹, de carbono [6], reafirmando la importancia de la biomasa en el ecosistema. Al igual que la biomasa terrestre, el suelo cumplen un papel fundamental en los flujos de carbono en los ecosistemas, aún existe mucha incertidumbre acerca de la dinámica de la respiración del suelo en los bosques tropicales. Los pocos estudios en Panamá sobre el flujo de carbono (CO₂) en suelo, la falta de conocimientos, equipos y recursos destinados a estudios de investigación, despierta el interés de desarrollar este estudio, el cual tiene como objetivo cuantificar la tasa de respiración de suelo en una hectárea de un Bosque Húmedo Tropical.

2. Materiales y Método

Esta investigación se realizó en una (1) parcela permanente la cual tiene un perímetro cuadrada de una (1) hectárea, ubicada en el Observatorio de Hidrología Tropical en Cerro Pelado (OHTCP), de la Universidad Tecnológica de Panamá. El OHTCP está ubicado en Gamboa dentro de la cuenca hidrográfica del Canal de Panamá figura 1. La comunidad de Gamboa alberga muchas hectáreas de bosque tropical húmedo y una extensa longitud de río Chagres (principal afluente del Canal de Panamá), los cuales han sido conservados y estudiados desde la creación del Canal.



Figura 1. Mapa de localización geográfica.
Fuente: Autor

El período de estudio se prolongó durante toda la época de verano un período aproximado de 5 meses entre noviembre del año 2008 a abril de 2009, se determinaron parámetros ambientales (intensidad lumínica, tipo de suelo, temperatura de suelo, humedad de suelo, pendiente).

Para determinar la ubicación de los puntos de muestreo se utilizó ARGIS software especializado para el manejo de los Sistemas de Información Geográfica, en el que se generaron mapas topográficos, tramados de parcela, mapas de vegetación. El análisis de estos datos permite la ubicación aleatoria de 7 puntos para la toma de las muestras figura 2. En cada zona fueron colocados anillos de poca profundidad que permiten obtener información global de los elementos que contribuyen a la respiración de suelo.

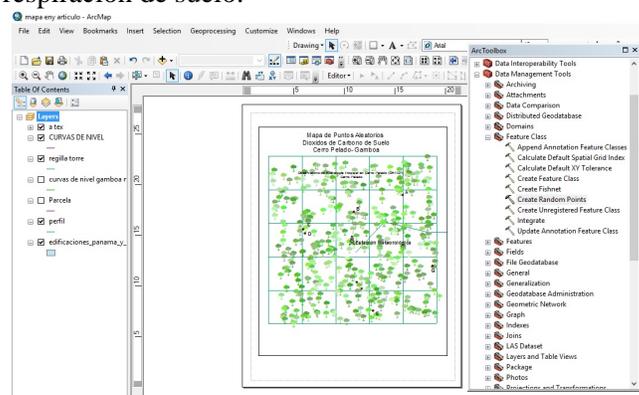


Figura 2. Software especializado para la toma aleatoria de muestras de campo.
Fuente: Autor.

Se establece cuantificar el carbono de suelo utilizando una Cámara Dinámica Cerrada, o DCC, el cual mantiene en equilibrio las presiones dentro y fuera de la cámara, la DCC tipo Li-COR 6400XT-09, integra

una sonda de temperatura de suelo y un sensor de porcentaje de humedad dentro de la cámara, que permite integrar la información a los datos de carbono [7]. La Li-COR 6400XT-09, es un sistema de cámara abierta, el cual garantiza en su ciclo automatizado que las mediciones de flujo de CO₂ son precisas y repetibles. Para establecer la variable pendiente se utiliza modelo matemático lineal.

Los valores de campos se capturan de manera puntual entre 2 y 3 veces a la semana por toda la temporada de verano. Se establece que por cada punto de muestro se toma un aproximado de 630 mediciones de CO₂ de suelo, humedad dentro de la cámara y temperatura de suelo. Estas medidas son obtenidas por medio de los sensores de humedad y temperatura incorporados en la cámara de respiración de suelo.

- Tasa de respiración del suelo: velocidad a la cual se emite CO₂ desde el suelo hacia la atmósfera, medida en $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en cada uno de los anillos insertados en el suelo.
- Temperatura del suelo: temperatura (°C) integrada entre 0 y 20 cm de profundidad del suelo, tomada a poca distancia (5-10 cm) del anillo.
- Humedad Relativa del suelo: contenido volumétrico de agua (% volumen) dentro de la cámara.
- Intensidad Lumínica: cantidad de luz disponible y aprovechable por los árboles o la vegetación, medida en valores lux.

Para determinar la intensidad lumínica en el punto de muestreo fue usado el TES-1336A LUXOMETRO DIGITAL, el cual registro de forma puntual valores lux de iluminación. La determinación de tipo de suelo se establece por medio del método de especificación de colores Munsell, es una herramienta útil, económica y fácil de manipular para la evaluación de color del suelo en campo como en el laboratorio [8]. Este sistema es un producto que integra los rayos de luz dispersos, más las propiedades físicas químicas y biológicas del suelo [9]. Debida a que la muestra de suelo es superficial, esta permite captar atributo más relevante utilizado en la separación de horizontes y tiene una estrecha relación con los principales componentes sólidos de este recurso.

En el análisis de datos estadísticos se utiliza el software STATGRAPHICS, herramienta que permite el análisis de datos estadísticos. Se establece un tratamiento estadístico de datos utilizando análisis de la varianza ANOVA.

3. Resultados

La tasa promedio de respiración del suelo, estimada con base en el promedio de los siete (7) puntos establecidos en la hectárea de estudio de Cerro Pelado, dio como resultado el valor de $3.56 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Ver tabla 1, figura 2.

Tabla 1. Análisis estadísticos de datos de campo

Punto	Resp. de Suelo ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Temperatura (°C)	Humedad Relativa en la Cámara del suelo (%)	Iluminación (Lux)	Pendiente del terreno (%)
A	3.67	27.9	62.1	407	26.60
B	2.67	28.0	69.3	409	9.10
C	3.55	28.1	70.5	759	9.50
D	3.51	28.6	70.3	757	15.90
E	3.76	28.6	71.5	469	25.10
F	3.68	29.9	71.4	624	22.90
G	4.03	29.6	65.6	742	39
Promedio	3.56	28.7	68.67	595.29	

Datos obtenidos de variables definidas para este estudio.

Fuente: Datos recopilados por el autor.

Con estos cálculos se logra obtener que para la hectárea de estudio la respiración del suelo equivale a 0.14 ton CO₂ por hectárea por día. Realizando un cálculo con proyección anual, el resultado de respiración suelo obtenido para esta hectárea resultó de 49.33 ton de CO₂.

Los valores de temperatura obtenidos en este estudio están dentro del rango de 25.6 C° y 32.1 C°, utilizando un sensor de temperatura ubicado a 15 centímetros de profundidad en el suelo.

El contenido de humedad relativa de la cámara del suelo encontrado en esta investigación se mantuvo dentro el rango de 23.1 y 87.2%.

El análisis de correlación entre Resp. de CO₂ y Temperatura indica que, la Respiración de CO₂ = $8.45784 - 0.171188 * \text{Temperatura}$, determinado que el p-valor ANOVA es inferior a 0.01. Para la correlación de Respiración de CO₂ = $3.0181 + 0.00782164 * \%$ de

humedad relativa, la relación lineal de estas variables es muy baja ya que el R^2 sólo corresponde a un 0.0128924.

En términos generales la intensidad lumínica, se mantuvo de forma uniforme en todos los puntos; el valor promedio de esta variable fue de 595 Lux. Es importante indicar, que esta variable fue medida, ya que es el factor más importante en el crecimiento y desarrollo de los árboles y es la fuente de energía para todos los procesos fisiológicos que se dan en la vegetación y el suelo por que interviene en la producción de alimentos o de materia orgánica imprescindibles para el desarrollo de los ecosistemas.

El color de suelo más predominante en la hectárea de estudio fue el color marrón; esto se debe a que el suelo está muy asociado a estados iniciales a intermedios de alteración y mantiene una relación con condiciones de niveles medios a bajos de materia orgánica y un rango muy variable de fertilidad. Para cada variable bajo estudio se desarrolló un análisis de regresión lineal, las cuales arrojaron que para cada uno de estos valores no existe relación significativa entre las variables y el CO_2 del suelo.

El análisis ANOVA indica que para la relación entre Flujo de CO_2 y las variables estimadas no existe una relación estadística tabla 2. Dentro del área de estudio el flujo de carbono varía en los rangos de 2.67 a 4.03 $\mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ tabla 2, establecidos los puntos E y G figura 2 como zona de mayor capacidad.

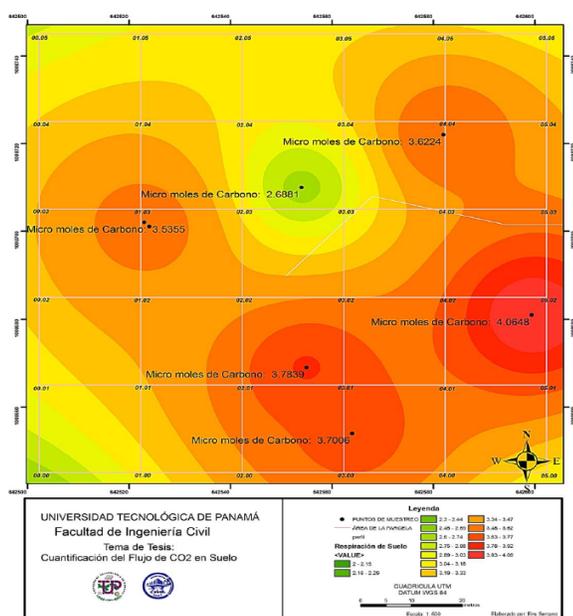


Figura 2. Mapa de flujo de carbono de suelo, valores promedio.

Valores espaciales de las interpolaciones de datos desarrollados para la parcela en estudio. Fuente: datos recopilados por autor.

4. Discusión

La tasa de respiración de suelo en la parcela estudiada fue relativamente homogénea. De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis de regresión lineal realizado para las variables de temperatura y humedad relativa, se logró observar que ambas variables no mantienen una relación estadísticamente significativa sobre respiración del suelo.

La relación entre el contenido de humedad y la iluminación con la respiración del suelo, envuelve interacciones complejas que dependen de la limitación relativa de estas dos variables sobre la actividad microbiana y de raíces. [10], [11] Sin embargo, la importancia de cada factor varía entre diferentes ambientes y ecosistemas. Se ha encontrado que la temperatura de suelo explica una proporción sustancial de la variación de la respiración del suelo principalmente en bosques húmedos [12], [13].

Los valores de respiración de suelo encontrada en la hectárea de estudio (Bosque Húmedo Tropical) para esta investigación fueron de 49.33 $t CO_2 ha^{-1} año^{-1}$, indicando que en comparación con tasas de respiración de suelo en bosque tropicales tabla 3, Panamá, tienen mayor flujo de carbono de suelo.

Tabla 2. Datos comparativos de tasas de respiración de suelo

Tipo de Bosque	Tasa de respiración del suelo ($t CO_2 ha^{-1} año^{-1}$)
Bosques tropicales y subtropicales [14]	8.9 – 15
Bosques primarios, bosques Secundarios Porce, Colombia [15]	15.91 14.03
Bosque lluvioso Amazonia and in Cerrado in central Brazil[16]	20.81
Bosque subtropical South China[17]	11.48
Bosque Lluvioso Hawaiian rainforests[18]	6.5 - 8.9

Bosque tropical secundario Colombia[19]	14. 56 - 18. 83
Bosque tropical húmedo Secundario Gamboa – Cerro Pelado/ Panamá	49.33

Tasa de respiración de suelo en bosques tropicales y subtropicales. Fuente: datos recopilados por el autor.

5. Conclusiones

Los suelos son el mayor reservorio de carbono en los ecosistemas terrestres y a su vez la mayor fuente de CO₂ atmosférico, el cual es producido mediante un proceso denominado respiración del suelo.

La tasa promedio de respiración del suelo, estimada con base en el promedio de los siete (7) puntos establecidos en la hectárea de estudio de Cerro Pelado, dio como resultado el valor de 3.56 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ +/- 0.423. Por los resultados obtenidos en el análisis de regresión lineal realizado para las variables de temperatura, humedad relativa e iluminación, se logró obtener que estas variables no mantienen una relación significativa sobre la respiración del suelo.

Varios estudios en bosques tropicales mencionan valores muy disímiles de respiración del suelo lo cual puede deberse, en gran medida, a la diversidad de técnicas con las que se ha monitoreado este proceso.

Podemos indicar que para la hectárea de estudio localizada en Cerro Pelado la respiración del suelo equivale a 0.14 ton CO₂ por día equivalente a 49.33 ton de CO₂ ha⁻¹ año⁻¹.

Se debe tratar de reducir el desequilibrio y evitar que los bosques se conviertan en una fuente emanación dióxido de carbono. Debido a la gran extensión de la superficie boscosa, se estima que, combinando estrategias de conservación forestal con proyectos de reforestación en todo el mundo, los bosques podrían resultar sumideros netos de carbono durante los próximos cien (100) años lo que permitirá reducir de 20% a 50% las emisiones de carbono a la atmósfera [20], para mitigar, con ello, el cambio climático.

Con el desarrollo de conocimientos sobre la dinámica del flujo de carbono entre los bosques y la atmósfera se busca lograr que países en desarrollo, utilicen los bosques como sumideros de carbono para captar fondos mediante proyectos financiados por los países desarrollados, que se comprometieron a reducir sus emisiones con el Protocolo de Kyoto.

6. Agradecimientos

Agradecemos al Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas de la Universidad Tecnológica de Panamá, ya que por medio del Proyecto de investigación COL07-011 “Cuantificación del Flujo de Carbono a través de un bosque húmedo tropical en la cuenca del canal de Panamá”, nos facilitaron el equipo y documentación necesarios para el desarrollo de este proyecto.

Al personal técnico de Consultoría Estudio y Diseños S.A., por facilitarnos sus equipos para realizar mediciones.

Al Dr. Reinhard Pinzón, apoyo en revisión de traducción.

7. Referencias

- [1] [1] MALHI, Yadvinder; GRACE, John. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. *Trends in Ecology & Evolution*, 2000, vol. 15, no 8, p. 332-337.
- [2] [2] ROBERT, Michel. *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra*. Food & Agriculture Org., 2002.
- [3] [3] SINGH, J. S.; GUPTA, S. R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *The botanical review*, 1977, vol. 43, no 4, p. 449-528.
- [4] [4] Orjuela, H. B. (1989). *El suelo: una visión sobre sus componentes biorgánicos*. Universidad de Nariño.
- [5] [5] Bernstein, L., Bosch, P., Canziani, O., Chen, Z., Christ, R., & Riahi, IPCC, 2007: *climate change 2007: synthesis report*. IPCC, 2008.
- [6] [6] Pinzón, R., Fábrega, J., Vega, D., Valleter, E. N., Aizprúa, R., López-Serrano, F. R., ... & Espino, K. (2012). Estimates of biomass and fixed carbon at a rainforest in Panama. *Air, Soil and Water Research*, 5, 79.
- [7] [7] Licor.com. (2017). LI-6400XT Chambers & Accessories | LI-COR Environmental. [online] Available at: https://www.licor.com/env/products/photosynthesis/LI-6400XT/chambers/soil_chamber.html [Accessed 28 Feb. 2017].
- [8] [8] Domínguez Soto, J. M., Gutiérrez, R., Delia, A., Prieto García, F., & Acevedo Sandoval, O. (2012). Sistema de notación Munsell y CIELab como herramienta para evaluación de color en suelos. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(1), 141-155.
- [9] [9] Velázquez-García, J. D. J., Oleschko, K., Muñoz-Villalobos, J. A., Velásquez-Valle, M. A., Girón-Ríos, Y., Martínez-Menes, M., & Figueroa-Sandoval, B. (2007). El color del Andosol como un indicador de su calidad física bajo el manejo. *Terra Latinoamericana*, 25(1), 1-8.
- [10] [10] Davidson, E., Belk, E., & Boone, R. D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global change biology*, 1998, vol. 4, no 2, p. 217-227.
- [11] [11] Schwendenmann, L., Veldkamp, E., Brenes, T., O'brien, J. J., & Mackensen, J. Spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an old-growth neotropical rain forest, La Selva, Costa Rica. *Biogeochemistry*, 2003, vol. 64, no 1, p. 111-128.

- [12] [12] FANG, C.; MONCRIEFF, J. B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, vol. 33, no 2, p. 155-165.
- [13] [13] Boone, R. D., Nadelhoffer, K. J., Canary, J. D., & Kaye, J. P. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature*, 1998, vol. 396, no 6711, p. 570-572.
- [14] [14] RAICH, J. W.; SCHLESINGER, W. H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B*, 1992, vol. 44, no 2, p. 81-99.
- [15] [15] PALACIO, Álvaro Andrés Ramírez; HURTADO, Flavio Humberto Moreno. Respiración microbiana y de raíces en suelos de bosques tropicales primarios y secundarios (Porcía, Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 2008, vol. 61, no 1, p. 4381.
- [16] [16] Meir, P., Grace, J., Miranda, A., & Lloyd, J. Soil respiration in a rainforest in Amazonia and in cerrado in central Brazil. *Amazonian deforestation and climate*, 1996, vol. 1, p. 319-330.
- [17] [17] Yan, J., Wang, Y., Zhou, G., & Zhang, D. Estimates of soil respiration and net primary production of three forests at different succession stages in South China. *Global Change Biology*, 2006, vol. 12, no 5, p. 810-821.
- [18] [18] RAICH, James W. Aboveground productivity and soil respiration in three Hawaiian rainforests. *Forest Ecology and Management*, 1998, vol. 107, no 1, p. 309-318.
- [19] [19] MORENO-HURTADO, Flavio H. Soil carbon dynamics in primary and secondary tropical forests in Colombia. 2004.
- [20] [20] HOUGHTON, John T. *Climate change 1995: The science of climate change: contribution of working group I to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 1996.

Modelo de Elementos Finitos No-Hidrostático Integrado en la Vertical para la Propagación de Olas

Depth Integrated Non Hydrostatic Finite Element Model for Wave Propagation

Lucas E. Calvo Gobbetti^{1*}, Paulo C. Colonna Rosman²

¹Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas, Universidad Tecnológica de Panamá

²COPPE-PEnO, Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, Universidade Federal do Rio de Janeiro

¹lucas.calvo@utp.ac.pa, ²pccrosman@ufrj.br

Resumen– Un modelo de elementos finitos no hidrostático integrado en la profundidad para la propagación y transformación del oleaje en zonas costeras fue desarrollado con suceso a partir del modelo hidrostático SisBahia®. El modelo utiliza elementos finitos cuadrilaterales cuadráticos para la aproximación de las velocidades horizontales y elementos finitos cuadrilaterales lineales para la aproximación de las elevaciones de la superficie del agua y las presiones no hidrostáticas. El modelo es verificado con una solución analítica y validado usando datos experimentales. Al no requerir del uso de mallas intercaladas el presente modelo puede ser usado en mallas no estructuradas de elementos finitos.

Palabras Claves– Propagación de olas, no hidrostático, método de elementos finitos, SisBahia®.

Abstract– A depth integrated non hydrostatic finite element model for the propagation and transformation of waves in coastal areas was developed with success from the hydrostatic model SisBahia®. The model use quadratic quadrilateral finite element for horizontal velocities approximation and linear quadrilateral finite elements for water surface elevations and non hydrostatic pressures approximations. Because the model does not require the use of staggered grids it can be used on non structured finite element meshes.

Keywords– Waves propagation, non hydrostatic, finite element method, SisBahia®.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 8 de febrero de 2017

Fecha de Aceptación: 25 de septiembre de 2017

1. Introducción

Las ecuaciones de aguas poco profundas, con aproximación hidrostática de presiones, tienen muchas aplicaciones en la modelación de las ondas largas, tales como mareas y olas de tormenta. Sin embargo, la falta de dispersión (conservación del momento vertical) en los modelos de aguas poco profundas impide su uso en la modelación de la propagación de las olas desde mar adentro hasta la costa.

Casulli y Stelling [1] y Stansby y Zhou [2] propusieron independientemente simular el movimiento de las olas usando las ecuaciones de Navier Stokes con presión no hidrostática. Stelling y Zijlema [3] formularon un modelo de diferencias finitas que toma en cuenta la dispersión a través de un término de

presión no hidrostática. Tanto en versiones integradas en la profundidad como en formulaciones de varias capas, ellos descomponen la presión en componentes hidrostáticas y no hidrostáticas, como en [4]. Yamazaki et al. [5] propusieron un modelo no hidrostático integrado en la profundidad de diferencias finitas con un esquema advectivo de conservación del momento que permite la modelación del quiebre de las olas y del *run up*.

Las ecuaciones integradas en la profundidad son análogas a las ecuaciones de aguas poco profundas con la adición de una ecuación de momento vertical y un término de presión no hidrostático en las ecuaciones del momento horizontal. Walters [6] adaptó este enfoque no hidrostático a un modelo mixto de elementos finitos y

volúmenes finitos. Wei y Jia [7] desarrollaron sobre un modelo existente, el CCHE2D, una versión no-hidrostática donde mallas intercaladas de elementos finitos son usadas para la determinación de las derivadas espaciales.

En este trabajo un modelo de elementos finitos no hidrostático integrado en la profundidad para la propagación de olas es desarrollado partiendo de un modelo hidrostático existente, el SisBahia® [8]. SisBahia® (Sistema Base de Hidrodinámica Ambiental) es un sistema profesional de modelos computacionales registrado por la Fundación Coppetec, ligada al Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) de la Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). El modelo no-hidrostático es verificado con una solución analítica y validado usando datos experimentales.

2. Modelo Matemático

Los modelos no-hidrostáticos para la dinámica de olas son generalmente desarrollados basados en sus predecesores hidrostáticos. El modelo hidrostático SisBahia® viene siendo utilizado ampliamente desde 1987 y actualmente incluye módulos hidrodinámicos 2DH y 3D, de calidad de agua, transporte de sedimentos, transporte Euleriano y Lagrangeano y generación de oleaje por viento, entre otros. Las ecuaciones gobernantes en el modelo hidrodinámico no-hidrostático integrado en la profundidad, sin incluir los términos turbulentos y de Coriolis, son:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{gU\sqrt{U^2 + V^2}}{HC_h^2} - \frac{1}{2\rho} \frac{\partial q_b}{\partial x} - \frac{q_b}{2\rho H} \frac{\partial(\xi - h)}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \xi}{\partial y} - \frac{gV\sqrt{U^2 + V^2}}{HC_h^2} - \frac{1}{2\rho} \frac{\partial q_b}{\partial y} - \frac{q_b}{2\rho H} \frac{\partial(\xi - h)}{\partial y} \quad (2)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{q_b}{\rho H} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{\partial(UH)}{\partial x} + \frac{\partial(VH)}{\partial y} \quad (4)$$

Donde U , V y W son componentes del promedio de las velocidades en las direcciones x , y , y z , ρ es la densidad del agua, C_h es el coeficiente de Chezy, tradicionalmente utilizado para parametrizar la fricción de fondo, y g es la aceleración de la gravedad. La profundidad de flujo se define como $H = \xi + h$, donde ξ es el nivel de la superficie del agua medido desde un nivel de referencia fijo y h es la profundidad medida desde ese mismo nivel. En estas ecuaciones se asume una distribución lineal en la vertical tanto para las presiones no hidrostáticas como para las velocidades verticales. La presión no hidrostática en la superficie libre es tomada como cero y en el fondo como siendo q_b . La velocidad vertical promedio, W , es $(w_\xi + w_b)/2$, donde w_ξ es la velocidad vertical en la superficie y w_b es la velocidad vertical en el fondo.

Las condiciones de frontera cinemáticas de la superficie libre y del fondo son:

$$w_\xi = \frac{\partial \xi}{\partial t} + u_\xi \frac{\partial \xi}{\partial x} + v_\xi \frac{\partial \xi}{\partial y} \quad (5)$$

$$w_b = -u_b \frac{\partial h}{\partial x} - v_b \frac{\partial h}{\partial y} \quad (6)$$

Con u_ξ, v_ξ, u_b y v_b siendo las componentes en x y y de las velocidades junto a la superficie libre y el fondo.

3. Formulación de Elementos Finitos y Solución Numérica

3.1 Elementos Finitos

La discretización espacial en el modelo hidrostático SisBahia® se efectúa utilizando elementos cuadrilaterales cuadráticos (9 nodos) tanto para las velocidades como para los niveles de la superficie del agua. Para garantizar que los sistemas lineales resultantes de la formulación numérica del modelo no hidrostático estén bien planteados, es necesario usar elementos cuadrilaterales mixtos: cuadráticos (9 nodos) para las velocidades y lineales (4 nodos) para las elevaciones de la superficie del agua y las presiones no-hidrostáticas (figura 1).

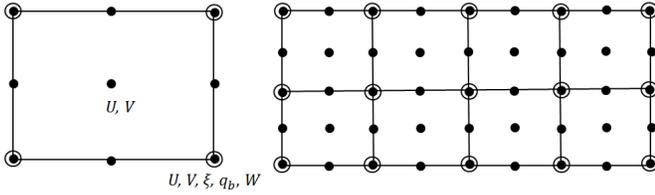


Figura 1. Malla y elementos finitos cuadrilaterales usados en el modelo: Cuadráticos (9 nodos, círculos rellenos) para velocidades; Lineales (4 nodos, círculos) para elevación de la superficie y presión no hidrostática.

Las velocidades U, V , el nivel de la superficie del agua ξ y la presión no hidrostática en el fondo son aproximados en un elemento por:

$$U = \sum_{j=1}^9 U_j \varphi_j^c, \quad V = \sum_{j=1}^9 V_j \varphi_j^c \quad (7)$$

$$\xi = \sum_{j=1}^4 \xi_j \varphi_j^l, \quad q_b = \sum_{j=1}^4 q_{b_j} \varphi_j^l \quad (8)$$

Donde φ_j^c y φ_j^l son, respectivamente, las funciones de aproximación cuadráticas (9 nodos) y lineales (4 nodos) de las variables de solución.

3.2 Solución Numérica

3.2.1 Primer Paso

El procedimiento de solución comienza resolviendo las siguientes ecuaciones del momento horizontal (1) y (2), sin los términos de presión no-hidrostática, de forma acoplada hasta encontrar las soluciones provisionales para el paso de tiempo $n+1$, \tilde{U}^{n+1} , \tilde{V}^{n+1} :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{gU\sqrt{U^2 + V^2}}{HC_h^2} \quad (9)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \xi}{\partial y} - \frac{gV\sqrt{U^2 + V^2}}{HC_h^2} \quad (10)$$

Las ecuaciones acopladas (9) y (10) son tratadas con el esquema numérico del SisBahia®, basado en el método de los elementos finitos de Galerkin [8]. El esquema de discretización temporal adoptado en el modelo SisBahia® es de 2ª orden, centrado en el instante $t + \Delta t/2$, y usa la formulación de Crank-Nicholson para los términos lineales y la factorización

implícita para los términos no lineales. Suponiendo la siguiente forma general:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = L(u) + L_1(u)L_2(u) \quad (11)$$

Con L representando una función lineal y L_1L_2 una función no lineal que puede ser escrita como el producto de dos funciones lineales, el esquema de discretización temporal adoptado sería:

$$\frac{u^{n+1} - u^n}{\Delta t} = \frac{(L^{n+1} + L^n)}{2} + \frac{(L_1^{n+1}L_2^n + L_1^nL_2^{n+1})}{2} \quad (12)$$

En la documentación del modelo SisBahia® se utiliza la siguiente notación:

- Valor en el instante t : u^n
- Valor en el instante $t - \Delta t$: u^{n-1}
- Valor en el instante $t + \Delta t$: u^{n+1}
- Valor extrapolado para el instante $t + \Delta t/2$: u^\otimes
- Valor extrapolado para el instante $t + \Delta t$: u^x

El valor extrapolado en el instante $t + \Delta t/2$ es calculado por:

$$u^\otimes = \frac{(u^x + u^n)}{2} \quad (13)$$

El valor extrapolado en el instante $t + \Delta t$ es calculado por:

$$u^x = 3(u^n - u^{n-1}) + u^{n-2} \quad (14)$$

Un modelo de elementos finitos de Galerkin centrado en el instante $t + \Delta t/2$ para resolver las ecuaciones del momento horizontal (9) y (10) acopladas sobre un elemento Ω_e es:

$$\begin{bmatrix} XU & XV \\ YU & YV \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{U}^{n+1} \\ \tilde{V}^{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} RU \\ RV \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} RU \\ RV \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} XU1 - XU3 & 0 \\ 0 & YV1 - YV3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U^n \\ V^n \end{bmatrix}$$

$$- \begin{bmatrix} GRVX \\ GRVY \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} STABX \\ STABY \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} XU_{ij} &= XU1_{ij} + XU2_{ij} + XU3_{ij} \\ YV_{ij} &= YV1_{ij} + YV2_{ij} + YV3_{ij} \end{aligned}$$

Las integrales en el dominio del elemento Ω_e son definidas como:

$$XU1_{ij} = YV1_{ij} = \int_{\Omega_e} \varphi_i^c \frac{2}{\Delta t} \varphi_j^c d\Omega_e \quad (16)$$

$$XU2_{ij} = \int_{\Omega_e} \varphi_i^c \left\{ \varphi_j^c \sum_{k=1}^9 U_k^n \frac{\partial \varphi_k^c}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_j^c}{\partial x} \sum_{k=1}^9 U_k^n \varphi_k^c + \frac{\partial \varphi_j^c}{\partial y} \sum_{k=1}^9 V_k^n \varphi_k^c \right\} d\Omega_e \quad (17)$$

$$XU3_{ij} = YV3_{ij} = \int_{\Omega_e} \varphi_i^c \frac{g(\sqrt{U^2+V^2})^{\otimes}}{H^{\otimes} C_h^2} \varphi_j^c d\Omega_e \quad (18)$$

$$XV_{ij} = \int_{\Omega_e} \varphi_i^c \varphi_j^c \sum_{k=1}^9 U_k^n \frac{\partial \varphi_k^c}{\partial y} d\Omega_e \quad (19)$$

$$YU_{ij} = \int_{\Omega_e} \varphi_i^c \varphi_j^c \sum_{k=1}^9 V_k^n \frac{\partial \varphi_k^c}{\partial x} d\Omega_e \quad (20)$$

$$YV2_{ij} = \int_{\Omega_e} \varphi_i^c \left\{ \varphi_j^c \sum_{k=1}^9 V_k^n \frac{\partial \varphi_k^c}{\partial y} + \frac{\partial \varphi_j^c}{\partial x} \sum_{k=1}^9 U_k^n \varphi_k^c + \frac{\partial \varphi_j^c}{\partial y} \sum_{k=1}^9 V_k^n \varphi_k^c \right\} d\Omega_e \quad (21)$$

$$GRVX_i = 2 \int_{\Omega_e} \varphi_i^c g \sum_{k=1}^4 \xi_k^{\otimes} \frac{\partial \varphi_k^L}{\partial x} d\Omega_e \quad (22)$$

$$GRVY_i = 2 \int_{\Omega_e} \varphi_i^c g \sum_{k=1}^4 \xi_k^{\otimes} \frac{\partial \varphi_k^L}{\partial y} d\Omega_e \quad (23)$$

Para controlar las oscilaciones espurias provenientes de los términos advectivos, el modelo SisBahia® usa la interfase anti-disipativa explícita desarrollada por Rosman [8]. Esta interfase alisa las oscilaciones modificando los valores calculados de las variables usando valores calculados de puntos adyacentes, sin provocar una difusión excesiva de la solución. En el caso de mallas no estructuradas, con muchos elementos compartiendo el mismo nodo, el resultado de la

aplicación de la interfase depende de cuales de estos elementos sean considerados.

En el presente modelo no-hidrostático las oscilaciones espurias de los términos advectivos son tratadas con el ya tradicional método Streamline Upwind Petrov-Galerkin (SUPG), cuya aplicación no depende del tipo de malla utilizada. En el método SUPG [9] son incluidas en las ecuaciones del momento términos estabilizadores, que en el caso del modelo en la ecuación 15 son dados por:

$$STABX_i = 2 \int_{\Omega_e} \tau_x \frac{\partial \varphi_i^c}{\partial x} \sum_{k=1}^9 U_k^n \varphi_k^c \left\{ \frac{\left(\sum_{k=1}^9 U_k^{\otimes} \varphi_k^c - \sum_{k=1}^9 U_k^n \varphi_k^c \right)}{\Delta t} + \sum_{k=1}^9 U_k^{\otimes} \varphi_k^c \sum_{k=1}^9 U_k^{\otimes} \frac{\partial \varphi_k^c}{\partial x} + \sum_{k=1}^9 V_k^{\otimes} \varphi_k^c \sum_{k=1}^9 U_k^{\otimes} \frac{\partial \varphi_k^c}{\partial y} + g \sum_{k=1}^4 \xi_k^{\otimes} \frac{\partial \varphi_k^L}{\partial x} + \sum_{k=1}^9 U_k^{\otimes} \varphi_k^c \frac{g(\sqrt{U^2+V^2})^{\otimes}}{H^{\otimes} C_h^2} \right\} d\Omega_e \quad (24)$$

$$STABY_i = 2 \int_{\Omega_e} \tau_y \frac{\partial \varphi_i^c}{\partial y} \sum_{k=1}^9 V_k^n \varphi_k^c \left\{ \frac{\left(\sum_{k=1}^9 V_k^{\otimes} \varphi_k^c - \sum_{k=1}^9 V_k^n \varphi_k^c \right)}{\Delta t} + \sum_{k=1}^9 U_k^{\otimes} \varphi_k^c \sum_{k=1}^9 V_k^{\otimes} \frac{\partial \varphi_k^c}{\partial x} + \sum_{k=1}^9 V_k^{\otimes} \varphi_k^c \sum_{k=1}^9 V_k^{\otimes} \frac{\partial \varphi_k^c}{\partial y} + g \sum_{k=1}^4 \xi_k^{\otimes} \frac{\partial \varphi_k^L}{\partial y} + \sum_{k=1}^9 V_k^{\otimes} \varphi_k^c \frac{g(\sqrt{U^2+V^2})^{\otimes}}{H^{\otimes} C_h^2} \right\} d\Omega_e \quad (25)$$

con:

$$\tau_x = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\Delta t}{2}\right)^2} + \frac{1}{\left(\frac{\Delta x}{2(\sqrt{U^2+V^2})^{\otimes}}\right)^2}}} \quad (26)$$

$$\tau_y = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\Delta t}{2}\right)^2} + \frac{1}{\left(\frac{\Delta y}{2(\sqrt{U^2+V^2})^{\otimes}}\right)^2}}} \quad (27)$$

Luego de ensamblados todos los elementos del dominio se resuelve el sistema lineal resultante para conseguir las velocidades horizontales provisionales \tilde{U}^{n+1} y \tilde{V}^{n+1} .

3.2.2 Segundo Paso

En el segundo paso se construye una ecuación de Poisson que se resuelve implícitamente para obtener las presiones no hidrostáticas. Una aproximación de la ecuación del momento vertical en (3) es:

$$w_{\xi}^{n+1} = w_{\xi}^n - w_b^{n+1} + w_b^n + \frac{2\Delta t q_b^{n+1}}{\rho H^n} \quad (28)$$

La velocidad vertical en el fondo se estima a partir de la condición de borde cinemática (6) como:

$$w_b^{n+1} = -U^n \frac{\partial h}{\partial x} - V^n \frac{\partial h}{\partial y} \quad (29)$$

$$w_b^n = -U^{n-1} \frac{\partial h}{\partial x} - V^{n-1} \frac{\partial h}{\partial y} \quad (30)$$

Las velocidades horizontales finales, influenciadas por los términos de presión no-hidrostática, pueden ser expresadas de la siguiente forma:

$$U^{n+1} = \tilde{U}^{n+1} - \frac{\Delta t}{2\rho H^n} \left(H^n \frac{\partial q_b^{n+1}}{\partial x} + q_b^{n+1} \frac{\partial}{\partial x} (\xi^n - h) \right) \quad (31)$$

$$V^{n+1} = \tilde{V}^{n+1} - \frac{\Delta t}{2\rho H^n} \left(H^n \frac{\partial q_b^{n+1}}{\partial y} + q_b^{n+1} \frac{\partial}{\partial y} (\xi^n - h) \right) \quad (32)$$

Para obtener una solución correcta entre el campo de velocidades y las presiones no-hidrostáticas, la ecuación de la continuidad se aplica directamente sobre la columna de agua:

$$\left(\frac{\partial U^{n+1}}{\partial x} + \frac{\partial V^{n+1}}{\partial y} \right) + \left(\frac{w_{\xi}^{n+1} - w_b^{n+1}}{H^n} \right) = 0 \quad (33)$$

Al substituir las ecuaciones (28) a (32) en la ecuación (33) se establecen una ecuación de Poisson de

la cual se obtiene la presión hidrostática en el fondo q_b^{n+1} .

Un modelo de elementos finitos de Galerkin para resolver la ecuación de Poisson sobre un elemento Ω_e es:

$$[Q][q_b^{n+1}] = [RQ] \quad (34)$$

$$Q_{ij} = Q1_{ij} + Q2_{ij} + Q3_{ij} + Q4_{ij} + Q5_{ij}$$

$$RQ_i = Q6_i + QLX_i + QLY_i$$

Con las integrales en el dominio del elemento Ω_e definidas por:

$$Q1_{ij} = \int_{\Omega_e} \varphi_i^L \frac{2\Delta t}{\rho \sum_{k=1}^4 H_k^n \varphi_k^L} \varphi_j^L d\Omega_e \quad (35)$$

$$Q2_{ij} = \int_{\Omega_e} \varphi_i^L \frac{\Delta t}{2\rho \sum_{k=1}^4 H_k^n \varphi_k^L} \left(\sum_{k=1}^4 \xi_k^n \frac{\partial \varphi_k^L}{\partial x} - \sum_{k=1}^4 h_k \frac{\partial \varphi_k^L}{\partial x} \right) \frac{\partial \varphi_j^L}{\partial x} d\Omega_e \quad (36)$$

$$Q3_{ij} = \int_{\Omega_e} \varphi_i^L \frac{\Delta t}{2\rho \sum_{k=1}^4 H_k^n \varphi_k^L} \left(\sum_{k=1}^4 \xi_k^n \frac{\partial \varphi_k^L}{\partial y} - \sum_{k=1}^4 h_k \frac{\partial \varphi_k^L}{\partial y} \right) \frac{\partial \varphi_j^L}{\partial y} d\Omega_e \quad (37)$$

$$Q4_{ij} = \int_{\Omega_e} \frac{\partial \varphi_i^L}{\partial x} \frac{\Delta t}{2\rho} \frac{\partial \varphi_j^L}{\partial x} d\Omega_e \quad (38)$$

$$Q5_{ij} = \int_{\Omega_e} \frac{\partial \varphi_i^L}{\partial y} \frac{\Delta t}{2\rho} \frac{\partial \varphi_j^L}{\partial y} d\Omega_e \quad (39)$$

$$Q6_i = \int_{\Omega_e} \varphi_i^L \left(\sum_{k=1}^9 \tilde{U}_k^{n+1} \frac{\partial \varphi_k^C}{\partial x} + \sum_{k=1}^9 \tilde{V}_k^{n+1} \frac{\partial \varphi_k^C}{\partial y} + \frac{\left(\sum_{k=1}^4 w_{\xi_k}^n \varphi_k^L + \sum_{k=1}^4 w_{b_k}^n \varphi_k^L - 2 \sum_{k=1}^4 w_{b_k}^{n+1} \varphi_k^L \right)}{\sum_{k=1}^4 H_k^n \varphi_k^L} \right) d\Omega_e \quad (40)$$

Las integrales sobre el contorno del elemento Γ_e pueden ser escritas como:

$$QLX_i = \int_{\Gamma_e} \varphi_i^L n_x \frac{\partial q_b^*}{\partial x} d\Gamma_e \quad (41)$$

$$QLY_i = \int_{\Gamma_e} \varphi_i^L n_y \frac{\partial q_b^*}{\partial y} d\Gamma_e \quad (42)$$

Con n_x y n_y siendo las componentes en x y y del vector normal unitario en el nodo i y q_b^* un valor de q_b extrapolado para el paso de tiempo $n+1$. Una vez ensamblados todos los elementos del dominio se resuelve el sistema lineal resultante para obtener las presiones no hidrostáticas q_b^{n+1} .

3.2.3 Tercer Paso

Finalmente, una vez conocidas las presiones no-hidroestáticas q_b^{n+1} y las soluciones provisionales \tilde{U}^{n+1} y \tilde{V}^{n+1} , se resuelven las siguientes ecuaciones a través del método de los elementos finitos de Galerkin, para obtener las soluciones finales U^{n+1} , V^{n+1} y ξ^{n+1} :

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{1}{2\rho} \frac{\partial q_b}{\partial x} - \frac{q_b}{2\rho H} \frac{\partial}{\partial x} (\xi - h) \quad (43)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{1}{2\rho} \frac{\partial q_b}{\partial y} - \frac{q_b}{2\rho H} \frac{\partial}{\partial y} (\xi - h) \quad (44)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{\partial(UH)}{\partial x} + \frac{\partial(VH)}{\partial y} \quad (45)$$

Un modelo de elementos finitos de Galerkin para resolver de forma acoplada las ecuaciones (43) a (45) sobre un elemento Ω_e es:

$$\begin{bmatrix} NXU & 0 & 0 \\ 0 & NYV & 0 \\ CU & CV & CE \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U^{n+1} \\ V^{n+1} \\ \xi^{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} NRU \\ NRV \\ NRE \end{bmatrix} \quad (46)$$

$$\begin{bmatrix} NRU \\ NRV \\ NRE \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} NXU & 0 & 0 \\ 0 & NYV & 0 \\ CU2 & CV2 & CE1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{U}^{n+1} \\ \tilde{V}^{n+1} \\ \xi^n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} UQ \\ VQ \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$CE_{ij} = CE1_{ij} + CE2_{ij} + CE3_{ij}$$

$$UQ_i = UQ1_i + UQ2_i$$

$$VQ_i = VQ1_i + VQ2_i$$

Las integrales en el dominio del elemento Ω_e son definidas como:

$$NXU_{ij} = NYV_{ij} = \int_{\Omega_e} \varphi_i^C \varphi_j^C d\Omega_e \quad (47)$$

$$UQ1_i = \int_{\Omega_e} \varphi_i^C \frac{\Delta t}{2\rho} \sum_{k=1}^4 q_b^{n+1} \frac{\partial \varphi_k^L}{\partial x} d\Omega_e \quad (48)$$

$$UQ2_i = \int_{\Omega_e} \varphi_i^C \frac{\Delta t}{2\rho} \sum_{k=1}^4 q_b^{n+1} \frac{\varphi_k^L}{H_k^n \varphi_k^L} \left(\sum_{k=1}^4 \xi_k^n \frac{\partial \varphi_k^L}{\partial x} - \sum_{k=1}^4 h_k \frac{\partial \varphi_k^L}{\partial x} \right) d\Omega_e \quad (49)$$

$$VQ1_i = \int_{\Omega_e} \varphi_i^C \frac{\Delta t}{2\rho} \sum_{k=1}^4 q_b^{n+1} \frac{\partial \varphi_k^L}{\partial y} d\Omega_e \quad (50)$$

$$VQ2_i = \int_{\Omega_e} \varphi_i^C \frac{\Delta t}{2\rho} \sum_{k=1}^4 q_b^{n+1} \frac{\varphi_k^L}{H_k^n \varphi_k^L} \left(\sum_{k=1}^4 \xi_k^n \frac{\partial \varphi_k^L}{\partial y} - \sum_{k=1}^4 h_k \frac{\partial \varphi_k^L}{\partial y} \right) d\Omega_e \quad (51)$$

$$CU_{ij} = \int_{\Omega_e} \left(\varphi_i^L \varphi_j^C \left\{ \sum_{k=1}^4 \xi_k^n \frac{\partial \varphi_k^L}{\partial x} + \sum_{k=1}^4 h_k \frac{\partial \varphi_k^L}{\partial x} \right\} + \varphi_i^L \frac{\partial \varphi_j^C}{\partial x} \sum_{k=1}^4 H_k^n \varphi_k^L \right) d\Omega_e \quad (52)$$

$$CV_{ij} = \int_{\Omega_e} \left(\varphi_i^L \varphi_j^C \left\{ \sum_{k=1}^4 \xi_k^n \frac{\partial \varphi_k^L}{\partial y} + \sum_{k=1}^4 h_k \frac{\partial \varphi_k^L}{\partial y} \right\} + \varphi_i^L \frac{\partial \varphi_j^C}{\partial y} \sum_{k=1}^4 H_k^n \varphi_k^L \right) d\Omega_e \quad (53)$$

$$CE1_{ij} = \int_{\Omega_e} \varphi_i^L \frac{2}{\Delta t} \varphi_j^L d\Omega_e \quad (54)$$

$$CE2_{ij} = \int_{\Omega_e} \left(\varphi_i^L \varphi_j^L \sum_{k=1}^9 U_k^n \frac{\partial \varphi_k^C}{\partial x} + \varphi_i^L \frac{\partial \varphi_j^L}{\partial x} \sum_{k=1}^9 U_k^n \varphi_k^C \right) d\Omega_e \quad (55)$$

$$CE3_{ij} = \int_{\Omega_e} \left(\varphi_i^L \varphi_j^L \sum_{k=1}^9 V_k^n \frac{\partial \varphi_k^C}{\partial y} + \varphi_i^L \frac{\partial \varphi_j^L}{\partial y} \sum_{k=1}^9 V_k^n \varphi_k^C \right) d\Omega_e \quad (56)$$

$$CU2_{ij} = \int_{\Omega_e} \left(\varphi_i^L \varphi_j^C \sum_{k=1}^4 h_k \frac{\partial \varphi_k^L}{\partial x} + \varphi_i^L \frac{\partial \varphi_j^C}{\partial x} \sum_{k=1}^4 h_k \varphi_k^L \right) d\Omega_e \quad (57)$$

$$CV2_{ij} = \int_{\Omega_e} \left(\varphi_i^L \varphi_j^C \sum_{k=1}^4 h_k \frac{\partial \varphi_k^L}{\partial y} + \varphi_i^L \frac{\partial \varphi_j^C}{\partial y} \sum_{k=1}^4 h_k \varphi_k^L \right) d\Omega_e \quad (58)$$

Luego de ensamblados los elementos se resuelve el sistema para alcanzar las soluciones finales. El tiempo de cálculo del modelo es aproximadamente 1.5 veces el tiempo requerido para el modelo hidrostático.

4. Verificación y Validación del Modelo

En esta sección se verifica y valida la exactitud y precisión del modelo de ola no hidrostático integrado en la profundidad usando tres casos de referencia. El primer caso es la propagación de una onda solitaria a lo largo de un canal de profundidad de agua constante. Debido a que la onda solitaria no es una solución de las ecuaciones de aguas poco profundas, este caso verifica la correcta propiedad no-hidrostática del modelo. El segundo caso trata de la propagación de olas regulares sobre una barra sumergida, validando la capacidad del modelo para el manejo de la no linealidad de las olas. El tercer caso es el estudio del *run up* de una onda solitaria sobre una pared vertical.

4.1 Propagación de una onda solitaria a lo largo de un canal de profundidad de agua constante

La onda solitaria es una onda no lineal con amplitud finita; si el fluido es no viscoso, y el fondo horizontal es sin fricción, la onda debe mantener su forma y su velocidad durante todo el proceso de propagación. Este caso se ha utilizado para verificar muchos modelos no hidrostáticos [3] [10] [6] [5].

En este estudio, consideramos un canal sin fricción de 500 m de largo y profundidad del agua h de 10 m. Una condición de radiación de Sommerfeld basada en la elevación de la superficie del agua ζ se especifica en la entrada y en la salida del canal. La onda solitaria se encuentra inicialmente en $x_0 = 150$ m con una altura de ola $A = 2$ m. Los tamaños de malla son $\Delta x = \Delta y = 1$ m y el paso de tiempo es $\Delta t = 0.025$ seg. El número de Courant en cuanto a la celeridad de la ola es $C_r = \frac{\Delta t \sqrt{gh}}{\Delta x} \approx 0.25$, pero números de Courant > 1 pueden ser soportados. Las soluciones analíticas de la elevación de la superficie libre del agua y la velocidad son dadas por:

$$\xi(x, t) = \frac{A}{\cosh^2(k(x - x_0 - ct))} \quad (59)$$

$$u(x, t) = \frac{\xi c}{\xi + h} \quad (60)$$

Donde la celeridad de la onda es $c = \sqrt{g(A + h)}$ y el número de onda $k = \sqrt{\frac{3A}{4h^3}}$.

En la figura 2, se presenta la onda solitaria inicial y las formas de onda analíticas y simuladas a lo largo del canal a los 5, 10 y 15 seg. Existe una ligera reducción de la altura de las ondas en el comienzo de la simulación debido a la condición inicial aproximada por la solución analítica; fenómenos similares fueron reportados por Walters [6] y Yamazaki et al. [5]. Aunque pequeñas ondas residuales fueron observadas, la forma de la ola y su amplitud están bien conservadas durante la simulación.

4.2 Propagación de olas sinusoidales sobre una barra sumergida

Beji y Battjes [11] y Luth et al. [12] llevaron a cabo experimentos físicos acerca de la propagación de olas regulares sobre una barra trapezoidal sumergida en un canal de 37.7 m de largo, 0.8 m de ancho y 0.75 m de profundidad.

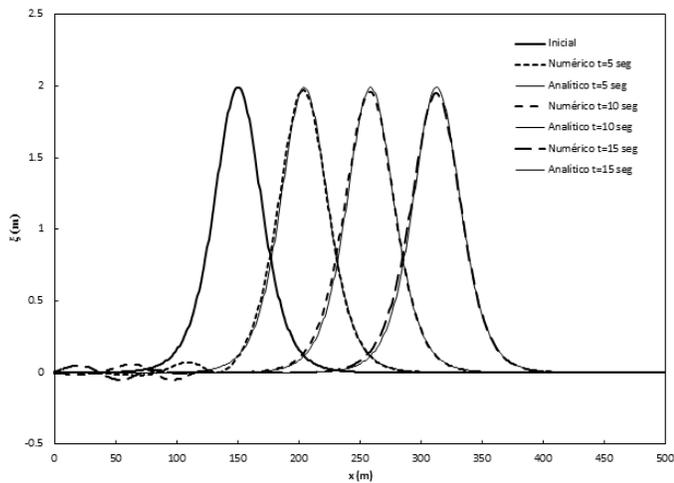


Figura 2. Propagación de ondas simuladas y solución analítica para diferentes tiempos de simulación.

La figura 3 muestra la configuración numérica del experimento. La profundidad del agua quieta es 0.4 m. Una barra trapezoidal de 0.3 m de alto, con una pendiente frontal de 1:20 y una pendiente posterior de 1:10, está situada entre los 6 y los 17 m en el canal. Olas sinusoidales incidentes con una amplitud de 1.0 cm y un período de 2.02 seg, correspondientes al parámetro $kH \approx 0.67$, se generan en el lado izquierdo en base a la teoría de las olas lineal. La frontera del experimento en el lado derecho se modela como un área de flujo abierto donde se impone una condición de radiación de Sommerfeld. La presión no-hidrostática q_b se asume cero en los lados izquierdo y derecho. El dominio computacional de 35 m de largo de la figura es discretizado con una malla de elementos cuadrilaterales de lados $\Delta x = \Delta y = 1.25$ cm. Al inicio de la simulación la velocidad y la elevación de la superficie del agua es 0 en todos los nodos y un intervalo pequeño de tiempo $\Delta t = 0.002$ seg se utiliza para desarrollar la ola suavemente.

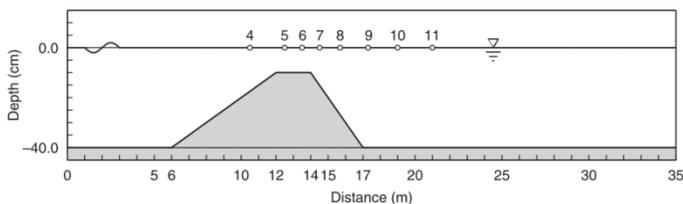


Figura 3. Configuración numérica para la propagación de olas sinusoidales sobre una barra sumergida (Fuente: Yamazaki et al. [5]).

Comparaciones de las elevaciones simuladas y medidas de la superficie del agua se presentan en las

figuras 4-a (puntos 4 a 6) y 4-b (puntos 7 a 9). Se observa que el proceso de asomeramiento en el lado frontal de la barra (puntos 4 y 5) y la transformación de las olas de una zona de dispersión de baja frecuencia (punto 6) a una zona de dispersión de alta frecuencia (punto 8) son correctamente predichas por el modelo. Sin embargo, discrepancias notables aparecen entre las elevaciones de la superficie libre simuladas y medidas detrás de la barra (punto 9), donde se liberan los armónicos más altos. Un análisis espectral [13] ha demostrado que el parámetro kH oscila desde 6 hasta 10 en esta zona; estas olas altamente dispersivas están fuera del rango de aplicación de los modelos no hidrostáticos integrados en la profundidad [6] [5]. Un modelo no hidrostático con múltiples capas podría mejorar las simulaciones en el punto 9.

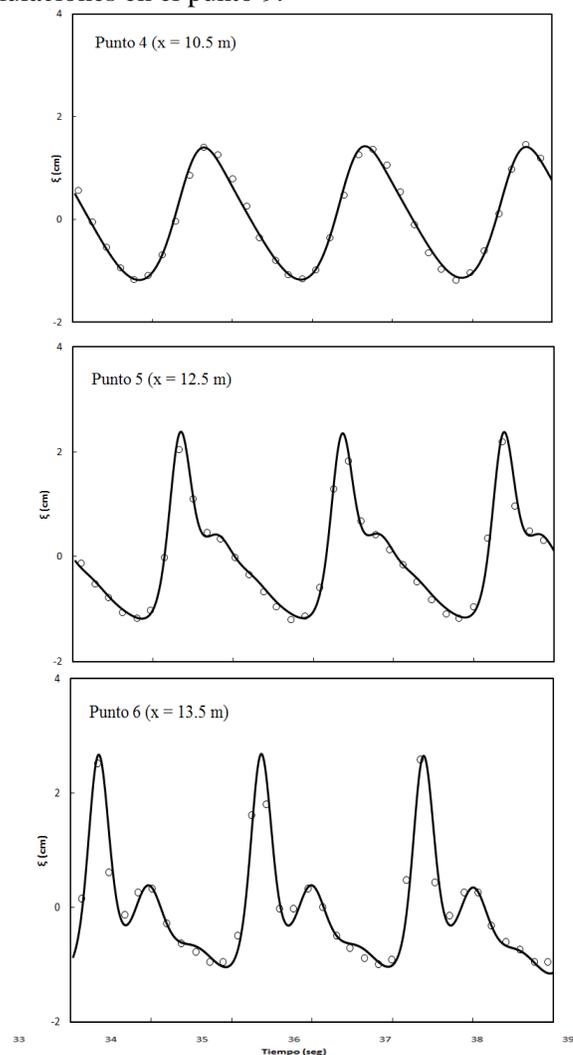


Figura 4-a. Comparación de elevaciones de la superficie simuladas y medidas. Simuladas (líneas sólidas), datos de Beji y Battjes [11] (círculos).

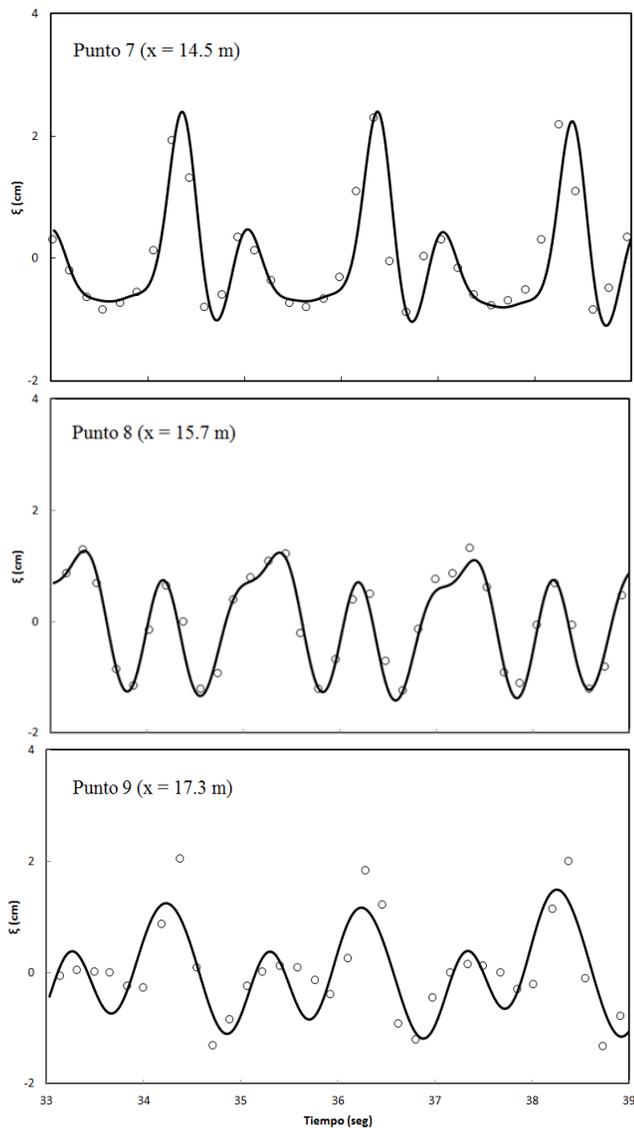


Figura 4-b. Comparación de elevaciones de la superficie simuladas y medidas. Simuladas (líneas sólidas), datos de Beji y Battjes [11] (círculos).

4.3 Run Up de una onda solitaria sobre una pared vertical

Para estudiar los parámetros físicos envueltos en el *run up* de una onda de tsunami, fueron realizados una serie de experimentos a escala de ondas de tsunami financiados por la National Science Foundation [14] [15]. Estos experimentos se han convertido en tests padrón para la validación de modelos numéricos de ondas [16] [17]. Uno de estos experimentos fue simulado para evaluar el desempeño del modelo no-hidroestático desarrollado.

En la figura 5 se muestra el esquema del experimento del *run up* de una onda solitaria sobre una pared vertical. El canal tiene 23.23 m de largo y 0.45 m de ancho, mientras que las pendientes compuestas sobre la batimetría fija del fondo consisten de tres diferentes pendientes (1:53, 1:150 y 1:13) y una sección plana al final del canal. La pared vertical está localizada al final de la pendiente de 1:13. La profundidad del agua en reposo en la sección plana del canal es $h = 21.8$ cm. Para la medición de la elevación de la superficie del agua fueron usados 10 medidores de ondas de capacitancia ubicados a lo largo de la línea central del canal. Se consideraron dos casos, denominados como I y II, con alturas de onda relativa de $A/h = 0.039$ y 0.246 respectivamente. El Caso I corresponde a una onda pequeña que no crece lo suficiente como para quebrarse antes de llegar a la pared. El Caso II es una onda mayor que quiebra justo antes de golpear la pared vertical. Este caso ha sido usado como test por muchos modelos numéricos hidrostáticos [15]. Debido a la falta de dispersión, los modelos hidrostáticos no lineales predijeron frentes de onda más empinados que los medidos, llevando eventualmente a un quiebre de onda prematuro. Adicionalmente, diferencias de fase entre los resultados numéricos y los medidos fueron también observados [18]. En este estudio, la resolución de la malla es determinada por la longitud de la onda para asegurar que la onda sea aproximada por lo menos por cien elementos; debido a ello se utilizaron mallas de elementos cuadrilaterales de 0.05 y 0.02 m de lado para los Casos I y II respectivamente. Correspondientemente, el intervalo de tiempo utilizado en los cálculos fue de $\Delta t = 0.01$ y 0.005 segundos para los Casos I y II respectivamente.

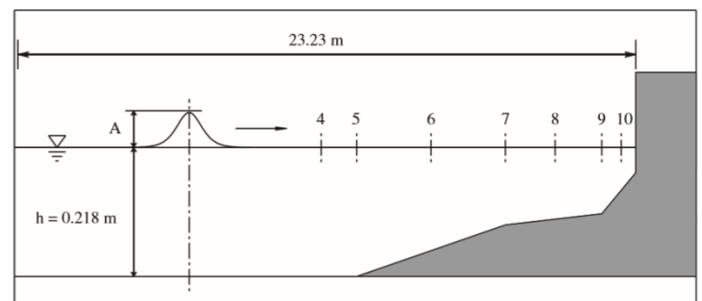


Figura 5. Esquema del experimento del *run up* de una onda solitaria sobre una pared vertical.

Las figuras 6 y 7 muestran las comparaciones entre los perfiles de agua simulados y medidos. Los datos

medidos en el punto 5 son usados como referencia para el ajuste temporal de las formas de onda simuladas. En el Caso I (figura 6), con una altura de onda relativa pequeña, se observa una buena coincidencia entre los valores simulados y medidos tanto para la onda entrando como saliendo luego de reflejarse en la pared vertical. Pequeñas diferencias con respecto al nivel 0 (≈ 2 mm) de los valores medidos en los puntos 7, 8 y 9 pueden ser debidos al montaje del experimento [19]. En el Caso II (figura 7) la onda se quiebra antes de llegar a la pared y el modelo numérico fue capaz de continuar sin el uso de parámetros empíricos, obteniendo predicciones satisfactorias.

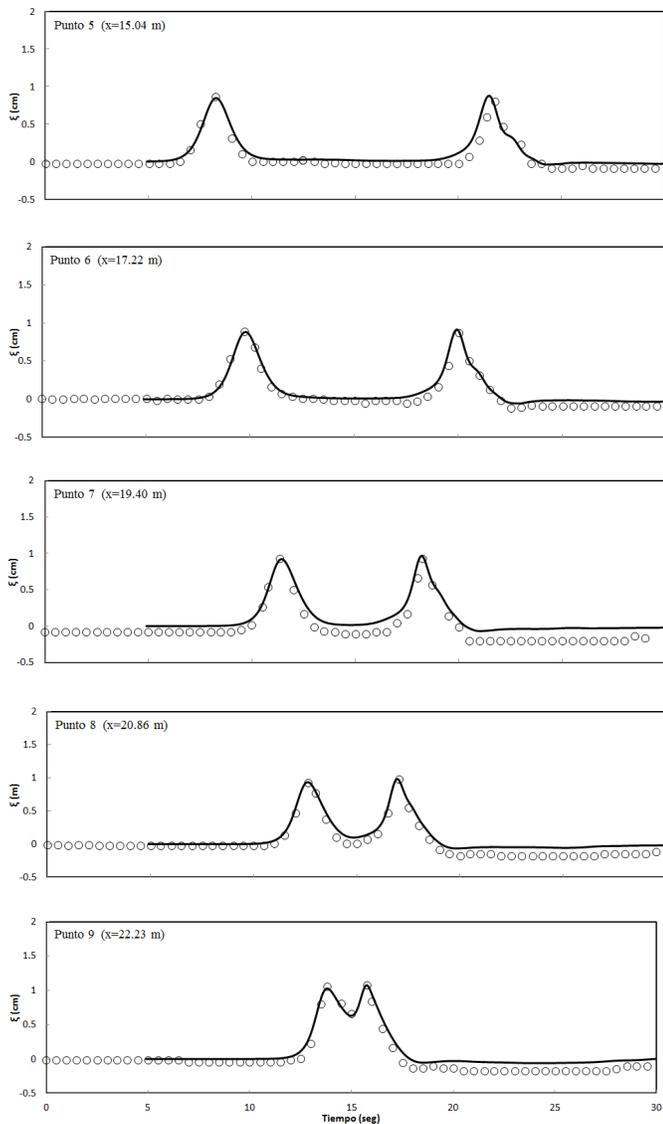


Figura 6. Comparación de elevaciones de las superficies simuladas y medidas (Caso I). Simuladas (líneas sólidas), datos experimentales (círculos).

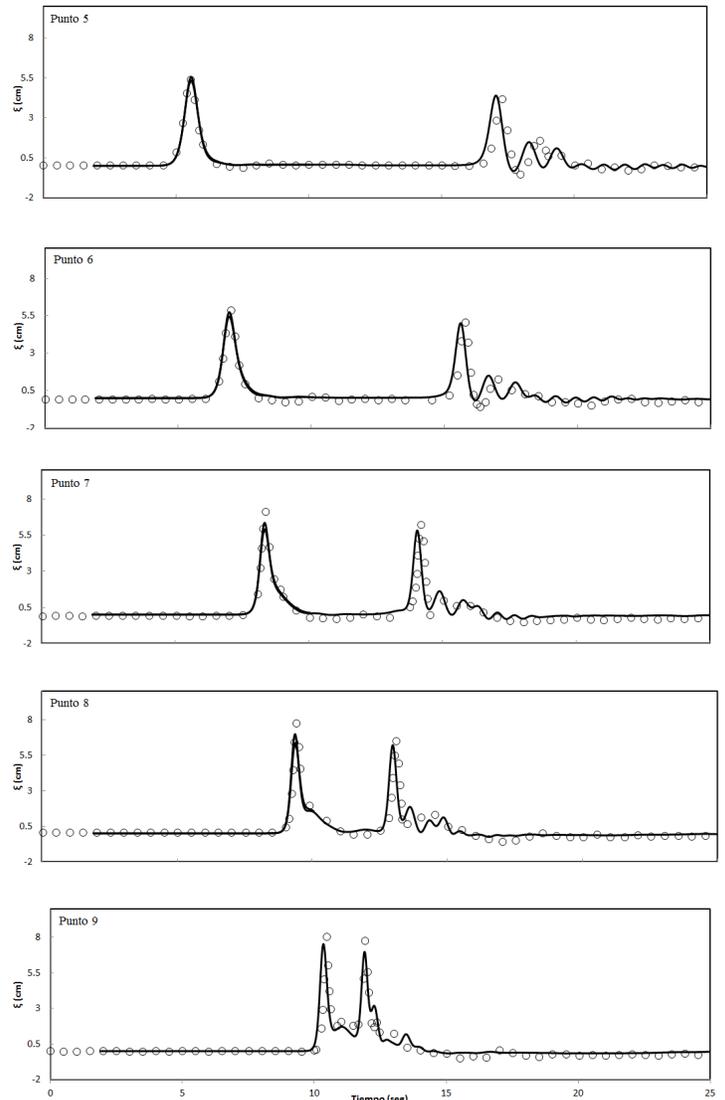


Figura 7. Comparación de elevaciones de las superficies simuladas y medidas (Caso II). Simuladas (líneas sólidas), datos experimentales (círculos).

5. Conclusiones

El desarrollo de modelos no-hidrostáticos tiene aplicación potencial en áreas de interés como: energía oceánica, ambiente, infraestructura costera, educación e investigación.

Un modelo de elementos finitos no-hidrostáticos integrado en la profundidad para la propagación del oleaje en zonas costeras fue desarrollado a partir del modelo hidrostático SisBahia®. Varias pruebas estandarizadas fueron llevadas a cabo para verificar y validar el modelo no hidrostático. La inclusión de un módulo de oleaje dinámico en el sistema SisBahia® será de bastante utilidad, ayudando a difundir aún más

su uso y a propiciar su desarrollo.

El modelo no-hidrostático fue capaz de mantener la forma y la velocidad de propagación de una onda solitaria a lo largo de un canal de profundidad de agua constante. Esto es debido a que las distribuciones verticales de presión y velocidad del modelo no-hidrostático son equivalentes a las de las ecuaciones de Boussinesq clásicas, una solución de las cuales son precisamente las ecuaciones de la onda solitaria (59) y (60).

También, el modelo consiguió describir la transformación de olas sinusoidales sobre una barra sumergida. Específicamente, se reprodujeron con éxito los procesos de asomeramiento y transformación de las olas desde zonas de dispersión de baja frecuencia a zonas de dispersión de alta frecuencia.

Finalmente, el modelo fue capaz de describir el *run up* y la reflexión de una onda solitaria sobre una pared vertical.

Al no requerir el uso de mallas intercaladas, a diferencia de los modelos en Wei y Jia [7] y en Wei y Jia [19], el presente modelo puede ser usado en mallas no estructuradas de elementos finitos.

En el futuro, este modelo de ola será reforzado mediante un algoritmo de mojado y secado para la simulación del *run up* de la onda rompiente sobre superficies inclinadas, las más encontradas en la práctica, y una técnica de múltiples capas para el modelado de olas altamente dispersivas.

6. Referencias

- [1] Casulli V., Stelling G. S. "Numerical simulation of 3D quasi-hydrostatic, free-surface flows". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, No. 7, pp. 678–686, 1998.
- [2] Stansby P. K., Zhou J. G. "Shallow-water flow solver with non-hydrostatic pressure: 2D vertical plane problems". *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 28, No. 3, pp. 541–563, 1998.
- [3] Stelling G., Zijlema M. "An accurate and efficient finite difference algorithm for non-hydrostatic free surface flow with application to wave propagation". *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 43, No. 1, pp. 1–23, 2003.
- [4] Casulli V. A. "Semi-implicit finite difference method for non-hydrostatic free surface flows". *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 30, No. 4, pp. 425–440, 1999.
- [5] Yamazaki Y., Kowalik Z., Cheung K. F. "Depth-integrated, non-hydrostatic model for wave breaking and run-up". *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 61, No. 5, pp. 473–497, 2008.
- [6] Walters R. A. "A semi implicit finite element model for non-hydrostatic (dispersive) surface waves". *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 49, No. 7, pp.721–737, 2005.
- [7] Wei Z., Jia Y. "A depth-integrated non-hydrostatic finite element model for wave propagation". *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 73, July, 2013.
- [8] Rosman P. C. *Referência Técnica do SisBahia*©. (http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA_RefTec_V95.pdf), 2015.
- [9] Brooks A., Hughes T. "Stream-line upwind/Petrov Galerkin formulation for Convection dominated flows with particular emphasis on the incompressible Navier-Stokes equation". *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, 32:199–259, 1982.
- [10] Zijlema M., Stelling G. S. "Further experiences with computing non-hydrostatic free-surface flows involving water waves." *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 48, No. 2, pp.169–197, 2005.
- [11] Beji S., Battjes J. A. "Experimental investigation of wave propagation over a bar". *Coastal Engineering*, Vol. 19, No. 1, pp. 151–162, 1993.
- [12] Luth H. R., Klopman G., Kitou N. "Project 13G: kinematics of waves breaking partially on an offshore bar; LDV measurements for waves with and without a net onshore current." Technical Report H1573, Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands, 1994.
- [13] Roeber V, Cheung K. F., Kobayashi M. H. "Shock-capturing Boussinesq-type model for nearshore wave processes". *Coastal Engineering*, Vol. 57, No. 4, pp. 407–423, 2010.
- [14] Briggs, M.J., Synolakis, C.E., Harkins, G.S., Green, D.R., 1995. Laboratory experiments of tsunami runup on a circular island. *Tsunamis: 1992–1994*, Springer, pp. 569–593, 1995.
- [15] Yeh, H.H.J., Liu, P.L.F., Synolakis, C.E. *Long-wave Runup Models*, World Scientific, Singapore, 1996.
- [16] Fuhrman, D.R., Madsen, P.A. "Simulation of nonlinear wave run-up with a high order Boussinesq model". *Coastal Engineering* 55, 139–154, 2008.
- [17] Zijlema, M., Stelling, G.S., Smit, P. "SWASH: an operational public domain code for simulating wavefields and rapidly varied flows in coastal waters". *Coastal Engineering* 58, 992–1012, 2011.
- [18] Watson, G., Barnes, T.C.D. Peregrine, D.H "Numerical modelling of solitary wave propagation and breaking on a beach and runup on a vertical wall". In: Yeh, H.H.J., Liu, P.L.F., Synolakis, C.E. (Eds.), *Long-wave Runup Models*. World Scientific, Singapore, pp. 291–297, 1996.
- [19] Wei Z., Jia Y., "Simulation of nearshore wave processes by a depth-integrated non-hydrostatic finite element model". *Coastal Engineering* 83, 93-107, 2014.

Análisis e inteligencia de negocios con evaluación de indicadores claves de desempeño

Analysis and business intelligence with evaluation of key performance indicators

Manuel Guillermo Rodríguez López^{1*}, Flor Isabel Salazar Vázquez¹, Luis Stalin Jara Obregón², ¹ Catedrático de la Carrera de Ingeniería de Sistemas, Universidad Católica de Cuenca, Azuay, Ecuador, ¹ Catedrático de la Carrera de Ingeniería Empresarial, Universidad Católica de Cuenca, Azuay, Ecuador, ² Catedrático de la Carrera de Ingeniería de Sistemas, Universidad Católica de Cuenca, Azuay, Ecuador.

¹mgrodriguezl@ucacue.edu.ec, ¹fisalazarv@ucacue.edu.ec, ²lsjarao@ucacue.edu.ec

Resumen– En este artículo se describe cómo las herramientas de análisis e inteligencia de negocios aportan al rendimiento empresarial a través de fijar los indicadores claves de desempeño (KPI) con cortes de medición ajustados para una mayor precisión formando parte del núcleo de un cuadro de mando integral, para aclarar los objetivos organizacionales previa realización de un sondeo local de alta confianza. Esto beneficia en la efectividad de su aplicación si se enfoca al desarrollo de nuevas alternativas con servicios diferenciados e innovadores, aumentando la satisfacción de todos los involucrados. Para esto se indagó en 81 empresas pequeñas y de nivel medio en las cuales fue necesario determinar las dimensiones representativas de estudio, a partir de esto se obtuvo los siguientes KPIs para evaluar; distribución geográfica de clientes, fuerza de ventas, tasa de consumo de productos más y menos vendidos, satisfacción de clientes, productos nocivos para el medio ambiente, por citar los más significativos, y se representa cómo medir algunos de ellos.

Palabras claves– Análisis de negocios, minería de datos, indicadores de desempeño, innovación.

Abstract– This article describes how business analytics and intelligence tools contribute to business performance by setting key performance indicators (KPIs) with tightened measurement slices for greater accuracy by forming part of the core of a balanced scorecard, to clarify the organizational objectives prior to conducting a local survey of high confidence. This benefits in the effectiveness of its application if it focuses on the development of new alternatives with differentiated and innovative services, increasing the satisfaction of all those involved. For this we inquired into 81 small and medium level companies in which it was necessary to determine the representative dimensions of study, from this we obtained the following KPIs to evaluate; distribution of customers, sales force, rate of consumption of products more and less sold, customer satisfaction, products harmful to the environment, to cite the most significant, and represents how to measure some of them.

Keywords– Business analysis, data mining, performance indicators, innovation.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 15 de junio de 2017

Fecha de Aceptación: 25 de septiembre de 2017

1. Introducción

En este trabajo se presenta un extracto de los resultados más significativos del estudio realizado a cerca de la valiosa contribución de las herramientas de inteligencia y análisis de negocios en el desempeño gerencial que contribuyen a la matriz productiva de un país, correlacionado con la satisfacción de clientes y la toma de decisiones de directivos de las organizaciones, conociendo que en la actualidad se priorizan las decisiones más que la planificación.

Con este principio filosófico, es preciso iniciar explicando que la empresa moderna ya no planea para manejar únicamente la situación actual sino también para afrontarse a los desafíos del futuro con éxito, fortaleciendo con proyecciones fundamentadas en una planificación estratégica y con simulación de escenarios, estos dos componentes ayudan a una gestión flexible y expansiva para la toma de decisiones efectiva, el factor de éxito detectado para tal propósito son los datos actuales e históricos de las distintas fuentes que posea la organización. En tal efecto, los

administradores recientes también se manejan bajo nuevos criterios como son, innovación, creatividad, competitividad y toma de decisiones, en una espiral sistemática de mejora continua [1].

Esta dinámica de constante evolución y de modelos de gestión en una sociedad globalizada, donde la información, el conocimiento, modelos y estrategias de gestión se perfeccionan constantemente, ha influido en las empresas a reinventarse permanentemente con el propósito de aumentar la calidad de sus servicios y mejorar el porcentaje de su cuota de mercado. En este contexto, la rivalidad entre las organizaciones similares es muy alta, ya que sus fines son comunes, tales como, fidelidad y satisfacción de los clientes, aumentar los índices de ventas, incrementar la utilidad neta de los accionistas, entre otras. Ante esto es válido decir que, la gestión eficiente con un cliente puede ser una oportunidad potencial de negocio y en consecuencia aumentar las ganancias [2].

Sin embargo, esto implica mayor desgaste por parte del nivel estratégico porque tienen que analizar una cantidad de parámetros variables que contienen mucha información y datos desordenados que cambian constantemente, los mismos que se deben mostrar en una granularidad fina de los detalles o a veces en un formato resumido para facilitar su análisis (*drill down*) [3].

En tal virtud, los factores de cambio [4], de mayor importancia dentro del mercado están dadas por, las permutaciones entre la oferta y la demanda, ya sea empujados por la innovación o mejora continua de los servicios [5], la actualización inmediata del cambio de estado de los clientes y la evolución de distintos escenarios predictivos relacionados con los indicadores de negocio mencionados u otros que se puedan fijar.

Al mismo tiempo, se debe aclarar qué es fundamental conocer el negocio, por un lado identificado todos sus involucrados (*stakeholders*), para algunos autores [6] estos son personas o grupos que presentan intereses legítimos en aspectos sustanciales en las actividades de la empresa y para otros se consigue interpretando los elementos de la planificación estratégica [7].

Una vez caracterizados estos conocimientos y debidamente fundamentados, ya se puede preparar el diseño de un modelo eficiente de desarrollo estratégico para implementar en una aplicación BI, con una alternativa diferente y características innovadoras. Lo que implica que los integrantes directivos tengan otro enfoque y la capacidad de adaptarse a nuevos

paradigmas de gestión [8]. Utilizando herramientas con las que se pueda ensamblar perfectamente, la planificación estratégica y la toma de decisiones con las aplicaciones de inteligencia de negocios (del inglés *Business Intelligence BI*) [9]. Esto complementado con los indicadores claves de desempeño (KPI) con puntos de corte bien establecidos que midan la realidad de dichos logros o las carencias de los mismos como recomienda el método Alkire y Foster [10]. Cerrando con la ejecución de las iniciativas representadas en un tablero de control del cuadro de mando integral (BSC) [11].

En consecuencia, el objetivo principal de este estudio fue caracterizar las estrategias, procesos y datos del negocio en las pequeñas y medianas empresas productivas (PYMES), para la evaluación por medio de indicadores de ajuste. Los mismos que se representaron en un cuadro de mando integral normalizado y desarrollado con herramientas de BI. Para lo cual es preciso integrar con el estudio de simulación por escenarios la que suministrará otras alternativas en caso de no obtener los resultados esperados [12] con los elementos y variables analizados conjuntamente con la planificación estratégica, donde se involucra la medición en tiempo real de los KPI's para ganar eficacia en las tareas gerenciales.

Por otro lado, la metodología es de tipo cuantitativa y el diseño que se ha implementado en la investigación es descriptivo y aplicada [13], considerando la tendencia del estudio, para lo cual se desarrolló un proceso estadístico con las encuestas hechas a los involucrados. Las mismas se realizaron a los directivos y demás involucrados de las empresas.

Una vez examinados los factores más importantes en el proceso de la investigación, se determinó claramente que la implementación de una solución BI es lo apropiado, para lo cual se plantea utilizar una bodega del datos y un tablero de control para la interfaz dinámica de usuario [14], para brindar servicios tales como, análisis descriptivos y predictivos pertinente a clientes, productos y transacciones presentando en tableros amigables e intuitivos, aprovechando las bondades de los cubos OLAP (*On-Line Analytical Processing*) [15], que gestionan una gran cantidad de información y analizar elementos de incertidumbre necesarios para tomar buenas decisiones [16] cristalizando el accionar de la alta gerencia con indicadores claros y ajustados.

Basados en el problema, los objetivos y la fundamentación teórica, se formula como aporte,

utilizar los modelos computacionales de última generación como, herramientas BI, minería de datos para modelar el negocio [17] levantado a partir de un mapa y matriz estratégica de un *balance scorecard* [18], con ayuda de un *datawarehouse* o un *datamart* como motor dorsal del sistema (Rosado, 2006) y el uso del tablero de control como interfaz dinámica, intuitiva e interactiva con el usuario [19], lo cual permite dar un salto positivo a la gestión empresarial con las nuevas tendencias tecnológicas y garantizar un impulso en la economía de las empresas de una región.

2. Metodología

Para la investigación se usó el tipo cuantitativo, con el cual se relacionaron tres diseños, Primero el descriptivo con el afán de, explorar, identificar, interpretar la realidad actual del objeto de estudio considerando su desempeño y vulnerabilidades para luego encontrar las variables a utilizar, como los tipos de datos de las empresas, las transacciones, los involucrados y los indicadores utilizados. Esto orientando a los resultados finales en la que se intenta demostrar el comportamiento de las personas, cosas y entidades en función de los análisis de los mismos [20]. Siguiendo con la articulación de la investigación alrededor de este modelo se considera crucial, la elección, clasificación, estudio, interpretación y representación de la información. Por otro lado se utilizó también la investigación de campo, para explorar, implementar y comprobar métodos utilizados con lo que se reforzaron los resultados y conclusiones en el campo donde se generó el estudio [21]. Por último, se usó el diseño aplicado, porque una vez realizados sistemáticamente los procesos identificados anteriormente, se evaluó un prototipo piloto que mostró los resultados de la propuesta final.

2.1 Población y Muestra

Para el muestreo la investigación se llevó a cabo en una población de 480 empresas comerciales e industriales de las localidades La Troncal y El Triunfo, provincia Cañar y Guayas respectivamente, registradas en las cámaras de comercio. La población está fijada en dos grupos diferenciados, el primero está compuesto por el número de directivos de las organizaciones en estudio y el segundo por sus empleados, aplicando la fórmula descrita abajo, la muestra obtenida es de 81 empresas a encuestar.

El tipo de muestra que se empleó en la investigación es el no probabilístico por razón de darles más

flexibilidad a los encuestadores puesto que varias empresas no brindan las facilidades de ingreso a sus instalaciones y extraer la información. Sin embargo se ha considerado que esto no resta la confianza de la investigación debido a que la población posee características similares y los datos recabados provienen de los indicadores claves de desempeño de las organizaciones y estos son comunes para todas.

Otras fuentes de información que alimentaron la investigación son las bases de datos de aquellas empresas que disponen de alguna estructura de almacenamiento digital y con el apoyo de estudiantes universitarios agilizaron el levantamiento de toda esta información. Fórmula usada para calcular la muestra del estudio es la distribución gaussiana.

$$n = \frac{Z^2 N * p * q}{E^2 (n-1) + Z^2 * p * q} \quad (1)$$

Estas variables se describen a continuación (ver tabla 1)

Tabla 1. Simbología de ecuación de la muestra

Variable	Descripción
n	Tamaño de la muestra
P	Posibilidad de que ocurra un evento, p= 0,5
1N	Tamaño de la población
E	Error, para este caso será del 6 %; E=0,06
Q	Posibilidad de no ocurrencia de un evento q= 0,5
Z	Nivel de confianza, para este caso será el 95 %, Z= 1,96 (tabla de distribución)

Fuente: por el autor.

Remplazando los valores en la ecuación 1 se obtuvo este resultado:

$$n = \frac{(1.96)^2 * 480 * 0.5 * 0.5}{(0.06)^2 (480 - 1) + (1.96)^2 * 0.5 * 0.5} = 81 \quad (2)$$

3. Resultados

Aplicando la metodología descrita se indagó por un lado sobre la disponibilidad de sistemas de información y sobre el uso de KPIS derivados de las dimensiones generales como son; ventas, clientes, abastecimiento, talento humano responsabilidad social y medio ambiente, cuyos resultados se visualizan a continuación.

Las empresas que disponen de algún tipo de sistemas de información para manejo de las transacciones financieras se tiene que alrededor del 73% del total encuestado disponen de un sistema de información transaccional y el 27% no disponen, lo que muestra una tasa considerable de empresas que llevan las operaciones comerciales manualmente (Ver figura 1).

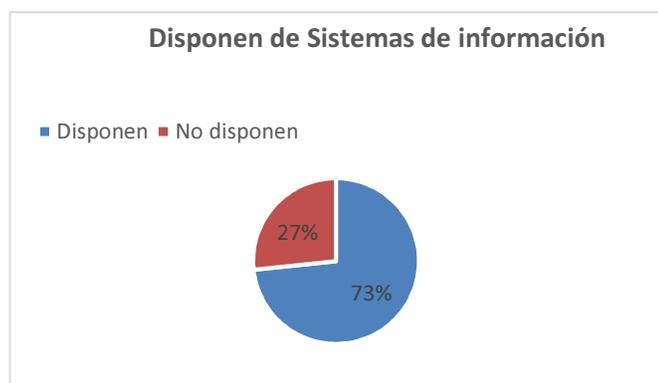


Figura 1: Empresas que disponen de sistemas de información transaccionales.
Fuente: El autor.

Por otro lado también se obtuvieron los indicadores claves de desempeño (KPI) de mayor preferencia de todos los encuestados, por ser los que generan información relevante para tomar decisiones importantes para las empresas.

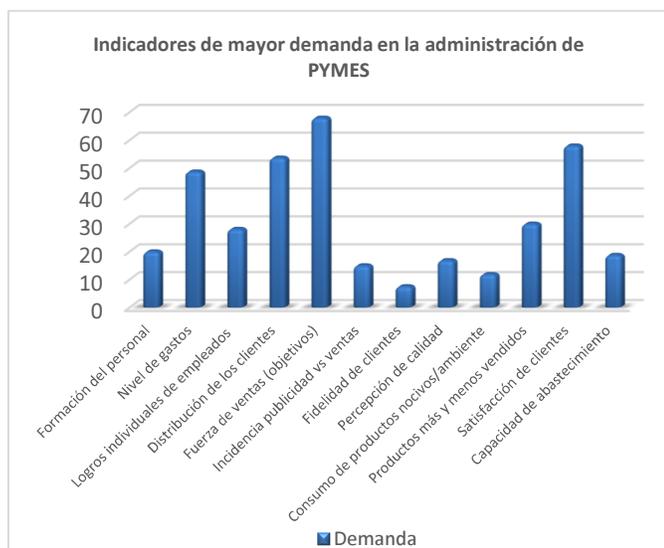


Figura 2. Nivel de demanda de indicadores por las PYMES.
Fuente: Por el autor.

En el estudio se aprecia claramente que el indicador, fuerza de ventas, es el más sugerido, seguido por,

satisfacción de clientes, distribución de los clientes, gastos y productos más y menos vendidos los demás tienen una frecuencia relativamente baja (Ver figura 2).

Finalmente se obtuvieron datos sobre el porcentaje de empresas que utilizan sistemas de información con los KPI'S presentados en el gráfico anterior, para medir el desempeño de sus organizaciones. Aquí los resultados son contundentes ya que solo el 5% respondieron que sí disponen de estos sistemas y aplican las mediciones, esto implica que el 95% restante no aplican o disponen de este servicio (Ver figura 3).

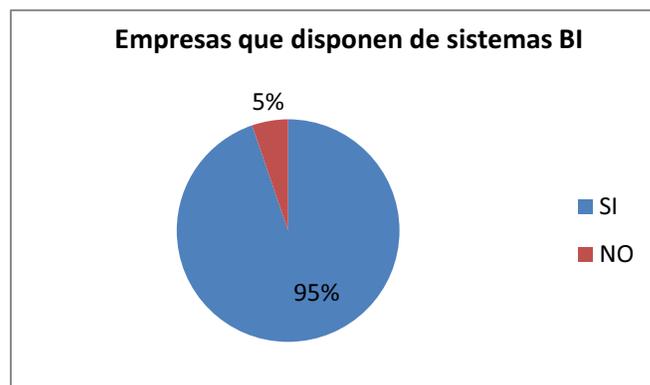


Figura 3. Tasa de PYMES que disponen sistemas de BI.
Fuente: Por el autor.

Con los resultados de la primera fase se procedió a implementar la aplicación BI, en el 10% de las empresas encuestadas con la finalidad de medir la percepción de mejoramiento del desempeño y el nivel de satisfacción de los involucrados (*stakeholders*). Todo esto con el propósito de ajustar la alineación de los objetivos estratégicos con los servicios de TI y aumentar la confianza por el personal que toma decisiones claves diariamente dentro de las empresas. Además esta propuesta genera una mayor competitividad y calidad para afianzar la sostenibilidad de las organizaciones [22].

La arquitectura adoptada como solución, está compuesta de tres etapas. En la primera es necesario desarrollar la planificación estratégica de la tecnología de la información (PETI), donde se describe la visión institucional, como la luz que guiará a la organización a un nuevo escalón de desarrollo. Para lo cual se usan nuevas tendencias de gestión estratégicas y tecnologías computacionales, con técnicas de minería de datos y algoritmos descriptivos y predictivos, que le dan un nuevo enfoque a esta actividad (ver figura 4).

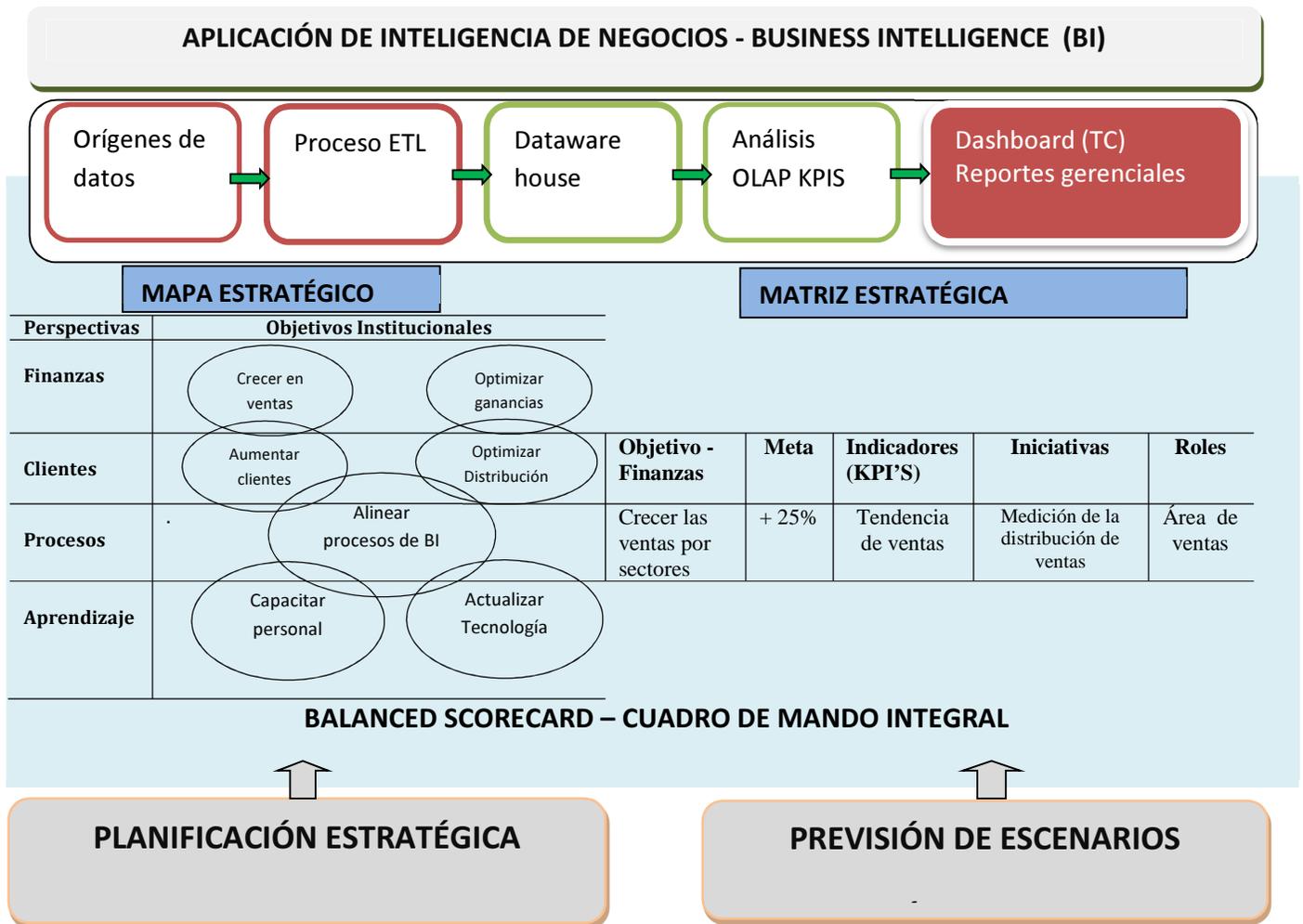


Figura 4: Arquitectura del sistema de análisis e inteligencia de negocios para el desarrollo de las PYMES.

Fuente: Por el autor.

Luego se caracterizan los objetivos institucionales con sus respectivos proyectos de ejecución, adicional a esto se complementa con la planificación por escenarios para desarrollar un plan predictivo en el cual se determinen múltiples alternativas en caso de tener cambios en las variables más importantes de medición de los objetivos o metas trazadas en el plan.

La segunda etapa, se compone de un *balanced scorecard*, aquí se mapea los componentes de la primera etapa de forma clara, se ajustan las perspectivas y se realiza el proceso de operacionalización de los objetivos, para determinar las variables e indicadores en la matriz estratégica para proporcionar las variables y los KPIs apropiados a las herramientas de inteligencia de negocios y minería de datos.

Como se puede ver, el núcleo del modelo es el mapa estratégico del BSC caracterizado por la matriz estratégica y que a su vez hacen un puente bastante sólido y confiable para alinear la planificación empresarial con las tecnologías computacionales asistidos por algoritmos de agrupación concretamente para este estudio y código MDX [23].

En la tercera etapa, se construyó la aplicación BI bajo los lineamientos de las etapas uno y dos de forma sistemática, esta última se inicia con los procesos ETL tomando como experiencia de trabajos anteriores [24], luego el *analysis services* con la creación de los cubos OLAP y KPIs definidos en la etapa dos, finalmente se desarrolló el *reporting services* para crear los tableros de control.

Entre los servicios ofrecidos por esta aplicación BI está proporcionar información analítica de; KPI de tendencia de ventas el cual se obtiene de la sumatoria de

las ventas por periodos $\sum_{fi}^{fn} v(i)$ (mensual, semestral, anual), donde fi es la fecha inicial del período y fn la fecha final del periodo y $v(i)$ es cada venta, correlacionando con períodos anteriores para apreciar la proyección.

Para calcular el KPI del margen de costos en proporción a la utilidad neta antes de impuestos se usa la expresión $mc=Un/Ct$ donde Un es la utilidad neta y ct son los costos totales, para hacer un análisis horizontal de los años anteriores y utilizar en proyecciones futuras.

Para el KPI de satisfacción de clientes se calcula a partir de la fidelidad, deben pasar por un proceso de ajuste en cuanto al punto de corte con dos niveles de satisfacción en base de la frecuencia de compra. El punto de corte fijado es 4, una vez por semana, si la frecuencia al mes es mayor al punto de corte el nivel del KPI de confianza es alto o ideal y si está entre 2 y 4 visitas al mes el nivel de confianza es medio satisfactorio. Entonces a partir de aquí se puede medir si la fidelidad alta media o baja, este indicador les dará información valiosa a los directores para tomar decisiones.

La siguiente etapa es construir la bodega de almacenamiento o *Datawarehouse*, que puede ser estrella o constelación, para migrar la información limpia desde la base de datos del sistema transaccional mediante un proceso de extracción, transformación y carga (ETL) y llenar la estructura del *datawarehouse*, finalmente por medio de un cubo OLAP se termina de armar el motor dorsal (*back-end*) de la aplicación con el diseño de las respectivas dimensiones y medidas (*measures*) (véase figura 5).

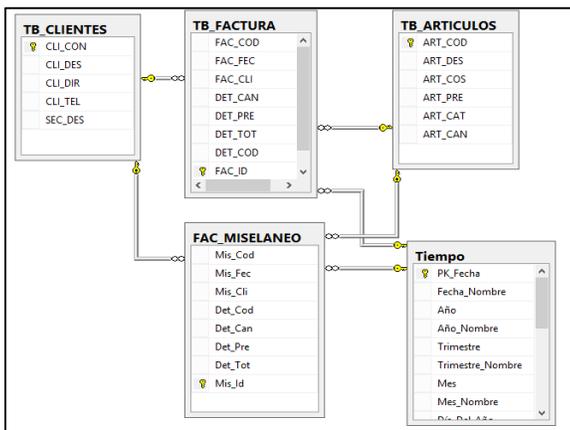


Figura 5. Modelo estrella para implementar el *datawarehouse* del prototipo.
Fuente: Por el autor.

El ETL fue creado para poblar el *datawarehouse* propuesto en el cual la estructura cuenta con procesos de depuración para transformar algunos tipos de datos, agregar nuevas columnas y eliminar registros inconsistentes relacionados con las tablas de fuentes de datos de origen (Ver figura 6).

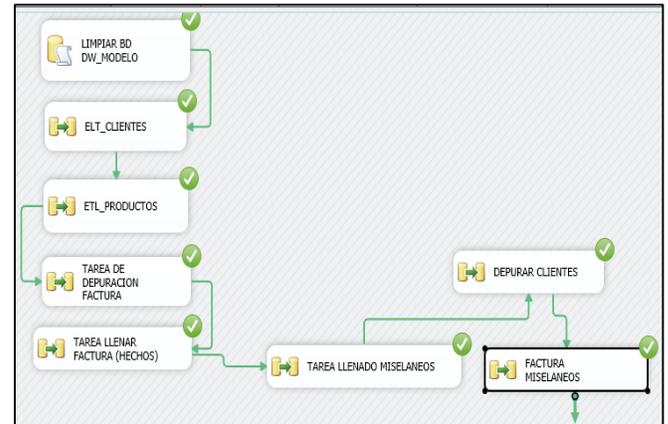


Figura 6. Proceso ETL para llenar la bodega de datos.
Fuente: Por el autor.

También es importante construir los KPIs de acuerdo a las condiciones extraídas del estudio previo, estrechamente alineados a los requerimientos del negocio tal como indica el BSC (ver figura 7).

Mostrar estructura	Valor	Objetivo	Estado	Tendencia	Peso
KPIActivos	7121	9257,3		↑	
KPIVentas	444572,7	666859,03		↑	

Figura 7. Proceso de *Analysis Services* de creación del cubo OLAP y los KPIs.
Fuente: Por el autor.

Los tableros de control creados son la etapa final, aquí se muestran los resultados del estudio propuesto con los cuales se validan y evalúan el nivel de rendimiento de metas y objetivos planteados en el BSC (*front-end*) en ellos se visualizan los informes gerenciales con indicadores gráficos KPI, opciones de consultas dinámicas parametrizadas con técnicas *drill down* y *Drill through*, el cual permita el análisis en vertical y horizontal de la información para la toma decisiones (ver figuras 8 y 9).

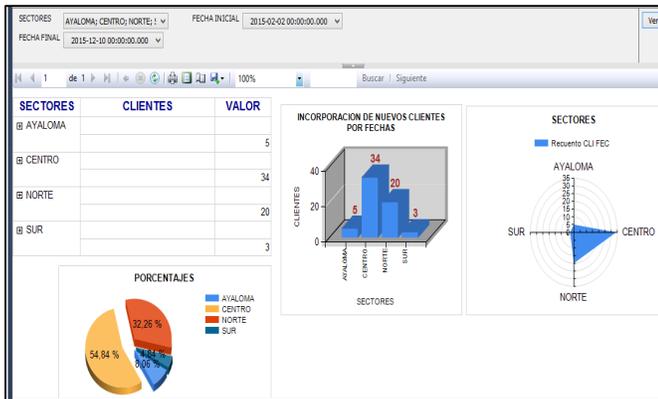


Figura 8. Modelo de un tablero de control (*dashboard*) para visualizar la fuerza de ventas.
Fuente: por el Autor.

Aplicando minería de datos con algoritmos de agrupación (*clustering*) es posible segmentar los clientes por zonas para medir la tasa de distribución geográfica, combinado con mapas de tipo *shapefile* (.shp) [25] proveídos por ESRI (*Environmental Systems Research Institute*), esto facilita desarrollar estrategias de marketing o publicidad (ver figura 9).

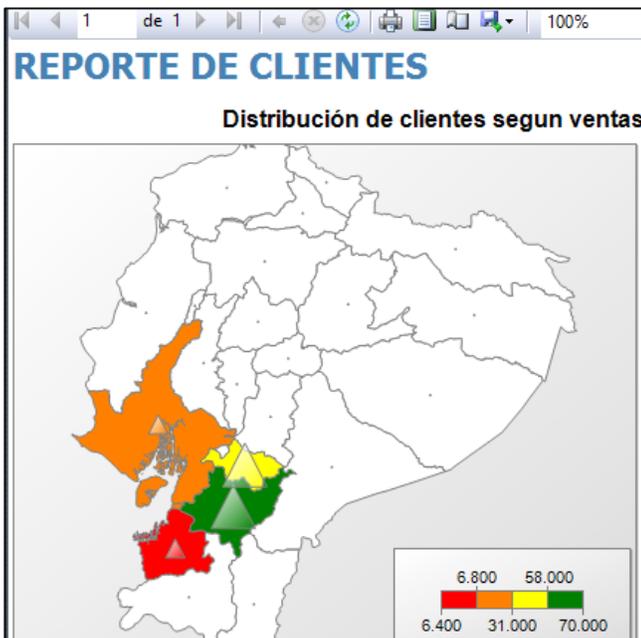


Figura 9. Minería de datos visualiza la distribución de clientes en el mapa (*SQLServer Reporting Services*).
Fuente: por el Autor.

Otro de los indicadores valorados por los encuestados es relacionado con la clasificación de los productos n (n es un parámetro ajustable por el usuario)

más vendidos, este indicador es valioso para calcular y ajustar el proceso de abastecimiento de productos y control de inventarios, análogamente se evalúa también los menos vendidos válidos para tomar decisiones (ver figura 10).



Figura 10. Muestra la clasificación de productos más vendidos en un período determinado.
Fuente: por el Autor.

La implementación del modelo propuesto es está fundamentado en la simplicidad considerando el modelo, las estrategias y herramientas a usar descritas en este estudio. Adicionalmente es recomendable considerar en el proceso de diseño y desarrollo, los tres elementos sugeridos por Kendall & Kendall [26]; primero, la factibilidad operacional con una aplicación amigable para los usuarios, funcional y personalizada para satisfacer los requerimientos; segundo, la factibilidad técnica debe responder a las tendencias actuales y futuras para que tenga mayor cobertura y aplicabilidad, por último, la factibilidad económica, donde se examinaron los recursos básicos de hardware, *software* a sabiendas que el retorno de la inversión es seguro a mediano plazo. En términos generales la propuesta está enfocada en la optimización del desempeño de áreas estratégicas y la disminución de los tiempos al generar informes y ejecutar tareas gerenciales.

La herramienta fue desarrollada usando como plataforma tecnológica la suite de aplicaciones de *SQL Server 2012*. Las actividades que se ejecutaron en el ciclo de vida para la construcción de la aplicación propuesta responden a un análisis basado en el servicio y la mejora continua (CSI) [27], para dejar una ventana abierta a la optimización de la aplicación para afrontar

mejor los cambios estratégicos y tecnológicos que se den en la empresa.

4. Discusión

La contribución a la sociedad, la enseñanza y al sector empresarial brindado en esta propuesta BI para las dimensiones relevantes de una empresa, parte de tener claros los siguientes principios básicos, primero es definir bien las dimensiones o perspectivas. Segundo es desarrollar los KPIS derivados de cada dimensión con sus puntos de corte bien calculados. Tercero elaborar un proceso ETL bien estructurado para poblar la bodega de datos el cual garantizará la data suficiente para el análisis. Cuarto desarrollar los tableros de control dinámicos e intuitivos, que sean fáciles de leer e interpretar el rendimiento de los objetivos y metas. Quinto evaluar el desempeño de la aplicación basada en los KPIS para reajustarlos.

Además este nuevo enfoque de un modelo basado en BI ayuda a contestar algunas preguntas que no eran muy claras al principio de la investigación (ver tabla 2).

Tabla 2. Respondiendo a las preguntas de investigación basado en el estudio realizado

Preguntas	Respuestas
¿Por qué un alto porcentaje de PYMES son administradas sin indicadores claros de desempeño?	Porque no es fácil identificar indicadores apropiados a cada empresa. Porque muchos directivos administran de forma clásica y no modernizan su empresa con nuevas técnicas y herramientas computacionales.
¿Quiénes deben tomar decisiones?	Las decisiones deben ser tomadas cuando la persona encargada de un área o proyecto importante disponga de un sistema de indicadores y este en la capacidad de entender, interpretar y aplicar en una decisión productiva.
¿Qué estrategias se deben definir?	Hacer un estudio previo. Conocer a detalle los problemas de su organización, caracterizando los elementos claves de desempeño.
¿Cuáles son los indicadores claves de	Los KPIS que se ajusten a medir lo más acertado posible el rendimiento periódico de la

desempeño?	organización evaluada. Estos KPIS deben estar clasificados dentro de las dimensiones estratégicas de la organización en función de su rendimiento y vulnerabilidad.
------------	--

Fuente: Por el autor.

5. Conclusiones

La satisfacción de un investigador al finalizar un proceso de estudio, es compartir con la sociedad los resultados y experiencias de una forma positiva, las mismas que se detallan a continuación.

- Lo más destacado en este estudio es haber desarrollado un plan sistemático de implementación de una aplicación BI que ayude a la gestión estratégica de ventas y de relación con los clientes, para el análisis y toma de decisiones para PYMES en zonas de bajo desarrollo investigativo.
- Presentar un nuevo enfoque de un modelo para el desarrollo de aplicaciones BI que asegure el alineamiento entre el negocio y las herramientas computacionales.
- La importancia de aplicar inteligencia de negocios y minería de datos de forma paralela para reforzar la gestión admirativa de una organización.
- Destacar la forma de identificar los KPIS derivados de dimensiones o perspectivas influyentes en el negocio fijando un punto de corte apropiado para medir correctamente el desempeño de tal dimensión.
- Finalmente, es importante dejar una aplicación BI como prototipo para evaluar los beneficios y confianza de los KPIS en el desempeño de las empresas, la cual servirán como cimiento para desarrollar y ampliar nuevas técnicas computacionales en el campo de la minería de datos o bigdata, considerando el grado de confianza del crecimiento de su demanda y oferta en el futuro.

6. Referencias

- [1] F. A. Baraybar, *El Cuadro de Mando Integral «Balanced Scorecard»*. ESIC Editorial, 2011.
- [2] Á. E. Talaya, *Principios de marketing*. ESIC Editorial, 2008.
- [3] F. Telefónica, *Las TIC en la Administración Local del futuro*. Fundación Telefónica, 2008.
- [4] A. Cue Mancera and L. Quintana Romero, *Introducción a la macroeconomía: un enfoque integral para México*. Larousse - Grupo Editorial Patria, 2014.
- [5] C. del. Olmo Díaz, *Calidad y excelencia en la gestión de*

- las Pymes españolas. Fundación Escuela de organización industrial, 2009.
- [6] F. N. García, *Responsabilidad Social Corporativa: Teoría y práctica*. ESIC Editorial, 2012.
- [7] P. D. DELGADO, *!PLANIFICANDO ESTRATEGICAMENTE!*. LULU COM, 2015.
- [8] F. Izquierdo, M. Ángeles, M. Torres, M. Jesús, R. Lirio, and J. María, *El gobierno corporativo como motor de la responsabilidad social corporativa*. Publicacions de la Universitat Jaume I, 2010.
- [9] R. Steele and Michael C Mankins, “Deje de hacer planes, comience a tomar decisiones,” *Harv. Bus. Rev.*, vol. 84, pp. 62–72, 2006.
- [10] S. Alkire and J. Foster^o, “Understandings and Misunderstandings of Multidimensional Poverty Measurement,” 2011.
- [11] J. M. S. de V. Ancín, *El plan estratégico en la práctica*. ESIC Editorial, 2010.
- [12] B. Tracy, *Cómo lideran los mejores líderes*, vol. 8. Thomas Nelson Inc, 2011.
- [13] C. A. B. Torres, *Metodología de la investigación: para administración, economía, humanidades y ciencias sociales*. Pearson Educación, 2006.
- [14] T. Gauchet, *SQL Server 2008 R2: Implementación y despliegue de una solución de Business Intelligence*. Ediciones ENI, 2011.
- [15] J. N. M. López, J. P. Vela, and J. C. T. Mondejar, *Diseño y explotación de almacenes de datos*. Editorial Club Universitario, 2013.
- [16] H. Guerrero Salas, M. A. Mayorga Morato, and O. de. Antonio Suárez, *Teoría de la decisión aplicada*. Ecoe Ediciones, 2014.
- [17] A. Sherif, *Practical business intelligence learn to get the most out of your business data to optimize your business*. Packt, 2016.
- [18] D. Norton and R. Kaplan, *El Cuadro de Mando Integral: The Balanced Scoreboard*. Grupo Planeta, 2014.
- [19] Cima IT, “Inteligencia de Negocios - Cima,” 2014. [Online]. Available: <http://www.cimait.com.ec/soluciones-servicios/inteligencia-negocios/>. [Accessed: 24-Feb-2015].
- [20] E. A. R. Moguel, *Metodología de la Investigación*. Univ. J. Autónoma de Tabasco, 2005.
- [21] L. T. Bermúdez and L. F. (Luis F. Rodríguez, *Investigación en la gestión empresarial*. Ecoe Ediciones, 2013.
- [22] M. L. Trujillo, *Planeación estratégica de tecnologías informáticas y sistemas de información*. Universidad de Caldas, 2007.
- [23] Microsoft, “Conceptos clave de MDX (Analysis Services),” 2017. [Online]. Available: <https://msdn.microsoft.com/es-es/library/ms144884.aspx>. [Accessed: 13-Jun-2017].
- [24] Jorge Rodas, Guillermo Rodríguez, and Jesennia Cárdenas, “BUSINESS INTELLIGENCE Y SU INCIDENCIA EN LA TOMA DE DECISIONES EN LAS EMPRESAS OPERADORAS DE TELECOMUNICACIONES DEL CANTÓN LA TRONCAL, ECUADOR,” 2015.
- [25] Instituto Geográfico Militar, “cartografía-de-libre-acceso-escala-50k – Geoportal Ecuador,” 2017. [Online]. Available: <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/cartografia-de-libre-acceso-escala-50k/>. [Accessed: 27-Jun-2017].
- [26] K. E. Kendall and J. E. Kendall, *Análisis y diseño de sistemas*, 8va. Edici. Pearson Educación, 2014.
- [27] J.-L. Baud, *ITIL V3 : entender el enfoque y adoptar las buenas prácticas*. Ediciones ENI, 2016.

Análisis de la generación de patentes de invención, disponibilidad de ingenieros en Panamá y su relación con el índice de innovación

Analysis of the generation of invention patent, availability of engineers in Panamá and its relationship with innovation index

Anibal Fossatti Carrillo^{1*}, Delva Batista²

¹ Centro de Innovación y Transferencia Tecnológica, Universidad Tecnológica de Panamá, ^{1,2} Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Tecnológica de Panamá

¹ anibal.fossatti@utp.ac.pa, ² delva.batista@gmail.com

Resumen– De acuerdo al Foro Económico Mundial (World Economic Forum, WEF), el cual evalúa el índice de competitividad de 144 países, Panamá se encuentra actualmente en la posición 40 en el área de innovación. En base a los indicadores de patentes y disponibilidad de científico e ingenieros, el WEF observa que los países con una economía basada en innovación presentan un número mayor a 100 Patent cooperation treaty (PCT) por millón de habitantes. Nuestro análisis muestra que Panamá alcanza evaluaciones con una media de 4.4 patentes PCT por millón de habitantes del 2006 al 2016, en comparación a otros países evaluados, como por ejemplo Estados Unidos e Israel. Por ello, el objetivo de este trabajo consiste en realizar un análisis econométrico (serie de tiempo) para la generación de patentes PCT por millón de habitantes, así como también sobre la disponibilidad de científicos e ingenieros en Panamá. La metodología utilizada en este estudio es un análisis econométrico cuantitativo serie de tiempo (ARIMA) para la variable de patentes por millón de habitantes en los últimos 10 años y una regresión lineal para la disponibilidad de ingenieros en una serie de tiempo. El resultado obtenido indica que seguir planificando con el comportamiento de estas variables no ayudará a elevar el índice de innovación en Panamá.

Palabras claves– Innovación, patente, competitividad, disponibilidad de ingenieros, PCT, Pronosticar, ARIMA.

Abstract– According to the World Economic Forum (WEF), which evaluates the competitiveness index of 144 countries, Panama is currently in the 40th position in the area of innovation. Based on indicators, such as patent and availability of scientists and engineers, the WEF observes that countries with an economy based on innovation have more than 100 PCT patents per million population. This analysis also shows that Panama achieves low evaluations regarding the number of 4.4 PCT patents per million inhabitants and the availability of scientists and engineers compared to other evaluated countries, such as USA and Israel. Therefore, the objective of this work is to perform a trend analysis of the generation of PCT patents per million inhabitants, as well as the availability of scientists and engineers in Panama. The methodology used in this study is ARIMA (Auto Regressive Integrated Moving Average) models to forecast for the variables in the last 10 years. The result obtained indicates that the behavior of these variables will not help raise the index of innovation in Panama.

Keywords– Innovation, patent, competitiveness, availability of engineers, PCT, forecast, ARIMA.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 27 de febrero de 2017

Fecha de Aceptación: 25 de septiembre de 2017

1. Introducción

Según The Global Competitiveness Report 2017, Panamá ha superado en crecimiento económico a todos los países latinoamericanos en los últimos 25 años. Su tasa compuesta anual de crecimiento de 4,1% entre 1990 y 2014 es más alta que el 3,6% registrado por

Chile y la República Dominicana en ese mismo periodo [1].

El Foro Económico Mundial (WEF) determina competitividad como la economía probable de crecer más rápido en el tiempo combinando productividad, prosperidad y desarrollo económico como las claves de la competitividad de los países.

Las variables que determina el WEF en el pilar innovación son:

- Capacidad para Innovar.
- Calidad de las Instituciones de Investigación científica.
- Gasto de empresas en investigación y desarrollo (I+D).
- Colaboración en I+D en universidad industria
- Adquisición de avanzada tecnología por el gobierno.
- Disponibilidad de científicos e ingenieros.
- Aplicación de Patentes (PCT) por millón de habitantes.

Panamá, a pesar del buen indicador económico descrito, aún hay distancia respecto al promedio de los 144 países que evalúa el WEF, sobre todo en innovación, y su nivel de educación por ellos este estudio busca explicar el comportamiento de la generación de patentes y disponibilidad de ingenieros en una serie de tiempo (10 años), porque son fundamentales para ascender de una economía en transición a la economía de innovación. El estudio econométrico de Florina Arredondo Traper 2016, analiza un modelo de regresión lineal para las variables de innovación del WEF, concluye que las variables citadas por el WEF tienen una correlación directa en el índice de innovación, con excepción desarrollo de patentes PCT que son una limitación para pasar a ser una economía regional basada en el conocimiento [2]. Lo que sustenta que al mejorar estos indicadores podemos lograr mayor desarrollo de nuevos productos, de nuevos servicios, de darle el valor agregado a los productos o servicios en las Pymes, que es donde los siete factores evaluados por el Foro Económico Mundial no muestran un desarrollo oportuno, para mantener un crecimiento sostenido al 2030, ni para obtener prosperidad y desarrollo del país. “Una encuesta sobre estudios económicos revela que el número de patentes que posee una empresa se usa a menudo como uno de los principales indicadores para determinar la intensidad de la innovación en dicha empresa” [3].

A Panamá el WEF, en el 2015 le determina como un factor crítico la “insuficiente capacidad para innovar”, lo cual es algo preocupante; además deja tres de los siete indicadores realmente rezagados que son la disponibilidad de científicos e ingenieros en una posición 77 de 144 economías y la aplicación de patentes PCT por millón de habitantes en 58 y la calidad de las instituciones de investigación científica en 54 [4].

Sin embargo, otro índice que evalúa innovación el The Global Innovation Index 2017, ubica a Panamá en la posición 63 de 127 economías evaluadas, pero de 31 en aplicaciones PCT 2017 [5], siendo la número uno en América Latina; esto se debe que Panamá desde el 2016 está impulsando mayor generación de patentes tecnológicas, claramente se observa que llegó a 15 patentes PCT por millón de habitantes en el 2016.

Aun así como la creación de políticas para la generación de patentes se debe pensar también utilizar la innovación abierta para impulsar la creación de patentes. Karl-Heinz Leitner concluye y recomienda “una tendencia como proceso de innovación abierta, distribuida y en red que ya se aborda en la formulación de políticas de innovación actual” [6]. Este puede ser un mecanismo de innovación, pero que aún no se ha desarrollado.

El número de patentes y las actividades de (I+D), son indicadores de innovación que han adquirido gran importancia. [7] En otras palabras, es un hecho indispensable que empresas, industrias y países con mayores gastos en (I+D) son más innovadores. Con “mayor variedad empresarial mayor innovación” Jarle Aarstad 2016 [8].

Los bajos indicadores de ciencia y tecnología e innovación, son el reflejo de la política plasmada en plan estratégico nacional PENCYT, por tanto, difícil alcanzar el tercer desafío planteado en el mismo que consiste en “alcanzar una competitividad sostenible, basada en la tecnología e innovación” [9].

La principal problemática de la política de ciencia y tecnología en el tema de innovación en Panamá, es la falta de una visión planificación basada en indicadores que mide el índice de innovación según el WEF, aunado, al desconocimiento de la medida cualitativa y cuantitativa que se expresa en el índice de innovación.

Existen factores que han limitado el número de estudios sobre patentes: el número de patentes locales en comparación con las patentes nivel de los países industrializados, la falta de datos sistematizados disponibles para la investigación [10].

Es importante resaltar el estudio de Albert G.Z. Hu sobre China, donde concluye que China definió una estrategia de incentivos para que las empresas patentaran e invirtieran en investigación y desarrollo pero vinculados a la generación de patentes y se convirtió en la número uno en presentaciones PCT en el 2011 [11].

El objetivo general del estudio es el análisis de patentes PCT y cantidad de ingenieros como pilares del

eje de innovación según el WEF, a través de un análisis econométrico en una serie de tiempo.

Estudio econométrico en análisis de patentes realizado por Joachim Schleich para estimar el impacto de la política en las patentes, basado en una serie cronológica de datos transversales para 12 países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) [12].

Entre los objetivos específicos están:

- ¿Definir las estadísticas de los últimos 10 años de la variable generación de patentes PCT y la disponibilidad de Ingenieros?
- ¿Realizar un análisis econométrico para cada variable y definir una fórmula econométrica?
- ¿Definir y proyectar valores futuros según el análisis econométrico para el 2030?
- ¿Definir los principales factores que afectan el bajo desempeño de estas variables.

El estudio contemplará además con resumen, introducción, preguntas de investigación, metodología, resultados, análisis y conclusiones.

2. Componentes del artículo

El tipo de investigación a desarrollar es descriptiva y cuantitativa a través de un análisis econométrico utilizando ARIMA con datos de una serie de tiempo 10 años, con una proyección al 2030.

Se buscaron fuentes primarias de la contraloría, datos estadísticos de la universidad de Panamá y la Universidad Tecnológica de Panamá, que son las principales universidades de formación de ingenieros en el país. Se analizarán los datos de cantidad de patentes con modelo autorregresivo integrado de medias móviles (ARIMA), 2006-2016.

En el caso de disponibilidad de ingenieros, consideramos una gráfica lineal tendencial debido a que su R^2 es aceptable.

En cuanto a las patentes, se consultó la base de datos de la Dirección General del Registro de la propiedad Industrial [13], y la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual, patentscop[14].

Las principales limitaciones sobre datos de la investigación se fundamentan en:

- Falta de estadística de las universidades privadas que a veces mantiene la reserva sin publicar datos específicos.
- Panamá, no pasó a ser PCT hasta el año 2012, algo que puede afectar el análisis que se realizara desde el 2006-2016.

- El índice de innovación en cuanto a disponibilidad de científicos e ingenieros no está definido de forma cuantitativa sino cualitativa.

3. Resultados

En cuanto al número de patentes por millón de habitantes, para considerar un país, según la estadística del Banco Mundial se debe mantener de forma sostenida no menos de 10 patentes por millón de habitantes. Claramente observamos en la tabla 1, que la cantidad de patentes por millón de habitantes según el banco mundial alcanza 4.4 patentes por millón de habitantes, por lo que estadísticamente no se alcanza el mínimo como país de 10 patentes por millón de habitantes. Datos similares se obtienen con la base de datos de WIPO por lo que valida la estadística presentada en estos resultados.

Tabla 1. Datos de patentes PCT en Panamá

Descripción	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Cantidad de patentes (Banco Mundial)						21		9	13	
Patentes con domicilio solicitante PA (OMPI)	28	20	16	11	11	10	17	26	10	18
Patentes con nacionalidad solicitante PA (OMPI)	30	26	17	14	29	32	37	29	11	16
Domicilio y nacionalidad (PA)	27	18	14	9	8	7	7	22	9	16
Patente por millón de habitantes	8,0	5,2	4,0	2,5	2,2	1,9	1,9	5,8	2,3	4,1
Población total en millones de habitantes (Banco Mundial)	3,4	3,4	3,5	3,6	3,6	3,7	3,7	3,8	3,9	3,9

Fuente: Elaboración propia con datos Banco Mundial & OMPI.

Pueden observar que el mejor modelo para la serie de datos es el AR(1). Luego de correr el modelo, se obtuvieron los parámetros del modelo, que se muestran a continuación:

Parámetros del modelo:

Parámetro	Valor	Error típtico Hess.	Límite inferior	Límite superior
			(99%)	(99%)
Constante	0.000	7.731	-19.915	19.915

Parámetro	Valor	Error típtico Hess.	Límite inferior (99%)	Límite superior (99%)	Error típtico asint.	Límite inferior (99%)	Límite superior (99%)
		Hess.	(99%)	(99%)	asint.	(99%)	(99%)
AR(1)	0.872	0.173	0.425	1.318	0.155	0.473	1.271

La ecuación econométrica según la base de datos patentscop resultante para los datos de patente utilizando el modelo ARIMA[15].

Modelo AR(1): $Y_t = \Phi_1 + Y_{t-1} + a_t$ donde

$$AR(1): Y_t = \Phi_1 + Y_{t-1} + a_t \quad (1)$$

El modelo realiza la proyección al 2030, como se muestra en la figura 1, con la ecuación definida (I).

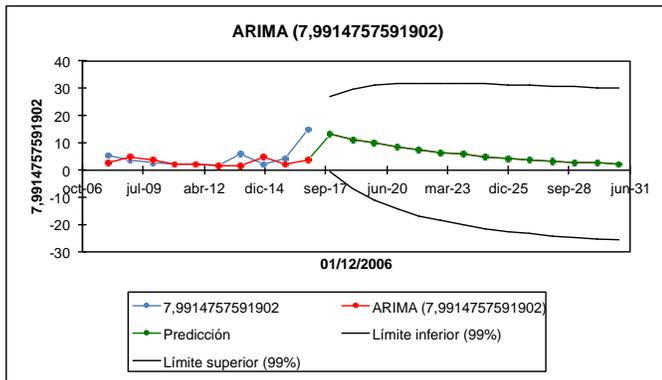


Figura 1. AR(1) Predicción patentes por millón de habitantes 2030 (Fuente: Elaboración propia, 2017).

Claramente se observa que de seguir con una planificación utilizando modelos de serie de tiempo en el programa nacional de ciencia y tecnología para el 2030, el modelo predice un límite máximo de 29 y mínimo de -25. Claramente este modelo explica que no alcanzaríamos más de 29 patentes por millón de habitantes en el mejor de los casos. Pueden observar que el gráfico muestra el límite inferior en -25, esto indica claramente que un rango amplio de predicción, pero en base a los datos esos serán los límites superior e inferior.

En Panamá consideramos que seguir planificando y generando una política de ciencia y tecnología de estudios de casos, foros y modelos econométricos en tendencia, impulsando planes de gobiernos a 5 años, con métodos de economías de factores de producción o eficiencia, sin innovación y sin rigor científico, no llevarán a Panamá hacia a una economía basada en innovación.

Los resultados de la cantidad de ingenieros egresados como se muestra en la tabla 2, en las dos principales universidades del país como la Universidad Tecnológica de Panamá y la Universidad de Panamá.

Tabla 2. Cantidad de Ingenieros graduado en Panamá

Descripción	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Millones de habitantes/Panamá	3,4	3,4	3,5	3,6	3,6	4,0	3,7	3,8	3,9	3,9
Cantidad de Ingenieros por millón de habitantes	211	223	179	200	215	183	216	231	237	219
Ciencias Agropecuarias										
Ing. Agr. Fitotécnia	8	5	14	17	16	12	3	8	0	9
Ing. Agr. Cultivos tropicales	0	0	0	0	1	3	6	10	18	4
Ing. Agr. Agronegocios	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
Ing. Agr. Producción Agrícola	3	2	0	0	0	0	0	1	0	1
Ing. Agr. Zootecnista	36	15	29	24	31	35	21	19	26	26
Ing. Agr. Agrícolas	26	11	18	10	23	28	17	17	27	20
Ing. Agr. Desarrollo Agropecuario	16	10	17	25	22	24	16	18	20	19
Sub total	89	70	78	77	94	102	63	73	91	79
Ing. De Operaciones Logística Empresarial	0	0	0	0	0	0	0	0	8	1
Ing. Estadística	0	1	0	2	1	3	2	9	12	3
Ing. Topografía	0	0	7	4	5	0	6	2	2	3
Ing. Electrónica y Comunicación	46	30	34	27	4	40	29	8	15	26
Ing. Informática	25	0	0	22	12	40	25	20	16	18
Sub total	71	31	41	55	22	83	62	39	53	51
Licenciatura en Ingeniería en UTP	552	666	506	581	662	545	682	768	772	729
Total de graduados en Ingeniería en Panamá	712	767	625	713	778	730	807	880	916	859

Fuente: Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) & Universidad de Panamá (UP).

Ochenta y cinco por ciento de los ingenieros graduados en Panamá, son egresados de la UTP, esto indica la importancia de la institución en el país.

La figura 2, muestra la ecuación econométrica polinómica definida utilizando los datos expresados en tabla 1, se definió de la siguiente manera:

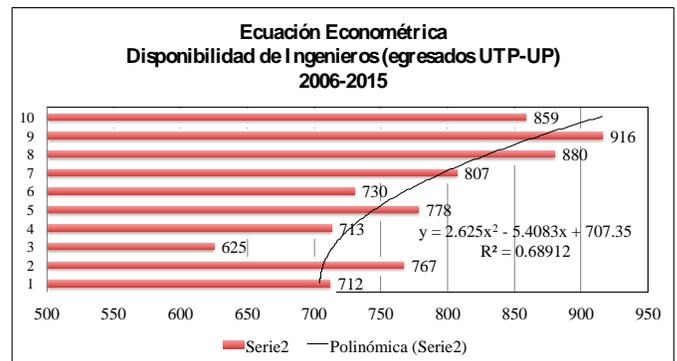


Figura 2. Ecuación econométrica (Fuente: Elaboración propia, 2017).

La figura 3, muestra las proyecciones para el 2030 de acuerdo a la proyección econométrica ascienden a 1217 ingenieros para el 2030.

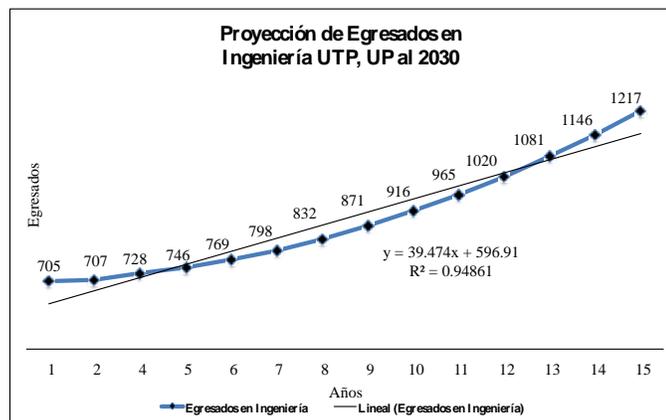


Figura 3. Cantidad de ingenieros para el 2030. (Fuente: Elaboración propia, 2016).

4. Conclusiones

Podemos concluir que los programas de ciencia y tecnología de los países deben evaluarse con los indicadores que obtengan de estudios prospectivos que permitan alcanzar las metas deseables para ubicar una economía a escala de innovación en estos pilares y no con planificación econométrica tendencial. Al igual existen factores conceptuales, costes y metodologías de generación de patentes que merman la generación de las mismas. Al igual los enfoques de formación a nivel superior no tienen enfoque ingenieril lo que afecta la disponibilidad de científicos e ingenieros en el país, todo esto con llevará a definir si el país tiene un plan de ciencia y tecnología para convertir a Panamá en una economía de innovación.

Consideraciones importantes como conclusiones en este estudio:

- Los programas de ciencia y tecnología de Panamá deben evaluarse con los indicadores que salgan de estudios prospectivos que permitan alcanzar las metas deseables para ubicar una economía a escala de innovación en estos pilares y no con planificación tendencial.
- Existen factores conceptuales, costos y metodologías de generación de patentes que merman la generación de invenciones en Panamá.
- Para que la generación de patente PCT por millón de habitantes impacte de forma significativa el índice de innovación en el país debe alcanzar más de 100 patentes PCT/millón de habitantes anuales.
- Los enfoques de formación a nivel superior no tienen enfoque ingenieril lo que afecta la

disponibilidad de científicos e ingenieros en el país, todo esto conllevará a definir que el país no tiene un plan de ciencia y tecnología en patentes ni formación de ingenieros para convertir a Panamá en una economía de innovación.

- Se ha apostado a formar técnicos no universitarios, que pueden aprovechar las empresas, pero no incidirán de forma cuantitativa el según el WEF el índice de innovación del país.

5. Referencias

- [1] Cambiando esclusas: Un diagnóstico de crecimiento de Panamá Ricardo Hausmann, Luis Espinoza y Miguel Angel Santos Traducido por Rafael Osío Cabrices. Centro Internacional de Desarrollo CID, Universidad de Harvard Faculty Working Paper Series No. 325 Octubre de 2016 (Revisado Enero de 2017). P. 9.
- [2] Florina Arredondo Trapero, José Carlos Vázquez Parrab, y Jorge de la Garzac. Factores de innovación para la competitividad en la Alianza del pacífico. Una aproximación desde el Foro Económico Mundial. Estudios Gerenciales 32 (2016) 299–308 www.elsevier.es/estudiosgerenciales
- [3] Kemp R., Folkerling M., De Jong J., y Wubben E.: Innovation and Firm Performance: Differences between Small and Medium-sized Firms. Zoetermeer, May, 2003. Pp 5-24.
- [4] X. Sala-i-Martin, B. Bilbao-Osorio, A. Di Battista, M. Drzeniek Hanouz, T. Geiger, and C. Galvan. "The Global Competitiveness Report; 2014-2015." pp. 302-303.
- [5] The Global Index 2017. Innovation Feeding the world. Cornell University INSEAD and the World Organization Intellectual WIPO. Tenth Edition pp. 303, 404.
- [6] L. Karl-Heinz. "Innovation Futures: New Forms of Innovation and their Implications for Innovation Policy." International Journal of Foresight and Innovation Policy, vol. 9, no. 2-3-4, pp. 269-286, 2013.
- [7] Elife Akis. Innovation and Competitive Power. Istanbul University, Faculty of Economics, Central Campus Beyazit-Fatih, Istanbul 34452, Turkey. Procedia - Social and Behavioral Sciences 195 (2015) 1311 – 1320.
- [8] Jarle Aarstad, Olav A. Kvitastein, Stig-Erik Jakobsen Related and unrelated variety as regional drivers of enterprise productivity and innovation: A multilevel study. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/respol Research Policy 45 (2016) 844–856.
- [9] Secretaria Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación (SENACYT). "Política nacional de ciencia, tecnología e innovación de Panamá y Plan Nacional 2015-2019." pp. 9.
- [10] The dynamics of patentability and collaborativeness in Chile: Analysis of patenting activity between 1989 and 2013. Pablo E. Pinto, Andres Vallone, Guillermo Honores, Horacio González Universidad Católica del Norte, Escuela de Ciencias Empresariales, Larrondo 1281, Coquimbo, Chile. World Patent Information. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/worpatin
- [11] Albert G.Z, Hua, Peng Zhangb, Lijing Zhaob. China as number one? Evidence from China's most recent patenting

- surge. *Journal of Development Economics*. 124 (2017) 107–119.
- [12] Soachim Schleicha, Rainer Walza, Mario Ragwitz. Effects of policies on patenting in wind-power technologies. *journal homepage: www.elsevier.com/locate/enpol Energy Policy* 108 (2017) 684–695.
- [13] Ministerio de Comercio e Industria (MICI). [Online]. Available: www.mici.gob.pa; www.digerpi.gob.pa. [2015].
- [14] Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (WIPO). [Online]. Patentscop. Available: www.wipo.int. [2015].
- [15] Análisis de series temporales: Modelo ARIMA María Pilar Gonzales Casimiro. Facultad de ciencias Económicas Empresariales. Universidad del País Vasco (UPV-EHU). pp. 24-30.

Ecocompetencias en gestión empresarial en el Archipiélago de Galápagos, Ecuador

Ecocompetences in business management in the Galapagos Archipelago, Ecuador

Inova Candy Abad Arévalo ^{1*}, Juan Carlos López Gutiérrez ², Fermín Ferriol Sánchez ³, Alina Pascual Barrera ⁴

¹ Universidad San Francisco de Quito USFQ ² Consejo de Educación Superior CES ³ Universidad Internacional Iberoamericana UNINI ⁴ Universidad Internacional Iberoamericana UNINI

¹ cabad@usfq.edu.ec, ² jclopez66@gmail.com, ³ fermin.ferriol@unini.edu.mx, ⁴ alina.pascual@unini.edu.mx

Resumen– El presente artículo expone una metodología estructurada que determina, de forma científica, las ecocompetencias en gestión empresarial que requieren los microempresarios, ubicados en la Isla San Cristóbal, en el Archipiélago de Galápagos, Ecuador. El tamaño de la muestra estratificada se estableció estadísticamente en 230 personas, una por cada microempresa. La técnica de recolección de datos fue la encuesta diseñada ad hoc que constó de cuarenta y seis bloques de preguntas. De estos bloques, para cumplir con el objetivo de este artículo, se utilizó el grupo de preguntas sobre desarrollo sostenible que consta de nueve variables y el grupo de preguntas sobre competencias empresariales que contiene once variables. Para el procesamiento y análisis estadístico de los datos se utilizó el software SPSS versión 23. A las respuestas obtenidas se les aplicó el análisis factorial exploratorio, con lo que se pudieron establecer los componentes principales de cada grupo de preguntas de manera independiente, y los componentes principales de los dos grupos combinados. Los resultados determinaron, desde la perspectiva del microempresario, las ecocompetencias empresariales, entendidas como las variables de desarrollo sostenible y las variables de competencias empresariales que requieren utilizar para alcanzar el desarrollo económico, social y ambiental sostenible en sus empresas.

Palabras claves– Archipiélago de Galápagos, Desarrollos Sostenible, Ecocompetencias empresariales, Gestión micro empresarial, Patrimonio Natural de la Humanidad.

Abstract– This article presents a structured methodology that determines, in a scientific manner, the ecocompetences in business management required by microentrepreneurs located on San Cristobal Island in the Galapagos Archipelago, Ecuador. The size of the stratified sample was statistically established in 230 people, one for each microenterprise. The data collection technique was the survey designed ad hoc which consisted of forty-six blocks of questions. Of these blocks, to fulfill the objective of this article, were used the group of questions about sustainable development that consists of nine variables and the group of questions about business competences that contains eleven variables. The SPSS version 23 software was used for the statistical analysis and processing of the data. An exploratory factorial analysis was applied to the answers obtained, in order that the main components of each group could be established independently, and the main components of the two groups combined. The results determined, from the perspective of the microentrepreneur, the business ecocompetences, understood as the variables of sustainable development and the variables of entrepreneurial competences that are required to reach the sustainable economic, social and environmental development in their companies.

Keywords–, Galapagos Archipelago, Sustainable Development, Ecocompetences in business management, Microentrepreneurial management, , World Human Heritage.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 6 de julio de 2017

Fecha de Aceptación: 25 de septiembre de 2017

1. Introducción

En el Ecuador, al igual que en otros países de la región Andina, se establece que el sector microempresarial está compuesto de hogares/talleres, puestos de venta, micro-negocios, con un volumen de ventas anuales menores a USD 100.000 y con 9 empleados como máximo [1]. Su prevalencia en la economía del país es notable, es así como, en el 2013, el 90,4% de las empresas en Ecuador correspondían a este sector [2]. Aunque su heterogeneidad e informalidad dificulta la medición del daño al ambiente y a la salud humana, se conoce que tienen un alto grado de impacto en las variables ambientales [3].

Los microempresarios destinan pocos recursos a la capacitación empresarial, entre otras circunstancias, porque consideran que tienen suficiente conocimiento técnico, es costoso, interrumpe sus labores, no hay un beneficio tangible o no se encuentran capacitadores [4].

Para que la capacitación ambiental se considere beneficiosa, es necesario conocer cuáles son las ecocompetencias, entendidas como la combinación de temas de sostenibilidad y competencias empresariales, que garantizarían la generación de riqueza y el desarrollo sostenible.

La investigación se realizó en el Archipiélago de Galápagos, Ecuador, el cual, por su biodiversidad, es considerado un ecosistema único sujeto a preservación, nombrado Patrimonio de la Humanidad [5]. Sus habitantes son impulsados diariamente a ejercer las prácticas de la sostenibilidad. En esta zona, la concentración de microempresas por cada 10.000 habitantes es de 945, superior a las 514 registradas como promedio de la nación ecuatoriana [6].

El análisis parte de una revisión teórica que permite definir las ecocompetencias en gestión empresarial, respondiendo algunas interrogantes como son: ¿cómo ha evolucionado el concepto de desarrollo sostenible? ¿cuáles son las variables de sostenibilidad que son empleadas por los microempresarios? ¿qué caracteriza a las competencias empresariales? ¿qué competencias se necesitan para alcanzar el desarrollo sostenible?

2. Revisión literaria

La revisión literaria que consta en esta sección se analiza en dos subsecciones. La 2.1 sintetiza la evaluación de la temática sobre el desarrollo sostenible

y la microempresa y la 2.2 sintetiza la literatura sobre competencias empresariales.

2.1 Desarrollo sostenible y microempresa

En 1972, se utilizó por primera vez el término “desarrollo sostenible” en su sentido actual, proponiendo establecer una condición de estabilidad ecológica y económica que sea sustentable [7]. A partir de esto, el concepto fue evolucionando hacia una concepción que incluye el trabajo responsable y el ambiente social [8].

Para la Organización Internacional del Trabajo (OIT) el concepto de empresas sostenibles se basa en tres pilares: i) creación de entornos propicios, ii) iniciativa empresarial y desarrollo de empresas, y iii) lugar de trabajo sostenible y responsable, indicando que “el cambio a una economía más verde ofrece más oportunidades para crear trabajo decente y aumentar la inclusión social” [9].

En los negocios, el concepto se ha afianzado dentro de lo que se denomina la Responsabilidad Social Empresarial (RSE). Esta concepción fue utilizada por primera vez en 1953, expresada en “las obligaciones para ejercer políticas, tomar decisiones o seguir líneas de acción que son deseables en términos de los objetivos y valores de la sociedad” [10]. Sin embargo, en el 2009, se amplía la noción incorporando el término valor compartido (*shared value*) definiéndolo como “las políticas y prácticas que promueven la competitividad de una empresa al mismo tiempo que mejoran las condiciones económicas y sociales de las comunidades en las que opera” [11].

En la misma línea, en el 2011, el Libro Verde de la Comisión de Comunidades Europeas, señala que “aunque la responsabilidad principal de las empresas consiste en generar beneficios, pueden contribuir al mismo tiempo al logro de objetivos sociales y medioambientales, integrando la responsabilidad social como inversión estratégica en el núcleo de su estrategia empresarial, sus instrumentos de gestión y sus actividades” [12].

Por otro lado, la RSE puede ser considerada como un motor de competitividad empresarial y desarrollo en la microempresa [13], pero, si bien, “la investigación sobre el espíritu empresarial en el desarrollo económico general es amplia, lo que se entiende menos es el papel de las pequeñas empresas en el avance de la economía

verde; ¿qué contribuyen? ¿cuáles son las barreras que enfrentan? y, ¿qué se puede hacer para apoyarlos?” [14].

2.2 Competencias microempresariales

El término “competencia” fue establecido por primera vez en 1973 [15], al señalar que era necesario tomar en cuenta habilidades adicionales diferentes a la inteligencia, al evaluar la idoneidad del personal para un puesto de trabajo.

En el 2002, ya se establece que las competencias de las pequeñas y medianas empresas (PYMES), “para asimilar conocimientos y tecnología para producir, para cooperar y para competir en los mercados, resultan cruciales para que las naciones hagan un uso eficiente de sus recursos y logren elevados niveles de productividad y competitividad” [16].

Por su parte, en el 2004 [17], se estudia a profundidad el concepto y se concluye que los escenarios que han aportado al enfoque de las competencias son: la filosofía griega, la lingüística, la filosofía y la sociología además de los cambios en el mundo laboral.

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), en el 2010, en su publicación sobre las habilidades y competencias del siglo XXI [18], las conceptualiza en tres dimensiones: de información, de comunicación y, de ética e impacto social.

En el 2016, las competencias se consideran en su total estructura conceptual, y se definen como “la posibilidad real que tiene el ser humano de integrar y movilizar sistemas de conocimientos, habilidades, hábitos, capacidades, aptitudes, actitudes, motivaciones y valores para la solución exitosa de aquellas actividades vinculadas a la satisfacción de sus necesidades cognitivo-profesionales, demostradas en su desempeño, al tomar decisiones y solucionar las situaciones que se presenten en su esfera de trabajo” [19].

3. Metodología

Para la determinación de las ecocompetencias en gestión empresarial se realizó un estudio no experimental, exploratorio y correlacional de las variables de desarrollo sostenible y competencias empresariales aplicadas al sector microempresarial del Archipiélago de Galápagos en Ecuador. En primera instancia, se realizó el diseño de un instrumento ad hoc tipo encuesta con cuarenta y seis bloques de preguntas. La validación en contenido del instrumento se llevó a

cabo por el Comité de Ética de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador, así como también por validación de expertos en el tema y una prueba piloto con microempresarios de la zona de estudio.

La aplicación del instrumento se realizó entre abril y junio del 2015. La población microempresarial en San Cristóbal se definió en 1.767 establecimientos, personas naturales o sociedades, tomados del registro del Servicio de Rentas Internas (SRI) del Ecuador del mes de marzo del 2015 [20], que es actualizado periódicamente en función de las empresas que se incorporan o se retiran de la actividad económica. Dicho listado contiene, entre otros detalles, la identificación tributaria y la clasificación de la actividad económica en nueve categorías según la agregación superior de la revisión 4.0 de la nomenclatura de la Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU) [21].

De ellas, con un nivel de confianza del 95%, una probabilidad de no éxito del 20% para no sobreestimar la varianza de la muestra [22], y un margen adicional para prevenir datos perdidos, se estableció el tamaño de la muestra con población conocida en 230 microempresas que representan el 7.49% de las registradas en el SRI. Los sujetos que participaron en el estudio correspondieron a un empleado por cada una de estas entidades privadas, con cargo de director, gerente o propietario.

En la tabla 1 se presenta las 230 microempresas encuestadas, que mantenían operaciones abiertas en marzo del 2015, clasificadas en las nueve actividades económicas según clasificación CIIU, estratificadas en igual proporción a la que presentaba la población total a esa fecha.

Tabla 1. Microempresas encuestadas ^a

Actividad Económica	Número	Porcentaje
Comercio	104	45,2
Transporte	49	21,3
Alimentos y Bebidas	20	8,7
Hoteles y Restaurantes	43	18,7
Construcción	7	3,0
Explotación y Fabricación	5	2,2
Agricultura	2	1,0
Enseñanza y salud	0	0,1
Otras	0	0,0
Total	230	100,0

Muestra estratificada según el peso de la actividad económica en la población. Fuente: elaboración propia, 2017.

Las características socioeconómicas extraídas de las respuestas obtenidas reflejan que el 74% de los microempresarios tenían entre cinco y más de veinte y cinco años en el negocio en la isla, por lo que se consideran negocios establecidos [23]; asimismo, el 90.3% presentó ingresos de hasta USD. 2.500 dólares mensuales. En cuanto al perfil demográfico, el 79,1% de los encuestados habían completado el bachillerato (doce años de estudios formales), mientras que el 91,3% había recibido ocho o menos horas de capacitación en gestión empresarial y el 93.0% había recibido ocho o menos horas de capacitación en temas de desarrollo sostenible.

Las respuestas de los 230 microempresarios entrevistados permitieron obtener la percepción de las variables de desarrollo sostenible y de competencias empresariales aplicadas al sector microempresarial de la zona de estudio.

Para la realización de este artículo, se utilizó el grupo de preguntas sobre desarrollo sostenible, que consta de nueve variables (V1_x) adaptadas a los indicadores de desarrollo sostenible urbano [24], representadas en la tabla 2; y el grupo de preguntas sobre competencias empresariales que contiene once variables (V2_x) adaptadas a las establecidas por la OCDE en el 2001 [25], representadas en la tabla 3. En ambos grupos se aplicó una escala Likert de 3 niveles y un análisis factorial exploratorio con la finalidad de establecer los componentes principales relacionados con las ecocompetencias en gestión empresarial.

Tabla 2. Variables asociadas al desarrollo sostenible

	Descripción
V 1 a	Capacitación en desarrollo sostenible
V 1 b	Calidad y tratamiento de agua
V 1 c	Ahorro energético y energías alternativas
V 1 d	Manejo y tratamiento de residuos
V 1 e	Hábitos de consumo
V 1 f	Manejo de especies invasoras
V 1 g	Mantenimiento de la biodiversidad
V 1 h	Reciclaje
V 1 i	Certificaciones internacionales

V1= variable del grupo 1.

Fuente: elaboración propia, 2017.

Tabla 3. Variables de competencias empresariales

	Descripción
V 2 a	Normas y valores enfocados al medio ambiente
V 2 b	Habilidades de investigación y resolución de problemas
V 2 c	Habilidades de comunicación y coordinación
V 2 d	Habilidades de colaboración solidaria
V 2 e	Manejo del instrumental financiero
V 2 f	Incremento de la productividad de los factores (materiales y mano de obra) con métodos amigables con el medio ambiente
V 2 g	Tecnologías de la comunicación
V 2 h	Salud y seguridad
V 2 i	Desarrollo de proveedores locales
V 2 j	Generación de valor agregado
V 2 k	Formación continua en ecocompetencias en sus empleados

V2= variable del grupo 2.

Fuente: elaboración propia, 2017.

El orden en que constan las variables, en las tablas 2 y 3, representan su importancia para la generación de las ecocompetencias en gestión empresarial.

Posteriormente, mediante el sistema SPSS versión 23, se aplicó el análisis factorial exploratorio, a las respuestas de la encuesta, utilizando el método de análisis de componentes principales (ACP). Se consideró en primer lugar, cada grupo de variables de forma independiente y, a continuación, los dos grupos de variables de manera combinada.

Siendo el propósito principal establecer una o varias estructuras de variables correlacionadas, se utilizó la matriz de componente rotado “con el propósito de lograr una mayor contribución, de los componentes, a la explicación del fenómeno” [26]. Igualmente, por no conocer la presencia de una variable dominante, se utilizó el método de rotación Varimax con normalización Kaiser que es un método de rotación ortogonal que minimiza el número de variables que tienen saturaciones altas en cada factor, lo que simplifica la interpretación de los componentes [27] [28].

4. Resultados

En primer lugar, se presentan los resultados del análisis factorial de las variables de desarrollo sostenible.

Los resultados de la prueba de medida Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) y de esfericidad de Bartlett, se presentan en la tabla 4, en la que se observa una alta correlación y se confirma la aplicación del análisis factorial.

Tabla 4. Prueba de KMO y Barlett

Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo		.877*
Prueba de esfericidad de Bartlett	Aprox. Chi cuadrado	939.319
	Gl	36
	Sig.	,000**

*Valor de referencia del $KMO \geq 0.9$ el test se considera muy bueno; $KMO \geq 0.8$ el test se considera notable; $KMO \geq 0.7$ el test se considera mediano.

** Valor de significancia de esfericidad de Barlett < 0.05 se aplica el análisis factorial.

Fuente: elaboración propia, 2017.

Posteriormente, la distribución de los componentes principales, respecto a las variables de desarrollo sostenible, se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Resultado del análisis factorial para las variables de desarrollo sostenible

	Componente		Comunalidad*
	1	2	
V 1 f	.873		.769
V 1 d	.777		.691
V 1 h	.776		.654
V 1 b	.664		.651
V 1 i		.808	.653
V 1 g		.768	.779
V 1 c		.715	.548
V 1 e		.660	.644
V 1 a		.651	.567

V1= variable del grupo 1.

*Nivel de Comunalidad > 0.50

Fuente: elaboración propia, 2017.

En los resultados se observa que, para el componente 1, la variable más importante es la que se refiere al “Manejo de especies invasoras” (V1f), mientras que, para el componente 2, la variable más importante es la que se refiere a las “Certificaciones internacionales” (V1i). De esta manera se comprueba que estas dos variables son necesarias, desde el punto de vista del microempresario, para el desarrollo sostenible de su empresa.

La variable “Capacitación en desarrollo sostenible” (V1a), se determina como una variable no relevante a pesar de la importancia que representa para la generación de las ecocompetencias en gestión empresarial siendo también que los microempresarios sujetos a estudio presentan, en su mayoría, 8 horas o menos de capacitación en este tema.

Las escasas horas de capacitación registradas podrían deberse a que, como fue señalado en la introducción de este artículo, los microempresarios consideran que la capacitación es costosa, que para acceder a ella tendrían que abandonar sus tareas, que hacen falta capacitadores con experiencia en sus necesidades y que los beneficios de la capacitación no se traducen en hechos tangibles.

A continuación, se presentan los resultados del análisis factorial de las variables de competencias empresariales.

Los resultados de la prueba de KMO y de esfericidad de Bartlett, se observan en la tabla 6, indicando una alta correlación y confirmando, una vez más, la aplicación del análisis factorial.

Tabla 6. Prueba de KMO y Barlett

Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo		.833*
Prueba de esfericidad de Bartlett	Aprox. Chi cuadrado	1102.376
	Gl	55
	Sig.	,000**

*Valor de referencia del $KMO \geq 0.9$ el test se considera muy bueno; $KMO \geq 0.8$ el test se considera notable; $KMO \geq 0.7$ el test se considera mediano.

** Valor de significancia de esfericidad de Barlett < 0.05 se aplica el análisis factorial.

Fuente: elaboración propia, 2017.

Los resultados de la aplicación del análisis factorial, respecto a los temas de competencias empresariales, se muestran en la tabla 7. Para el componente 1, la variable más importante es la que se refiere a las “Habilidades de colaboración solidaria” (V2d), mientras que, para el componente 2, la variable más importante es la que se refiere a “Formación continua en ecocompetencias en sus empleados” (V2k).

Tabla 7. Resultado del análisis factorial para las variables de competencias empresariales

	Componente			Comunalidad*
	1	2	3	
V 2 d	.871			.765
V 2 i	.774			.735
V 2 h	.699			.691
V 2 g	.606			.707
V 2 f	.496			.539
V 2 k		.815		.687
V 2 b		.746		.634
V 2 a		.581		.566
V 2 c		.545		.581
V 2 e			.851	.793
V 2 j			.773	.723

V2= variable del grupo 2.

*Nivel de Comunalidad > 0.50

Fuente: elaboración propia, 2017.

De forma contradictoria se observa que, en el análisis factorial de las variables de desarrollo sostenible, los microempresarios no consideran importante la variable “Capacitación en desarrollo sostenible” (V1a). Sin embargo, la variable “Formación continua en ecocompetencias en sus empleados” (V2k) resulta ser la principal del componente 2 del análisis factorial realizado al grupo de variables relacionadas con las competencias empresariales. Por lo que ambas deberían ser consideradas como las de mayor importancia en cada grupo para el desarrollo de las ecocompetencias en gestión empresarial. Finalmente, la variable más importante del componente 3, es la relacionada con el “Manejo del instrumental financiero” (V2e).

Continuando con los resultados se presenta el análisis factorial combinando las variables de desarrollo sostenible, que constan en la tabla 2, y las variables de

competencias empresariales señaladas en la tabla 3, con la finalidad de determinar aquellas variables que formarán parte de las ecocompetencias en gestión empresarial. De esta manera, el microempresario podrá alcanzar el desarrollo económico, social y ambiental sostenible en su empresa.

Los resultados de la prueba de medida KMO y de esfericidad de Bartlett, en la tabla 8, comprueban una alta correlación y confirman la aplicación del análisis factorial.

Tabla 8. Prueba de KMO y Barlett

Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo		.892*
Prueba de esfericidad de Bartlett	Aprox. Chi cuadrado	2316.895
	G1	190
	Sig.	,000**

*Valor de referencia del KMO ≥ 0.9 el test se considera muy bueno; KMO ≥ 0.8 el test se considera notable; KMO ≥ 0.7 el test se considera mediano.

** Valor de significancia de esfericidad de Barlett < 0.05 se aplica el análisis factorial.

Fuente: elaboración propia, 2017.

En la tabla 9 constan los resultados de este análisis.

Tabla 9. Análisis factorial combinado de las variables de desarrollo sostenible y competencias empresariales

	Componente				Comunalidad*
	1	2	3	4	
V 2 d	,816				.697
V 2 i	,807				.768
V 2 h	,709				.678
V 2 g	,657				.715
V 1 a	,565				.603
V2 f	,480				.569
V2 a	,441				.517
V 2 e		,833			.773
V 2 j		,806			.795
V 1 f		,744			.683
V 1 d		,680			.699
V 1 b		,547			.639
V 1 i			,855		.795
V 1 g			,660		.782

V 1 c			,658		.514
V 1 e			,588		.673
V1 h			,433		.524
V 2 c				,715	.541
V 2 k				,712	.610
V 2 b				,690	.607

V1= variable del grupo 1

V2= variable del grupo 2.

*Nivel de Comunalidad > 0.50

Fuente: elaboración propia, 2017.

Por un lado, la variable “Reciclaje” (V1h), del grupo 1, y las variables del grupo 2 “Normas y valores enfocados al medio ambiente” (V2a) y “Productividad de los factores” (V2f), son excluidas del análisis por presentar un nivel de carga factorial menor a 0.50, lo que indica que tienen el menor peso en la conformación de los factores.

En el primer componente, la única variable del grupo 1 que se incluye corresponde a la “Capacitación en desarrollo sostenible” (V1a), la cual, a pesar de estar en este grupo de variables de mayor relación con las competencias empresariales, presenta el valor más bajo de todas, corroborando así la falta de importancia dada a esta variable por parte del microempresario, tal como se ha discutido anteriormente.

El valor más alto de este componente corresponde nuevamente a la variable del grupo 2 “Habilidades de colaboración solidaria” (V2d), comprobando su importancia ante el microempresario para el desarrollo de ecocompetencias en gestión empresarial.

En el componente 2, predominan las variables del grupo 1 relacionadas con el desarrollo sostenible y solamente las variables “Manejo del instrumental financiero” (V2e) y “Generación de valor agregado” (V2j), del grupo 2, se incluyen en este componente, siendo las que presentan los valores más altos y por ende son las de mayor relación con las ecocompetencias en gestión empresarial.

Por otro lado, todas las variables que se incluyen en el componente 3, pertenecen al grupo 1, y la variable “Certificaciones internacionales” (V1i) es la que tiene, una vez más, el valor más alto del grupo.

Por último, el componente 4 está formado por tres variables que pertenecen al grupo 2 y la variable que presenta el menor valor es “Habilidades de investigación y resolución de problemas” (V2 b), por lo que sería esta la variable considerada por los

microempresarios como la menos importante para el desarrollo de ecocompetencias en gestión empresarial.

Las variables “Habilidades de colaboración solidaria” (V2 d) y “Desarrollo de Proveedores locales (V2 i), del componente 1, podrían reflejar la necesidad de los microempresarios de impulsar el desarrollo de las comunidades en las que se desenvuelven por cuanto la mayoría de los microempresarios encuestados tienen negocios con más de cinco años de permanencia en la Isla.

Las variables de “Manejo del instrumental financiero” (V2e) y “Generación de valor agregado” (V2j), del componente 2, estarían estrechamente relacionadas con la característica demográfica referente a que el 90.3% de los microempresarios encuestados percibe ingresos de hasta USD. 2.500 dólares mensuales. En el presente artículo se considera que microempresa es aquella que tiene ingresos menores a USD. 100.000. Los ingresos de los empresarios que participaron en el estudio se ubicarían en el límite inferior representando solamente el 2.5% del máximo.

Por otra parte, el tercer componente detecta la presencia de una clara conciencia ambiental reflejada en la necesidad de alcanzar “Certificaciones internacionales ambientales” (V1i) y en la percepción de otras variables claramente ambientales como son el “Mantenimiento de la biodiversidad” (V1 g) y el “Ahorro energético y energías alternativas” (V1 c). Este resultado podría deberse a que los microempresarios de la muestra están localizados en la Isla San Cristóbal del Archipiélago de Galápagos, zona considerada Patrimonio de la Humanidad, en la que el cuidado del medio ambiente es una prioridad para sus habitantes, siendo entonces de suma importancia estar actualizados en estos temas.

En el último componente se detecta la importancia del desarrollo de habilidades empresariales por la correlación de las variables “Habilidades de comunicación y coordinación” (V2 c) y “Formación eco-competencias en empleados” (V2 k). Este resultado estaría relacionado con el nivel básico de educación formal que se presenta en las personas que administran las microempresas.

Por tanto, en función de la importancia de las cargas factoriales de las variables que intervienen en la explicación de cada factor como resultado de este análisis exploratorio se podría nombrar a cada

componente según las variables más relevantes que los componen en: 1: Contribución Social; 2: Gestión Empresarial; 3: Preservación Ambiental; y, 4: Desarrollo de conocimiento y habilidades.

5. Conclusiones

Una vez analizados los resultados del estudio, en base al método de componentes principales, se determina que las microempresas deben considerar el desarrollo de las ecocompetencias empresariales para su crecimiento económico y social, al mismo tiempo que contribuyen con el cuidado del ambiente en que se desenvuelven.

La presente investigación determinó que existen 20 variables, detalladas en la tabla 9, que representan las ecocompetencias en gestión empresarial, y que deben utilizarse para alcanzar el desarrollo económico, social y ambiental sostenible.

De igual forma, el análisis presenta cuatro componentes principales asociados con la contribución social, la gestión empresarial, la preservación ambiental y el desarrollo de conocimientos y habilidades.

Es también importante señalar que, a pesar de la mínima educación formal, variables como “Capacitación en desarrollo sostenible” (V1a) y “Formación continua en ecocompetencias en sus empleados” (V2k) son variables que el mismo empresario percibe con menor importancia sobre las demás que se plantean, siendo puntos clave para la formación de las ecocompetencias en gestión empresarial.

En conclusión, existen intentos por explicar las competencias que requieren los empresarios para el desarrollo sostenible de sus negocios, sin embargo, no se ha encontrado un artículo que explique estas relaciones en el Archipiélago de Galápagos ni la aplicación de este método científico en la zona. De esta manera, este trabajo es una contribución al estudio de las relaciones entre comunidad y ambiente en ecosistemas patrimonios de la humanidad.

Finalmente, las políticas públicas, los programas de organizaciones civiles o los programas académicos que intervengan en comunidades microempresariales en ecosistemas Patrimonios de la Humanidad deberán establecer *a-priori* un conjunto de ecocompetencias desde la perspectiva interna de sus miembros.

6. Futuras investigaciones

A partir de este análisis factorial exploratorio, sería importante profundizar en varias aristas. Primero, conocer las diferencias de percepción de los microempresarios de acuerdo con variables categóricas o cuantitativas en sus empresas como, por ejemplo: el nivel de ingreso, grupo de edad, grado de escolaridad o conocimiento del desarrollo sostenible, entre otras, para el desarrollo de las ecocompetencias necesarias.

También, aplicar este método científico con la determinación de componentes principales en otras zonas consideradas patrimonios o no patrimonios de la humanidad, para establecer si presentan un comportamiento equivalente o variaciones en el desarrollo de las ecocompetencias empresariales.

Igualmente, desarrollar investigaciones aplicando el método de análisis factorial confirmatorio para verificar los cuatro componentes determinados en el presente artículo como: 1: Contribución Social; 2: Gestión Empresarial; 3: Preservación Ambiental; y, 4: Desarrollo de conocimiento y habilidades.

Finalmente, incorporar las ecocompetencias encontradas en este estudio en un programa de capacitación a microempresarios en el Archipiélago de Galápagos, para validarlas con la implementación práctica. De esta manera, además de retribuir a la comunidad su contribución con la investigación, se profundizaría en el conocimiento de las relaciones comunidad ambiente.

7. Agradecimiento

A los microempresarios de la Isla San Cristóbal del Archipiélago de Galápagos.

Al Galápagos Science Center GSCA. A la Universidad San Francisco de Quito USFQ (Ecuador), representada por su Canciller Santiago Gangotena Ph.D., Decano del Colegio de Administración y Economía y a Marithza Vélez MBA, Decana del School of Business del Colegio de Administración y Economía, por el apoyo financiero.

8. Referencias

- [1] Comunidad Andina de Naciones CAN. *Decisión 702*. Artículo 3 Umbrales, 2008, p.2.
- [2] Instituto Ecuatoriano de Estadística y Censos INEC. *Directorio de Empresas y Establecimiento*. 2013, p.20.
- [3] C. Bustos. “La Calidad en la Microempresa Merideña y su Impacto en el Ambiente.” *Actualidad Contable FACES*. Año 8 No. 10, enero-junio 2005. Mérida, Venezuela. pp. 7-16

- [4] Instituto Nacional del Emprendedor. *Diagnóstico 2016 del Fondo Nacional Emprendedor*. Secretaría de Economía, Estados Unidos Mexicanos, 2016, p.21.
- [5] Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura - UNESCO. Comité de Patrimonios, 1978.
- [6] Instituto Ecuatoriano de Estadística y Censos INEC. Directorio de Empresas y Establecimientos. 2013, p. 25.
- [7] D. Meadows, D.L. Meadows, J. Randers y W. Behrens. "Perspectives, Problems and Models." 1972. En Wheeler y Beatley, (eds.). *The Garden Cities of To-morrow*. Londres: Routledge. 2014. pp.50-54.
- [8] L. Vallejo. "Los retos del desarrollo sostenible." Revista Apuntes del CENES, vol. 31, núm. 53, enero-junio, 2012, pp. 7-8. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Boyacá, Colombia. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=479548634001>.
- [9] Organización Internacional del Trabajo, OIT. *Organización hacia el Desarrollo Sostenible: Oportunidades para el trabajo decente y la inclusión social en una economía verde*. Ginebra, 2013, p. 1.
- [10] H. Bowen. "Social Responsibilities of the Businessman." University of Iowa Press, Iowa City 52242, 2013.
- [11] M. Porter, M. Kramer. "Creating Shared Value." *Harvard Business Review*, 2011.
- [12] Comisión de las Comunidades Europeas, *Libro Verde Fomentar un marco europeo para la responsabilidad social de las empresas*. 2001, pp.1-36.
- [13] D. Gallardo, M.I. Sánchez. "Análisis de la incidencia de la Responsabilidad Social Empresarial en el éxito competitivo de las microempresas y el papel de la innovación." *Universia Business Review*, núm. 38, 2013, pp. 14-31.
- [14] H. Creech, L. Paas, G. Huppé, V. Voora, H. Hybsier y H. Marquard. "Small-scale social-environmental enterprises in the green economy: supporting grassroots innovation, Development in Practice." 2014 pp. 366-378, DOI: 10.1080/09614524.2014.899561
- [15] D. McClelland. "Testing for Competence Rather Than for Intelligence." Department of Psychology and Social Relations, Harvard University, *American Psychologist*, enero 1973.
- [16] Listerri, J., Angelelli, P., Painter, F., Chrisney, M., Nieder, F., Mico, A. & Wilson, S. "Guía Operativa para Programas de Competitividad para la Pequeña y Mediana Empresa." Informe de trabajo. BID 2002. Citado por Saavedra, "Una propuesta para la determinación de la competitividad en la pyme latinoamericana." *Pensamiento & gestión* No.33, 2012. pp. 93-124.
- [17] S. Tobón, "Aspectos Básicos de la formación basada en competencias." 2005.
- [18] Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico OCDE. *Habilidades y competencias del siglo XXI para los aprendices del nuevo milenio*. 2010.
- [19] N. Rivera. "Las capacidades humanas desde la perspectiva psicológica del profesional competente." *Educación Médica Superior*, Universidad de Ciencias Médicas de La Habana 2016, pp. 390-398.
- [20] Servicio de Rentas Internas (SRI), *Registro Único de Contribuyentes de personas naturales y sociedades de la provincia de Galápagos*, tomado de la página web <http://www.sri.gob.ec/web/10138/92>, el 13 de marzo del 2015.
- [21] Organización de las Naciones Unidas, ONU. *Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas (CIIU). Revisión 4*. Nueva York, 2009, p. 308.
- [22] P. Morales. "Tamaño necesario de la muestra: ¿Cuántos sujetos necesitamos?" p.12. *Estadística aplicada a las Ciencias Sociales*. Universidad Pontificia de Madrid, 2012. Disponible en <http://www.upcomillas.es/personal/peter/investigacion/Tama%F1oMuestra.pdf>.
- [23] V. Lasio, G. Caicedo, X. Ordeñana e I. Izquierdo. *Global Entrepreneurship Monitor GEM*, Ecuador 2016. Guayaquil: ESPAE, ESPOL, ISSN No13903047. 2017.
- [24] M. Castro. "Indicadores de Desarrollo Sostenible Urbano. Una aplicación para Andalucía." Ph.D. dissertation, Universidad de Málaga. Málaga. 2002.
- [25] Organización para la Cooperación y el Desarrollo (OCDE). *La Definición y Selección de Competencias Clave - DeSeCo*. 2001.
- [26] C. Yengle-Ruiz. "Aplicación del análisis de componentes principales como técnica para obtener índices sintéticos de calidad ambiental." *UCV - Scientia* 4(2), 2012. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4369401.pdf>.
- [27] S. Lloret-Segura, A. Ferreres-Trave, A. Hernández-Baeza e I. Tomás-Marco. "El análisis factorial exploratorio de los ítems: una guía práctica, revisada y actualizada." *Anales de psicología*, 2014, vol. 30, n° 3 (octubre), pp. 1151-1169. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.6018/analesps.30.3.199361>.
- [28] D. Frías-Navarro, M. Pascual-Soler. "Prácticas del análisis factorial exploratorio (AFE) en la investigación sobre conducta del consumidor y marketing." *Suma Psicológica*, Vol. 19 No 1 Junio 2012, pp. 47-58 ISSN 0121-4381 ISSN-E 2145-9797.

Evaluación de algoritmos de fusión de datos para estimación de la orientación de vehículos aéreos no tripulados

Evaluation of data fusion algorithms for attitude estimation of unmanned aerial vehicles

Cristóbal Chérigo ^{1*}, Humberto Rodríguez ²

^{1,2}Laboratorio Especializado de Análisis, Diseño y Simulación, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá

¹cherigo91@gmail.com, ²humberto.rodriguez@utp.ac.pa

Resumen— El objetivo de este trabajo es evaluar y comparar los tres algoritmos de procesamiento de datos más usados en sistemas de referencia de orientación y rumbo (AHRS, por sus siglas en inglés), para vehículos aéreos no tripulados (UAVs por sus siglas en inglés), los cuales implementan procesos de filtrado y de fusión de datos. Estos algoritmos son el Filtro de Kalman, el de Mahony y el de Madgwick. Comercialmente existen varios tipos de sensores IMU/Magnetómetros que proporcionan una muy buena retroalimentación de los estados de las aeronaves, sin embargo suelen ser muy costosos, por lo que en este trabajo nos concentraremos en aquellos que tienen un costo medio y una buena relación costo/desempeño a la hora de construir UAVS. Se desarrolló una metodología, mediante la cual se pudo comparar que algoritmo se adapta mejor a sistemas con diferentes características. Los resultados mostraron que el algoritmo que mejor funcionó es el filtro complementario de Robert Mahony debido a su mayor velocidad de convergencia. De los tres ángulos de rotación alrededor de los ejes principales xyz, en todas las estimaciones evaluadas, el ángulo alrededor de $z(\psi)$ fue el que presentó la magnitud del error más grande, lo cual indica, que sigue existiendo cierta deficiencia en aquellas estimaciones que dependen del magnetómetro.

Palabras claves— AHRS, algoritmos de fusión de datos, algoritmo de Madgwick, algoritmo de Mahony, UAVs, filtro de Kalman.

Abstract— The aim of this study was to evaluate and compare the three most commonly used data processing algorithms for Attitude and Heading Reference Systems (AHRS) for unmanned aerial vehicles (UAVs), which implement filtering processes and data fusion. These algorithms are the Kalman filter, Madgwick algorithm and Mahony algorithm. Commercially, there are several types of IMU / Magnetometer sensors, which provide a very good feedback of an aircraft states. However, they tend to be very expensive, so in this paper we focus on those who have a medium cost and a good cost / performance ratio for use with UAVs. A methodology was developed so we could compare what algorithm adapts better to systems with different characteristics. The results showed that the Mahony algorithm worked better due to its faster convergence. Of the three angles of rotation around the main axes xyz, the angle around $z(\psi)$ showed the largest error, which indicates that there is still some deficiency from those estimates which depend on the magnetometer.

Keywords— AHRS, data fusion algorithms, Madgwick algorithm, Mahony algorithm, UAVs, Kalman filter.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 26 de febrero de 2017

Fecha de Aceptación: 25 de septiembre de 2017

1. Introducción

El principal objetivo de los algoritmos de fusión de datos es el de mejorar la calidad de la información de salida en procesos con múltiples sensores, conocidos como procesos sinérgicos. El utilizar más de un sensor

no solo aumenta la cobertura espacial y temporal de las variables estudiadas en cuestión, sino que permite aumentar a su vez la supresión del ruido y la precisión del sistema de medición [1]. Hoy en día, uno de los principales instrumentos de vuelo en los vehículos

aéreos no tripulados (UAVs, por sus siglas en inglés) es la unidad de medición inercial (IMU, por sus siglas en inglés), la cual al adicionársele un magnetómetro se le conoce también como “Sistema de medición de gravedad, velocidad angular y magnetismo” (MARG, por sus siglas en inglés). La información que proporcionan los sensores que componen la IMU/Magnetómetro nos da la posibilidad de obtener la orientación y rumbo de cualquier vehículo, pero estos sensores suelen ser muy susceptibles al ruido y a las perturbaciones. El objetivo de este trabajo es evaluar y comparar los algoritmos de tratamiento de información más usados, desarrollados para sistemas de referencia de orientación y rumbo (AHRS, por sus siglas en inglés), los cuales implementan procesos de filtrado y de fusión de datos.

Comercialmente existen varios tipos de sensores IMU/Magnetómetros que proporcionan una muy buena retroalimentación de los estados de las aeronaves [2], sin embargo suelen ser muy costosos, por lo que en este trabajo vamos a enfocarnos en aquellos que tienen un costo moderado y una buena relación costo/desempeño cuando se utilizan para navegación con UAVs.

Los algoritmos usados para la mejora de la medición, que incorporan los sensores de medición inercial, implementan formulaciones matemáticas del álgebra de cuaterniones, álgebra lineal, procesos estocásticos y estadística inferencial, lo cual aumenta el costo computacional y el tiempo de desarrollo de los proyectos.

Los sensores de medición inercial están compuestos usualmente por giroscopios y acelerómetros. Por una parte, los giroscopios se encargan de la medición de los componentes de la velocidad angular, los cuales se integran para obtener la orientación de la aeronave, pero estos suelen ser susceptibles a deriva o acumulación de error en la medida con el transcurso del tiempo.

Por otra parte, los acelerómetros sensan el cambio en la orientación con respecto al vector de la fuerza gravitacional, pero tienden a distorsionar la medida cuando actúan fuerzas externas. La combinación o fusión de las mediciones del giroscopio y del acelerómetro busca mejorar la medición de la orientación. Sin embargo, el acelerómetro puede ser utilizado solo para medir la rotación alrededor de los ejes x (*pitch*) y y (*roll*) (ver la figura 1) y no alrededor del eje z (*yaw*), debido a que el vector gravitacional es paralelo al eje z .

Por lo tanto, se utiliza el magnetómetro para medir el ángulo de rotación alrededor del eje z , dado que el

campo magnético de la tierra posee componentes tanto en x como en z .

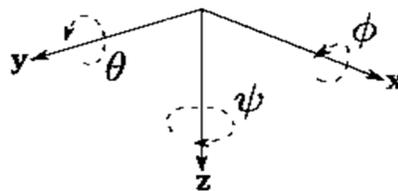


Figura 1. Sistema de referencia global para la navegación del UAV.

La variedad de algoritmos para fusión y filtrado de datos de sensores inerciales es amplia, por lo cual en base a la información encontrada en la literatura, [2, 3, 9, 10, 11, 12], decidimos estudiar aquellos algoritmos que sirven de base para AHRS comerciales de alto costo, pero que de igual manera pueden ser implementados con IMU/Magnetómetros de costo medio. De esta manera, se logra mejorar la estimación de la orientación que se obtiene con estos sensores un tanto más económicos. Por lo anterior, los algoritmos que se han implementado y evaluado son el filtro de Kalman, el algoritmo de Madgwick, y el algoritmo de Mahony. En la siguiente sección se explicará en qué consiste cada uno de estos algoritmos.

En la literatura son escasos los trabajos que se enfocan en la comparación de los algoritmos de Madgwick, Mahony y Kalman [12,17], y los que se han publicado difieren en la metodología de evaluación y en las características de los sistemas de medición utilizados como patrón de referencia. En el trabajo de Cavallo *et al.*, [17], las pruebas se realizaron ubicando la IMU/Magnetómetro en la pinza de un robot Kuka Youbot de 5 grados de libertad y los ángulos de las articulaciones fueron medidos con los codificadores de posición del robot a una frecuencia de 40Hz, lo cual no permite incluir y captar el efecto de las vibraciones típicas que se dan durante la operación de un UAV. Además, con este montaje se limita considerablemente el rango de posiciones velocidades angulares que se pueden probar. Cabe señalar, que los resultados publicados por Cavallo *et al.* difieren de los hallazgos del presente trabajo, ya que en aquel trabajo el filtro de Kalman resulta superar a los otros métodos en cuanto a precisión. En otra referencia, Madgwick, [12], compara su propio algoritmo con un filtro de Kalman, utilizando como referencia los resultados obtenidos a partir de algoritmos de procesamiento de imágenes.

2. Algoritmos AHRS

2.1 Filtro de Kalman

Es un algoritmo recursivo de procesamiento de datos, el cual toma en cuenta toda la información disponible que se tenga de las variables de estados del sistema. El mismo hace uso de las características estocásticas tanto de las señales como del ruido, tomando en cuenta la dinámica tanto del proceso de estimación como del proceso de medición.

Este filtro requiere, en su forma simple no extendida, que el modelo estudiado sea lineal y que el ruido en las mediciones sea gaussiano. Principalmente, este filtro apunta hacia el problema de estimar el vector de estado, $X \in \mathbb{R}^n$, de un proceso estocástico controlado en tiempo real [4].

El filtro de Kalman asume que los estados del sistema en un tiempo t se pueden obtener a partir de los estados *a priori* del sistema en un tiempo $t-1$ de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$x_t = F_t x_{t-1} + B_t u_t + w_t \quad (1)$$

Donde:

x_t : Vector de estado.

F_t : Matriz de transición de estado = $\begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$.

x_{t-1} : Vector de estado previo en $t-1$.

B_t : Matriz de control del modelo = $\begin{bmatrix} \Delta t \\ 0 \end{bmatrix}$.

u_t : Vector de control.

w_t : Vector del ruido del proceso.

Dicha ecuación constituye el modelo del proceso [5]. Además hay un modelo que describe como las medidas del sistema u observaciones son obtenidas a partir del estado interno:

$$z_t = H_t x_t + v_t \quad (1)$$

Donde:

z_t : Vector de medición.

H_t : Matriz que mapea x_t en $z_t = [1 \ 0]$.

v_t : Ruido de la medición.

Esta última ecuación constituye el modelo de la medición. Por otro lado, se supone que las variables w_t

y v_t son variables aleatorias independientes y que poseen media cero y una distribución de probabilidad gaussiana [5]. Es decir, $w_t : N(0, Q_t)$ y $v_t : N(0, R_t)$, en donde Q_t y R_t son las matrices de covarianza respectivas.

Por lo anterior, en estas expresiones los subíndices t , tanto de la matriz de covarianza del proceso como de la matriz de covarianza de la medición, nos indican que en términos generales, estas pueden variar con el proceso, pero supondremos que estos procesos estocásticos son estacionarios y por ende dichas matrices son constantes. Una vez se tenga tanto el modelo del proceso como el de la medición, y se hayan estimado Q y R se realiza un proceso iterativo el cual está compuesto de dos etapas, a saber, la de predicción y la de corrección de las medidas, como se muestra en la figura 2.

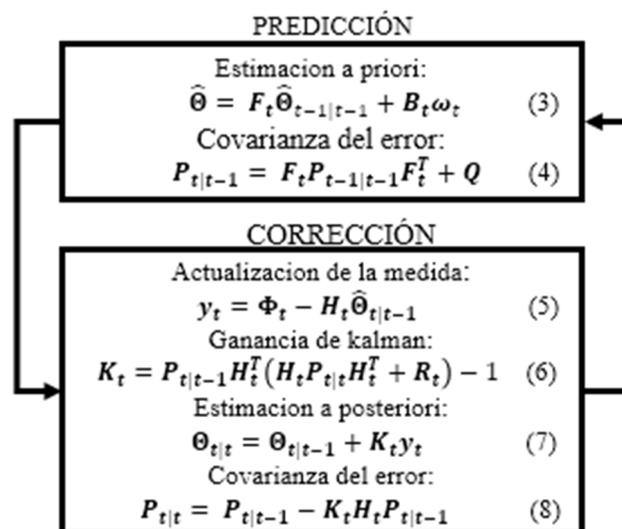


Figura 2. Filtro de Kalman: Etapas de predicción y corrección.

Donde:

$\hat{\theta} \{ \Phi = \phi, \theta, \psi; \omega_t = \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi} \}$: Vector de estado estimado.

$\Phi \{ \phi, \theta, \psi \}$: Ángulos medidos a partir de la información suministrada por el acelerómetro y magnetómetro.

$\omega_t \{ \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi} \}$: Velocidades del giroscopio.

2.1.1 Cálculo de Roll, Pitch, Yaw usando el giroscopio

Un método alternativo para adquirir los ángulos *roll*, *pitch* y *yaw*, es mediante el cálculo de la integral numérica de sus tasas de cambio.

$$\varphi(t) = \int_{t_0}^t \dot{\varphi}(t)dt + \varphi(t_0) \quad (9)$$

Donde:

$\varphi(t)$: Ángulo que se desea estimar.

$\dot{\varphi}(t) = \omega$: Tasa de cambio en el tiempo.

El giroscopio permite medir la velocidad angular en cada uno de los ejes de rotación del sistema de referencia fijo al UAV, pero en general los ángulos obtenidos a partir de estas mediciones no se corresponden con los ángulos calculados a partir de las mediciones del acelerómetro y del magnetómetro, las cuales corresponden a un sistema de referencia de navegación. Por lo tanto, se utiliza una matriz de transformación que relaciona las derivadas de los ángulos de Euler XYZ con las velocidades medidas con el giroscopio (ecuación 10). En dicha ecuación los valores de pitch y roll (ϕ y θ) se calculan a partir de las mediciones del acelerómetro. Así,

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & s(\phi)t(\theta) & c(\phi)t(\theta) \\ 0 & c(\phi) & -s(\phi) \\ 0 & \frac{s(\phi)}{c(\theta)} & \frac{c(\phi)}{c(\theta)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}, \quad (10)$$

en donde, $s(\cdot)$, $c(\cdot)$ y $t(\cdot)$, son las funciones trigonométricas $\sin(\cdot)$, $\cos(\cdot)$ y $\tan(\cdot)$, respectivamente.

Posteriormente, se pueden obtener los ángulos de Euler mediante la integración de los valores de la ecuación 10. Como resultado de la integración, los errores de medición asociados a las mediciones del giroscopio (ω) se propagarán al ángulo estimado. Para corregir este error es necesario implementar un algoritmo de fusión sensorial, por ejemplo, el filtro de Kalman, tal y como se ilustra en el diagrama de la figura 3.

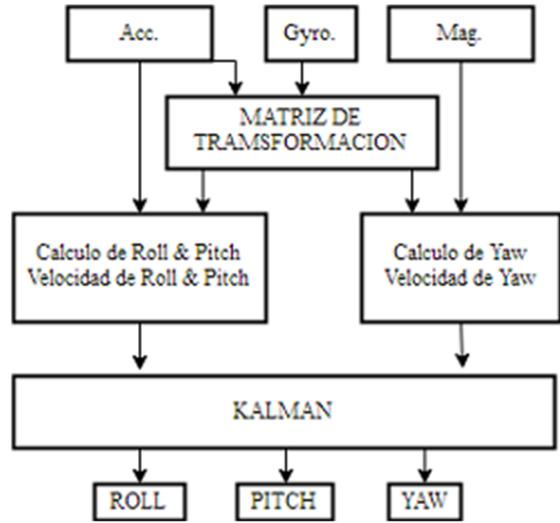


Figura 3. Implementación del filtro de Kalman para el cálculo de los ángulos de Euler.

2.2 Algoritmo Madgwick

Este algoritmo fue desarrollado por Sebastián Madgwick [12]. Este emplea una representación de la orientación por medio de cuaterniones, por lo cual no está sujeto a los problemas de singularidad presentes en las representaciones basadas en matrices de cosenos directores. Cabe señalar, que el algoritmo de Madgwick está basado en el algoritmo del gradiente descendente para calcular la dirección del error de medición a partir de los datos del giroscopio.

El algoritmo está dividido en cuatro partes principales que son: cálculo de la orientación a partir de las velocidades angulares medidas por el giroscopio; el cálculo de las orientaciones a partir de los vectores medidos del campo gravitacional y del campo magnético; la fusión de las dos estimaciones anteriores y por último la normalización del cuaternión de la medición. A continuación detallaremos cada una de las partes del algoritmo.

2.2.1 Orientación a partir de las velocidades angulares

Las velocidades angulares alrededor de los ejes x , y y z , medidas por el giroscopio en el sistema de referencia local, se expresan de la siguiente forma:

$$S_\omega = [0 \quad \omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z] \quad (11)$$

De la matemática de cuaterniones tenemos que el “producto de cuaternión” entre el vector de orientación

del sistema de referencia de la tierra relativo al del sensor y el vector de velocidades angulares nos da la derivada de dicho vector de orientación. Así:

$$\dot{q}_{\omega,k} = \frac{1}{2} \hat{q}_{k-1} \otimes s_{\omega} \quad (12)$$

Esta derivada la podemos integrar con respecto al tiempo si conocemos el intervalo de muestreo (Δt) así:

$$\hat{q}_{\omega,k} = \frac{1}{2} \hat{q}_{k-1} \otimes s_{\omega} \quad (13)$$

2.2.2 Orientación a partir del vector de observaciones

Se calcula un estimado del cuaternión que da la orientación del sensor, para la cual se alinean la dirección de referencia predefinida del campo (gravitacional o magnético) con la dirección medida del campo en el sistema de coordenadas del sensor. Esto se formula como un problema de optimización en el que se minimiza una función objetivo f por el método de gradiente descendente, así:

$$f(\hat{q}_{k-1}, {}^E d, {}^B s) = \hat{q}_{k-1} \otimes {}^E d \otimes \hat{q}_{k-1} - {}^B \quad (14)$$

$$\hat{q}_{\nabla,k-1} = \hat{q}_{k-1} - \mu \frac{\nabla f(\hat{q}_{k-1}, {}^E d, {}^B s)}{\|\nabla f(\hat{q}_{k-1}, {}^E d, {}^B s)\|} \quad (15)$$

donde, d hace referencia al vector del campo magnético o del campo gravitacional, mientras que μ es el tamaño del paso.

2.2.3 Fusión de las dos estimaciones

El algoritmo de fusión de las dos estimaciones anteriores viene dado por la siguiente ecuación:

$$\hat{q}_k = \gamma \hat{q}_{\nabla,k} + (1 - \gamma) \hat{q}_{\omega,k} \quad 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (16)$$

$$\gamma_t = \frac{\beta}{\frac{\mu}{\Delta t} + \beta} \quad (17)$$

En donde γ depende de la constante β , la cual se calcula de la siguiente forma.

$$\beta = \sqrt{\frac{3}{4} \bar{\omega}_{\beta}} \quad (18)$$

A su vez $\bar{\omega}_{\beta}$: Representa la media del error de las medidas hechas con el giroscopio.

2.2.4 Normalización del cuaternión de medición

En este último paso se normaliza el cuaternión de la medición de orientación. Así,

$$\hat{q}_{\omega,k} = \frac{\hat{q}_{\omega,k}}{\|\hat{q}_{\omega,k}\|} \quad (19)$$

2.3 Algoritmo de Mahony

Este algoritmo fue desarrollado por Robert Mahony y es un filtro complementario, el cual mejora la estimación de la orientación aplicando un filtro pasa bajo a las estimaciones obtenidas de los acelerómetros y magnetómetros. Al mismo tiempo se aplica un filtro pasa alto a las estimaciones obtenidas del giroscopio y por último se fusionan ambas estimaciones [13].

De igual forma que el filtro de Madgwick, el filtro de Mahony se basa en una representación en forma de cuaterniones. Así, la derivada del vector de orientación se expresa como:

$$\dot{q}_{\omega} = \frac{1}{2} q \otimes (s_{\omega} + \delta), \quad (20)$$

en donde, δ es un término de corrección de las velocidades angulares generado por un bloque integral-proporcional (PI). que actúa sobre el error de las estimaciones obtenidas de los acelerómetros/magnetómetros y el giroscopio, el cual tiene la siguiente forma:

$$\delta = k_p e + k_i \int e dt \quad (21)$$

En donde e representa el error de las estimaciones. En el bloque PI, el término que corresponde a la parte proporcional gobierna la frecuencia de cruce entre el estimador acelerómetro/magnetómetro y el estimador basado en el giroscopio. En tanto que el término integral compensa la deriva del giroscopio.

3. Plataforma de Experimentación

La importancia de este trabajo radica en el hecho de que las condiciones bajo las cuales se evalúan y comparan los algoritmos se asemejan a las condiciones de vuelo de los UAV y son similares para las pruebas con todos los algoritmos. Para realizar las pruebas

experimentales se diseñó y construyó una plataforma experimental, la cual permite monitorear las mediciones tanto del IMU/magnetómetro, como de un codificador óptico, con su respectivo decodificador de cuadratura. Las mediciones de este último se utilizaron como referencia para poder determinar la exactitud de los algoritmos y caracterizarlos para futuros proyectos con UAVs. En la figura 4 detallamos la arquitectura de la plataforma experimental.

La plataforma fue diseñada de tal forma que nos permite monitorear cada uno de los ángulos alrededor de los ejes principales x, y, z, por separado. En el diseño optamos por utilizar el marco para quadrotor, HobbyPower x450, que gracias a su estructura tubular nos permitió conectarle de forma rígida el codificador óptico.

Se seleccionó el codificador óptico YUMO-E6C2-CWZ. Este tiene una resolución de 1024 pulsos por revolución que acompañado de un decodificador de cuadratura nos permite obtener 4096 pulsos por revolución, lo cual se traduce en unos 0.087 grados de resolución. El IMU /magnetómetro que utilizamos viene incorporado en el controlador de vuelo Flymaple. El Flymaple viene con un procesador ARM-Cortex-M3 (72 MHz), un giroscopio ITG-3200, un acelerómetro ADXL345 y un magnetómetro HMC5883L.

Los motores con sus hélices se instalaron en la estructura del quadrotor para adicionar vibración al sistema, por lo cual durante las pruebas los mismos operan a diferentes rangos de velocidades, buscando asemejarse a condiciones de vuelo reales. Para ello utilizamos motores sin escobillas, los SunnySky X2212.

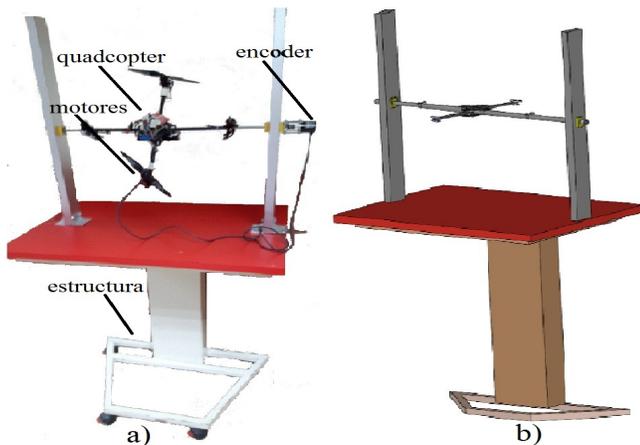


Figura 4. Plataforma experimental para evaluación y comparación de algoritmos AHRS: a) Prototipo, b) Modelo CAD.

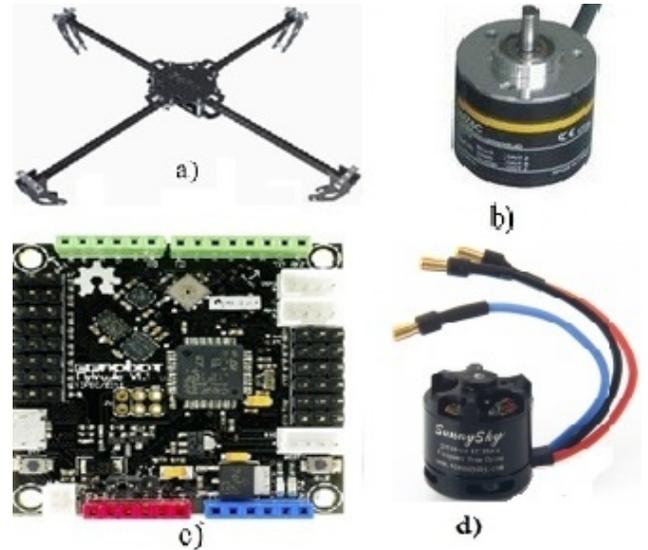


Figura 5. Instrumentación de la plataforma experimental: a) Quadrotor hobbyPower x450, b) Encoder YUMO-E6C2-CWZ, c) Controlador de vuelo Flymaple, d) motor SunnySky X2212.

4. Metodología de evaluación

Son muchos los criterios y los procedimientos que existen para evaluar y elegir un algoritmo. Desde un punto de vista práctico nos interesan los requerimientos del controlador y del sistema de medición para que el algoritmo se pueda ejecutar. En nuestro caso, la velocidad de ejecución y el espacio en memoria son aspectos importantes. Por otra parte, hay características de la respuesta o funcionamiento de un tipo de algoritmo que son muy importantes, como lo son, el tiempo que le toma en converger a una respuesta y el error con respecto a un valor de referencia. A continuación detallaremos el procedimiento para la evaluación de los algoritmos.

- En cada una de las pruebas que se detallarán a continuación los motores instalados en la estructura del quadrotor giran de forma aleatoria entre 4000 rpm y 7000 rpm, esto para añadir vibraciones al sistema.
- Todos los algoritmos serán implementados para las mismas frecuencias de muestreo, para comparar el error de cada algoritmo bajo las mismas condiciones.
- El quadrotor será llevado de una posición angular A a una posición angular B y se determinará el número de iteraciones que le toma al algoritmo converger a la posición B.

- Cabe señalar que en su trabajo principal, [13], Mahony resalta que en general, independientemente de los valores escogidos de k_p y k_i se obtendrán buenos resultados siempre y cuando se cumpla que $k_p, k_i > 0$. En otro de sus trabajos, [16], Mahony recomienda que, para aplicaciones con UAVs, k_i sea de 10 a 100 veces más baja que k_p . Los valores seleccionados en este trabajo son los siguientes. $k_p = 1 \text{ rad/s}$ y $k_i = 0.1 \text{ rad/s}$.
- Con el algoritmo de Madgwick se utilizó $\beta = 0.041$, el cual es un valor óptimo, calculado por el propio Madgwick [12].
- Para el filtro de Kalman se definió $Q = 0.003$, y $R = 0.0009$ basándonos en ganancias definidas en trabajos previos con el filtro de Kalman, para aplicaciones similares [6, 7, 8, 14, 15].

5. Resultados

En las figuras de la 6 a la 11 mostramos los gráficos de las estimaciones realizadas por cada uno de los algoritmos AHRS analizados en este trabajo. En el mismo gráfico se muestra el valor de referencia medido con el codificador óptico y la diferencia entre la estimación y el valor de referencia. Nos referiremos a cada uno de los ángulos alrededor de los ejes principales xyz por la nomenclatura de Tait_Bryan (Ángulos de Euler). Las gráficas de los resultados alrededor del eje y (θ) no serán mostradas en este trabajo, ya que los resultados son muy similares a los resultados para rotaciones alrededor del eje x (ϕ).

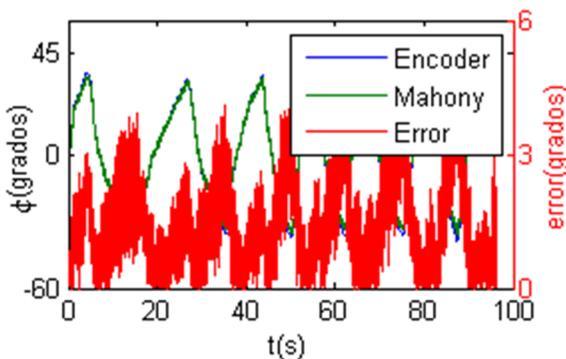


Figura 6. Mahony: Ángulo Roll y mediciones con el codificador óptico, a 84 Hz.

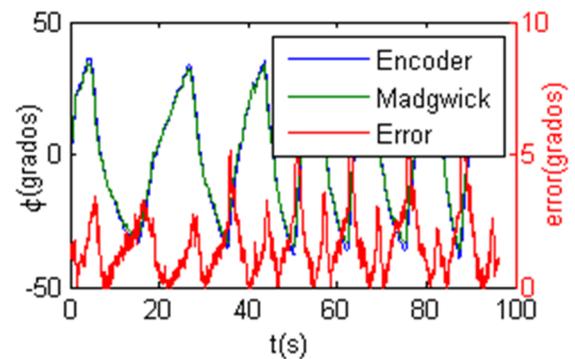


Figura 7. Madgwick: Ángulo Roll y mediciones con el codificador óptico, a 84 Hz.

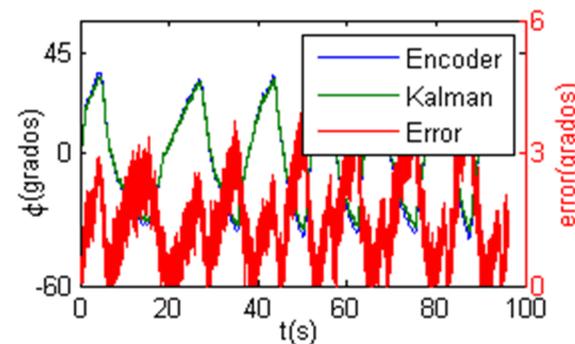


Figura 8. Kalman: Ángulo Roll y mediciones con el codificador óptico, a 84 Hz.

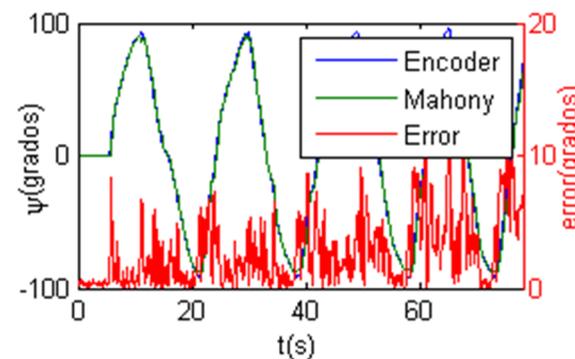


Figura 9. Mahony: Ángulo Yaw y mediciones con el codificador óptico, a 84 Hz.

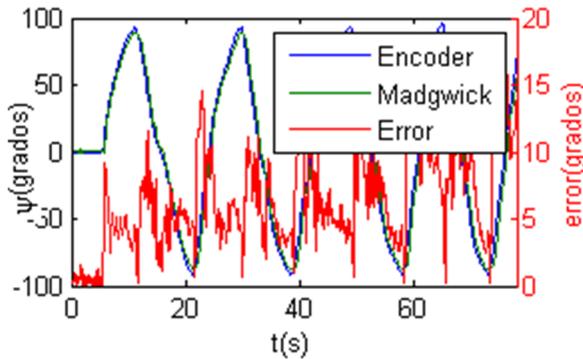


Figura 10. Madgwick: Ángulo Yaw y mediciones con el codificador óptico, a 84 Hz.

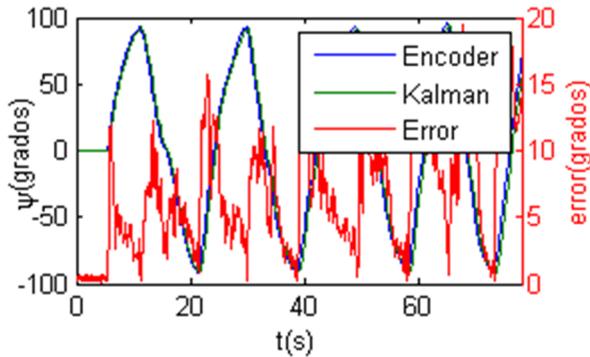


Figura 11. Kalman: Ángulo Yaw y mediciones con el codificador óptico, a 84 Hz.

Los gráficos de las figuras 6 a la 8 muestran como el error en el algoritmo de Madgwick tiene un comportamiento más suave, sin los niveles de ruido que presentan las estimaciones con Kalman y Mahony. Sin embargo, las estimaciones con Mahony a pesar de que tienen mayor aleatoriedad, presentan un error menor en comparación con las otras estimaciones. Para el caso del ángulo *pitch* los resultados fueron bastantes similares a los que se observaron para el ángulo *roll*, en tanto que para el ángulo *yaw*, no se observaron muchas diferencias entre las tres estimaciones (figuras 9 a la 11).

En las figuras 12 y 14 podemos observar los efectos de la frecuencia de muestreo sobre la precisión de los algoritmos AHRS evaluados en este trabajo. Los algoritmos para evaluar en un rango de frecuencias de muestreo, desde los 10 Hz hasta los 84 Hz, dándonos un rango amplio de referencia para futuros proyectos con UAVs. También podemos observar en dichos gráficos, a mayor frecuencia dentro del rango señalado, como es de esperar, todos los algoritmos presentan mayor precisión, siendo el algoritmo de Mahony el más robusto a la disminución de la frecuencia y el de Madgwick el menos robusto. La raíz del error cuadrado

medio para los ángulos alrededor de $x(\phi)$ y $y(\theta)$ es aproximadamente de 2° lo cual es bastante aceptable considerando los valores reportados en la literatura [2]. La estimación del ángulo alrededor de $z(\psi)$, obtenida por los tres algoritmos de AHRS, muestra una raíz del error cuadrado medio de entre 3° y 5° .

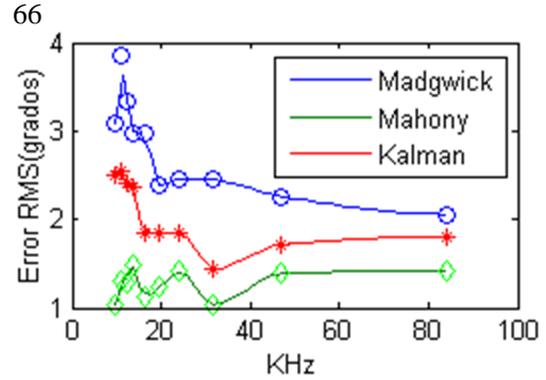


Figura 12. Error en el Ángulo Roll vs. frecuencia de muestreo.

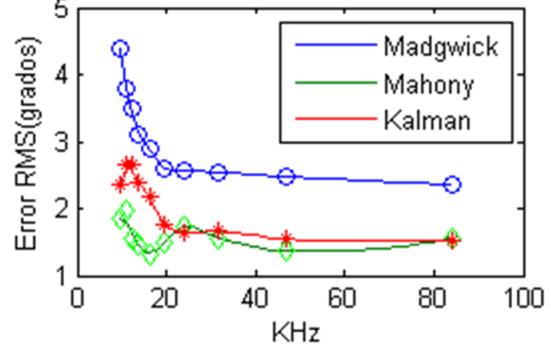


Figura 13. Error en el Ángulo Pitch vs. frecuencia de muestreo.

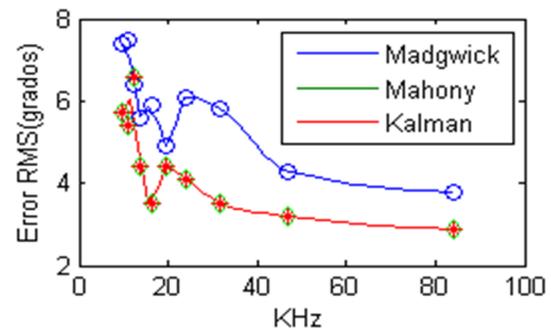


Figura 14. Error en el Ángulo Yaw vs. frecuencia de muestreo.

Las figuras de la 12 a la 14 muestran como para diferentes frecuencias de muestreo el algoritmo de Mahony sigue mostrando un error relativamente menor al de las demás estimaciones. También se logra observar

que a medida que la frecuencia pasa el umbral de los 80 Hz no se observan muchas mejoras en las estimaciones de los algoritmos.

En los resultados de las figuras 15 a la 20, buscamos evaluar la rapidez con la que cada algoritmo converge, pasando de un ángulo $A = 0^\circ$, a un ángulo $B = 30^\circ$. Entendiéndose por converger, el instante en que el error se estabiliza. En los gráficos del 6 hasta el 11 se estudia el error dinámico, mientras que en las siguientes se busca determinar cuántos ciclos de procesamiento tarda en converger el algoritmo a la respuesta. Esto no es posible apreciarlo en los resultados de los gráficos del 6 al 11 dado que la escala de tiempo es mucho más grande.

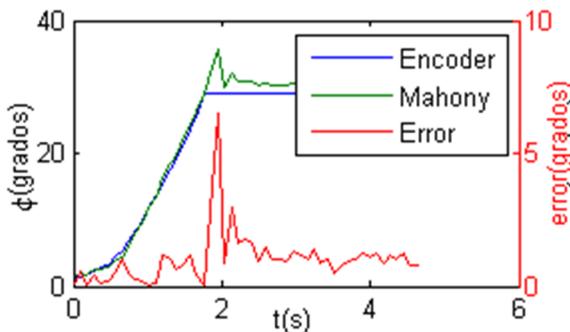


Figura 15. Mahony: Ángulo Roll y mediciones con el codificador óptico, a 84 Hz.

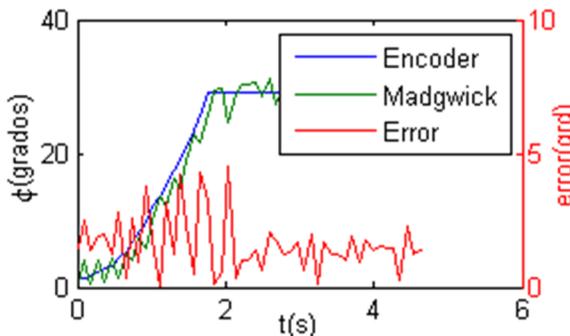


Figura 16. Madgwick: Ángulo Roll y mediciones con el codificador óptico a 84 Hz.

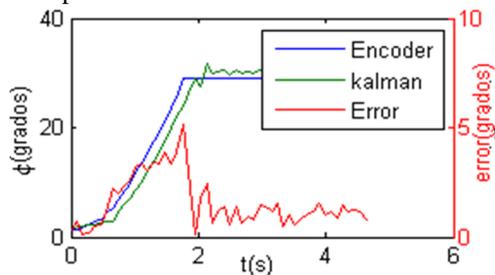


Figura 17. Kalman: Ángulo Roll y mediciones con el codificador óptico, a 84 Hz.

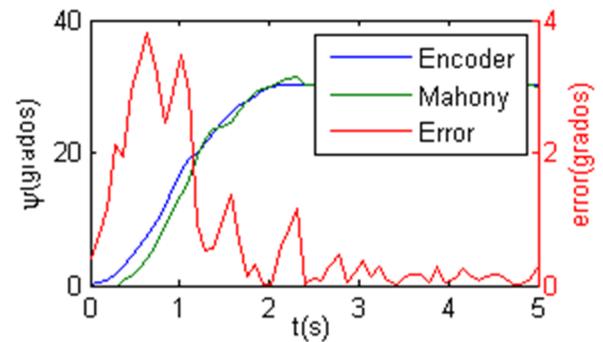


Figura 18. Mahony: Ángulo Yaw y mediciones con el codificador óptico, a 84 Hz.

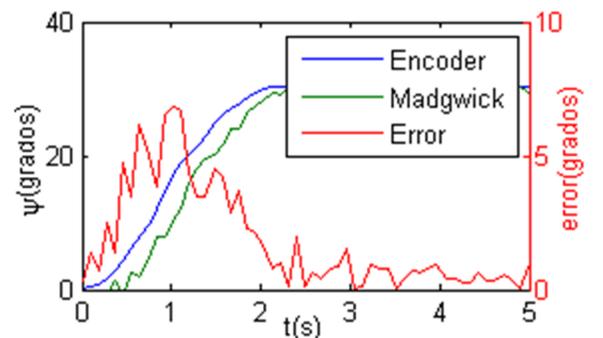


Figura 19. Madgwick: Ángulo Yaw y mediciones con el codificador óptico, a 84 Hz.

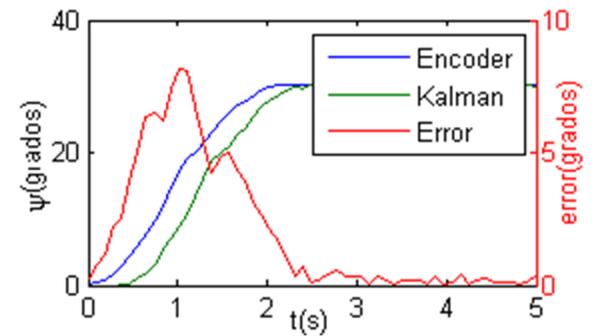


Figura 20. Kalman: Ángulo Yaw y mediciones con el codificador óptico, a 84 Hz.

En la tabla 1. Se muestran los resultados del tiempo de ejecución y el número de iteraciones que debe realizar cada algoritmo ante un cambio de 30° . Adicionalmente, mostramos la raíz del error cuadrado medio para cada algoritmo, con una velocidad de muestreo de 84Hz.

Tabla 1. Ciclos para converger y tiempo de ejecución

	Mahony	Madgwick	Kalman
Tiempo de ejecución	2.8E-4	3.754E-4	1.9E-4
Error en roll	1.73	2.06	1.80
Error en pitch	1.56	2.36	1.51
Error en yaw	3.28	3.81	2.9
Ciclos para converger	2	2	4

6. Conclusiones

Dado que el objetivo de este trabajo fue implementar y evaluar los algoritmos de Kalman, Mahony y Madgwick, podemos concluir que fue desarrollada exitosamente una metodología mediante la cual se pudieron comparar las características de funcionamiento de dichos algoritmos, bajo condiciones de operación encontradas típicamente en la navegación con UAVs.

De acuerdo a los resultados, para los rangos de frecuencia de muestreo a los que fueron evaluados los algoritmos, el que mejor funcionó fue el filtro complementario de Robert Mahony, debido a su mayor velocidad de convergencia y a que sus errores de medición son muy similares a los del filtro de Kalman.

De los tres ángulos de rotación alrededor de los ejes principales xyz , en todas las estimaciones evaluadas, el ángulo alrededor de $z(\psi)$ fue el que presentó la mayor magnitud del error, lo cual indica que sigue existiendo cierta deficiencia en aquellas estimaciones que dependen del magnetómetro.

Durante la experimentación se pudo observar la robustez que poseen todos los filtros ante los cambios bruscos en la dinámica del sistema.

7. Trabajo futuro

Como trabajo futuro proponemos el desarrollo de una interfaz gráfica de usuario, que facilite la recopilación y procesamiento de los datos que nos suministran los sensores. También se propone la adición de otro motor el cual se encargaría de añadir otras perturbaciones periódicas al sistema.

8. Agradecimientos

Se le agradece a la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) y al Sistema Nacional de Investigación (SNI) de Panamá, que fueron los que aportaron los fondos necesarios, para que se llevara cabo esta investigación.

9. Referencias

- [1] H. B. Mitchell, "Multi-Sensor Data Fusion An introduction", Berlin: New York, Springer Verlag, p. 3, 2007.
- [2] Damien Douxchamps, "A small list of IMU/INS/INU" [en línea], <http://damien.douxchamps.net/research/imu/>, 2016.
- [3] R. Munguía and A. Grau, "A Practical Method for Implementing an Attitude and Heading Reference System", Department of computer Science, CUCEI, Universidad de Guadalajara, Mexico, International journal of advanced Robotic Systems, p. 12, 2014.
- [4] J. A. Camarena, "El Filtro de Kalman"[en línea], <http://dep.fie.umich.mx/~camarena/FiltroKalman.pdf>, 2014.
- [5] R. Faragher, "Understanding the basis of the kalman filter via a simple and intuitive derivation", IEEE Signal Process. Mag., vol. 29, no. 5, pp. 128-132, 2012.
- [6] B. Barshan and H. F. Durrant-Whyte. Inertial navigation systems for mobile robots.11(3):328-342, June 1995.
- [7] E. Foxlin, "Inertial Head-Tracker Sensor Fusion by a Complementary Separate-Bias Kalman Filter", Proceedings of VRAIS '96, pp. 185-194.
- [8] J. L. Marins, Xiaoping Yun, E. R. Bachmann, R. B. McGhee and M. J. Zyda, "An extended kalman filter for quaternion-based orientation estimation using marg sensors", *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on intelligent Robots and Systems*, vol. 4, pp. 2003-2011.
- [9] Xsens Technologies B.V. MTi and MTx, "User Manual and Technical Documentation.Pantheon 6a", 7521 PR Enschede, The Netherlands, 2009.
- [10] MicroStrain Inc. 3DM-GX3 -25 Miniature Attitude Heading Reference Sensor. 459 Hurricane Lane, Suite 102, Williston, VT 05495 USA, 1.04 edition, 2009.
- [11] Crossbow Technology, Inc. AHRS400 Series Users Manual. 4145 N. First Street, San Jose, CA 95134, rev. c edition, February 2007.
- [12] S. O. H. Madgwick, A. J. L. Harrison and R. Vaidyanathan, "Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm," *Proc. IEEE Int. Conf. Rehabil. Robot.*, pp. 1-7.
- [13] R. Mahony, T. Hamel and J-M. Pfimlin, "Complimentary filter design on the special orthogonal group SO(3)", Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, Institute of Electrical and Electronic Engineers, Seville, Spain, 2005.
- [14] M. Leccadito, "An Attitude Heading Reference System using a Low Cost Inertial Measurement Unit", Virginia Commonwealth University, Richmond, Virginia, 2013.
- [15] B. McCarron, "Low-Cost Implementation via Sensor Fusion Algorithms in the Arduino Environment", California Polytechnic State University, San Luis Obispo, p. 17, 2013.
- [16] M. Euston, Paul Coote, Robert Mahony, Jhonghyuk Kim and Tarek Hamel, "A complementary Filter for Attitude Estimation of a Fixed-Wing UAV", RAL Robotic and Autonomy Lab Australian National University, p. 6, 2008.
- [17] A. Cavallo, A. Cirillo, P. Cirillo, G. De Maria, P. Falco, C. Natale and S. Pirozzi, "Experimental Comparison of Sensors Fusion Algorithms for Attitude Estimation", The international Federation of Automatic Control cape Town, South Africa. 19th world congress, p. 6, 2014.

Optimización aplicada al sistema de intercambio de clave segura KLJN con garantía de error máximo fijo

Optimization applied to the KLJN secure key exchange system with maximum fixed error guarantee

Edwin Collado^{1*}, Yessica Sáez²

¹Centro de Innovación y Transferencia Tecnológica, Universidad Tecnológica de Panamá, ²Centro Regional de Azuero,
Universidad Tecnológica de Panamá

¹edwin.collado@utp.ac.pa, ²yessica.saez@utp.ac.pa

Resumen— El sistema de intercambio de clave segura KLJN ha demostrado proveer seguridad incondicional de forma simple y con muy pocos componentes electrónicos. Sin embargo, este sistema presenta errores estadísticos que dependen de parámetros como la ventana de tiempo para realizar el intercambio de la clave y otros que son relevantes en la interpretación de los bits de la clave. El objetivo de este trabajo es desarrollar estrategias que permitan obtener valores óptimos de dichos parámetros, mientras se asegura que los errores se mantengan dentro de valores aceptables. Los resultados obtenidos demuestran que las técnicas de optimización propuestas no solo garantizan que los errores no sobrepasen un límite de error máximo fijo permitido, sino que también permiten manejar eficientemente los recursos del sistema al utilizar valores óptimos de los parámetros importantes en el análisis de error.

Palabras claves—Optimización, probabilidad de error, ruido de Johnson, seguridad incondicional, sistema KLJN.

Abstract— The KLJN secure key exchange system has been proven to provide unconditional security in a simple way with very few electronic components. However, this system presents statistical errors that depend on parameters such as the time window for performing the key exchange and other relevant parameters used in the interpretation of the key bits. The objective of this work is to develop strategies to obtain optimal values of these parameters while ensuring that errors are kept within acceptable values. The results show that the proposed optimization techniques not only guarantee that the errors do not exceed a fixed maximum allowed error limit, but also allows to efficiently manage the system resources by using optimal values of the important parameters in the error analysis.

Keywords—Optimization, error probability, Johnson's noise, unconditional security, KLJN system.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 24 de febrero de 2017

Fecha de Aceptación: 25 de septiembre de 2017

1. Introducción

La comunicación electrónica se ha convertido en una de las partes más importantes de las actividades cotidianas del ser humano. Una gran cantidad de información, en su mayoría confidencial y sensible, es enviada, recibida y/o almacenada cada segundo. Por tal razón, resulta esencial contar con medidas de seguridad adecuadas que garanticen las cuatro características básicas de seguridad en una red de telecomunicaciones: autenticación, integridad, confidencialidad y no repudio [1]. Autenticación para garantizar la identidad de los que se comunican en la red, integridad para asegurar

que usuarios no autorizados no puedan leer y/o modificar la información que se transmite, confidencialidad para asegurar que la comunicación permanezca privada y protegida todo el tiempo, y no repudio para que los involucrados en el proceso de comunicación no puedan negar haber enviado/recibido un mensaje [1], [2]. Existen numerosos métodos y algoritmos orientados a asegurar estas características [2], donde uno de las más importantes es el cifrado o criptografía de datos [3].

El cifrado consiste en aplicar un algoritmo con cierta clave para transformar los mensajes y así garantizar la

confidencialidad [3]. Existen dos técnicas principales de cifrado, una de ellas es el cifrado asimétrico, el cual utiliza dos claves, una públicamente conocida y una privada, para cifrar y descifrar información, respectivamente. La otra técnica, y el foco de atención en el contexto de este trabajo, es el cifrado simétrico, en donde las dos partes involucradas en la comunicación (a menudo llamados *Alice* y *Bob*), generan e intercambian una sola clave, usualmente representada por una secuencia aleatoria de dígitos binarios (*bits*), para cifrar y descifrar la información.

Durante el proceso de intercambio de la clave simétrica, existe la posibilidad de que un usuario no autorizado (un espía, a menudo denominado *Eve*) esté monitorizando continuamente la comunicación. Por lo tanto, la seguridad en la comunicación depende grandemente de la capacidad que tengan *Alice* y *Bob* para intercambiar la clave de seguridad de forma secreta, mientras *Eve* monitoriza/escucha dicho intercambio.

Lastimosamente, la mayoría de los métodos empleados para generar e intercambiar esta clave, son basados en software y solo proveen un nivel de seguridad (computacionalmente) condicional. A simple vista, dichos métodos parecen inquebrantables, sin embargo, su efectividad no está totalmente garantizada en el futuro [4]-[7], ya que con acceso a un poder de computación adecuado o a un algoritmo lo suficientemente eficiente, un espía podría descubrir la clave y obtener acceso a la información que haya sido cifrada con la misma.

En contraste al cifrado digital, se encuentran los esquemas de intercambio de clave de capa física, los cuales son técnicas alternativas para ocultar información de espías. Dichas soluciones prometen ser incondicionalmente seguras [1]. Esto quiere decir que, a nivel teórico, la información se mantiene segura, incluso cuando *Eve* cuente con un poder de computación infinito y velocidad y precisión de medición ilimitadas. Es importante mencionar que la implementación práctica de dichos sistemas, en los cuales la clave tiene una longitud finita y se cuenta con un tiempo limitado para realizar el intercambio, puede no mantener esa seguridad incondicional. Sin embargo, desde el punto de vista probabilístico, el objetivo es lograr que el espía tenga una probabilidad muy pequeña de romper la seguridad [4], [5].

El primer esquema de seguridad en clamar seguridad incondicional fue el sistema de distribución de clave cuántica (QKD, *quantum key distribution*) [8]. Sin embargo, existen debates entre expertos sobre los niveles de seguridad alcanzados en este sistema [9]-[13]. Además, aunque discusiones indican que a través de nuevos enfoques (Ver [14], [15]) se podrían lograr niveles de seguridad más satisfactorios, todavía existen ciertas limitaciones prácticas como su precio, tamaño, cobertura, entre otros.

Afortunadamente, un prometedor sistema físico-clásico, de bajo costo, fue propuesto como alternativa para proveer seguridad incondicional utilizando solamente unos cuantos resistores, interruptores y cables [16]. Este sistema, conocido como *intercambio de clave segura KLJN (Kirchhoff's-Law-Johnson-Noise)*, está basado en las leyes de circuito de Kirchhoff y el teorema de fluctuación-disipación de física estadística. Su seguridad contra ataques pasivos (aquellos ataques en los que el espía trata de obtener información sin modificar la misma ni los recursos del sistema [1]) se basa en última instancia en la segunda ley de termodinámica [6], [16]-[20].

La simplicidad y el rendimiento del sistema KLJN han sido confirmados a través de su demostración experimental [17], cuyos resultados han motivado propuestas de modificaciones al sistema para mejorar su velocidad, cobertura y seguridad [21]-[25]. También se han propuesto una gran cantidad de aplicaciones potenciales, incluyendo distribución de clave segura en redes eléctricas inteligentes (*Smart Grids*) [26] y en comunicaciones vehiculares [26], [27] e informáticas [28], así como protección en componentes de hardware, procesadores, dispositivos de almacenamiento masivo, entre otras [29].

Como toda realización práctica, el sistema KLJN presenta limitaciones debido a su comportamiento en presencia de no-idealidades (tolerancia de las resistencias, capacitancia, resistencia e inductancia en el cable, efectos transitorios, entre otras [4], [6], [16]-[18]). Es por esto que se han propuesto y se siguen proponiendo (como en todo esquema físico de intercambio de clave) diversos tipos de ataques. Afortunadamente, hasta el momento, para los ataques propuestos existen mecanismos de defensa que han demostrado ser efectivos [21], [22].

El principio de funcionamiento del sistema KLJN se basa en mediciones de la media cuadrática del ruido (voltaje y/o corriente) del canal entre *Alice* y *Bob*. Dado que los mismos, cuentan con una ventana de tiempo finita para realizar dichas mediciones en el canal, los resultados de las mismas pueden presentar inexactitudes estadísticas. En consecuencia, se presentan errores en la interpretación de los valores de *bit* en el sistema [30]-[32].

Las probabilidades de los diferentes tipos de error en el sistema KLJN fueron estimadas en [30]-[32]. Se observó que dicha probabilidad de errores de *bits* depende grandemente de ciertos parámetros del sistema, presentados en secciones posteriores. Por ello, con el objetivo de reducir la probabilidad de que estos errores de mediciones ocurran, este trabajo busca desarrollar estrategias de seguridad, basadas en optimización, para encontrar valores óptimos de dichos parámetros que garanticen que la probabilidad de error de bit no sobrepase un límite máximo permitido. Los resultados muestran que al utilizar técnicas de optimización se puede asegurar que los errores se mantengan dentro de un valor aceptable, mientras se asegura una fidelidad razonable en el sistema.

El resto de este artículo está organizado de la siguiente manera. La sección 2 describe el modelo conceptual del sistema de intercambio de clave segura KLJN. La sección 3 presenta la formulación de los problemas de optimización para encontrar los valores óptimos de los parámetros relevantes en el análisis de error. La sección 4 ilustra, a través de simulaciones, la funcionalidad y beneficios de optimizar el sistema de seguridad propuesto. Finalmente, la sección 5 presenta un resumen de los resultados; junto con importantes iniciativas de investigación que se considerarán en el futuro.

2. Sistema de intercambio de clave segura KLJN

A continuación se presenta una descripción del principio de funcionamiento ideal del sistema de intercambio de clave segura KLJN y un resumen del análisis de errores en este esquema.

2.1 Descripción del sistema KLJN

La figura 1 muestra el circuito esquemático del sistema KLJN [4], [6], [16], [17], [21], [22]. Este

circuito no presenta elementos de defensa contra ataques activos (o invasivos, es decir ataques en los que el usuario malicioso modifica intencionalmente el sistema con el objetivo de extraer información [1]), ni contra ataques dirigidos a vulnerabilidades representadas por elementos de construcción no ideales.

El canal de comunicación KLJN es un cable. Ambas partes involucradas en la comunicación, *Alice* y *Bob*, cuentan con un par idéntico de resistores, R_0 y R_1 , en donde $R_0 \neq R_1$ y generalmente $R_1 \gg R_0$. Estos resistores se utilizan para indicar los dígitos binarios de la clave, donde R_0 representa el valor de bit 0 mientras que R_1 representa el valor de bit 1. Los generadores de voltaje ruido Gaussiano $u_{0,A}(t)$, $u_{1,A}(t)$ y $u_{0,B}(t)$, $u_{1,B}(t)$ representan ya sea el ruido de Johnson de los resistores R_0 y R_1 de *Alice* y *Bob*, respectivamente; o generadores externos de ruido blanco con un ancho de banda público, denotado como B_{KLJN} y temperatura efectiva T_{eff} [4], [6], [16], [17], [21], [22].

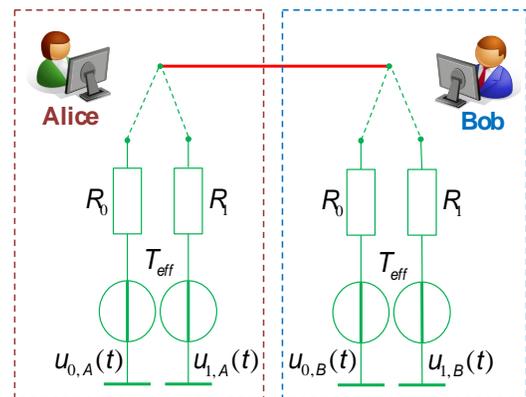


Figura 1. Circuito esquemático del sistema KLJN [4], [6], [16], [17], [21], [22].

Al inicio de cada período de reloj, también denominado período de intercambio de bit, *Alice* y *Bob*, quienes están sincronizados en el tiempo, seleccionan aleatoriamente uno de los dos resistores y lo conectan al cable. La configuración del sistema una vez se seleccionen los resistores se muestra en figura 2. Por lo tanto, existen cuatro posibles situaciones de *bits* en las que estos dos pares de resistores pueden conectarse a la línea de cable: 00, 01, 10 y 11.

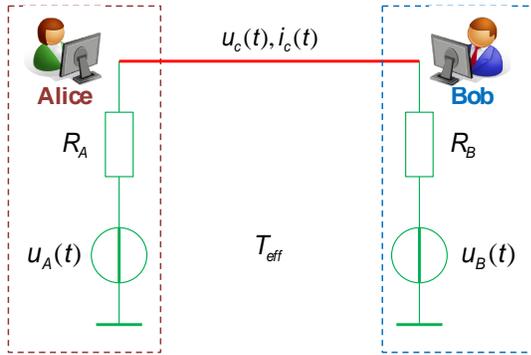


Figura 2. Circuito esquemático del sistema KLJN luego de que *Alice* y *Bob* conectan el resistor seleccionado aleatoriamente [4], [6], [16], [17], [21], [22].

De acuerdo con el teorema de fluctuación-disipación, el voltaje de ruido de Johnson de los resistores de *Alice* y *Bob*, denotados $u_A(t)$ y $u_B(t)$, donde $u_A(t) \in \{u_{0,A}(t), u_{1,A}(t)\}$ y $u_B(t) \in \{u_{0,B}(t), u_{1,B}(t)\}$, generan un voltaje de ruido de canal $u_c(t)$ entre el cable y tierra, y una corriente de ruido en el cable, denotada $i_c(t)$.

Dentro del período de intercambio de bit, *Alice* y *Bob* (y también *Eve*), miden la media cuadrática de las amplitudes de voltaje y/o corriente de ruido, es decir $\langle u_c^2(t) \rangle$ y/o $\langle i_c^2(t) \rangle$. Aplicando la fórmula de Johnson y las leyes de circuito de Kirchhoff, se tiene que los valores teóricos de las medias cuadráticas de las amplitudes de voltaje y corriente de ruido, para un ancho de banda de ruido de canal B_{KLJN} y una temperatura T_{eff} , son [4] [16]:

$$\langle u_c^2(t) \rangle = 4kT_{eff} R_{\parallel} B_{KLJN} \quad (1)$$

y

$$\langle i_c^2(t) \rangle = 4kT_{eff} \frac{1}{R_{loop}} B_{KLJN}, \quad (2)$$

respectivamente [4], [16]. En donde $\langle u_c^2(t) \rangle$ y $\langle i_c^2(t) \rangle$ representan los promedios de tiempo infinito (ideal) del cuadrado del voltaje y corriente de ruido del canal, respectivamente, k es la constante de Boltzman y R_{\parallel} y R_{loop} representan la conexión en paralelo y serie de los resistores seleccionadas aleatoriamente por *Alice* y *Bob*, es decir, $R_{\parallel} = \frac{R_A R_B}{R_A + R_B}$ y $R_{loop} = \frac{1}{\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B}}$, para $R_A, R_B \in \{R_0, R_1\}$.

Es importante mencionar que los valores de R_{\parallel} y R_{loop} pueden ser conocidos públicamente al medir la media cuadrática del voltaje y/o corriente de ruido del canal y compararlos con los valores teóricos de ecuaciones (1) y (2) [16]. Debido a que tanto *Alice* como *Bob* conocen cuáles de sus resistores han sido conectados al canal, las resistencias R_{\parallel} y R_{loop} les permite deducir el valor de la resistencia (y por ende el valor de bit) al otro lado del cable [16].

Aquellos casos en que tanto *Alice* como *Bob* seleccionan los mismos resistores, es decir los casos de bit 00 y 11, representan un intercambio inseguro de bit. Esto es porque en estos casos *Eve* sería capaz de deducir los valores de los resistores y su ubicación y por ende el valor del bit, debido a que R_{\parallel} y/o R_{loop} sería el máximo o mínimo de sus tres posibles valores de magnitud. En contraste, los casos cuando ambas partes seleccionan aleatoriamente resistores diferentes, es decir, las situaciones de bit 10 y 01, son considerados como eventos de intercambio seguro de bit porque de acuerdo con la segunda ley de termodinámica [6], [16]-[20], las mediciones de las medias cuadráticas no les permiten a *Eve* determinar los valores y ubicaciones de los resistores.

Es importante notar que al final de un intercambio seguro de bit, *Alice* y *Bob* terminan con valores de *bits* opuestos. Debido a que en los sistemas de cifrado simétrico ambas partes deben tener la misma clave, *Alice* y *Bob* deben acordar previamente (antes de iniciar el intercambio) quién de los dos invertirá su bit, para así contar con la misma secuencia de *bits* en ambos lados. Además, en promedio, el 50% de los *bits* se mantiene porque son seguros y el otro 50% son descartados por el sistema por ser inseguros [16].

La siguiente sección presenta el análisis de error de *bits* presentado en [30]-[32] y sus respectivas expresiones matemáticas.

2.2 Errores de dígitos binarios en el sistema KLJN

El principio de funcionamiento del sistema KLJN se basa en mediciones de media cuadrática del ruido (voltaje y/o corriente) del canal. *Alice* y *Bob* (y también *Eve*) cuentan con una ventana de tiempo finita para realizar dichas mediciones. Esta ventana, conocida como el período de intercambio de bit, es denotada como $\tau = \frac{1}{f_B}$, donde $f_B \ll B_{KLJN}$, es la frecuencia de

intercambio de bit. Debido a esto, los resultados de las mediciones de las amplitudes de ruido de canal presentan inexactitudes estadísticas, ya que si el tiempo disponible para Alice y Bob no es lo suficientemente grande como para obtener estadísticas suficientemente buenas, los mismos no pueden distinguir entre los diferentes niveles de magnitud de la media cuadrática de ruido del canal. En consecuencia, se presentan errores en la interpretación de los valores de bit en el sistema [30]. Dichos errores pueden llegar a ser significativos, especialmente cuando se utilizan algoritmos de amplificación de privacidad (PA, privacy amplification) [25], ya que estos tienden a amplificar los errores.

El proceso de medición de la media cuadrática del ruido del canal y la interpretación de *bits* ha sido minuciosamente descrito en la literatura [47]-[49]. Por simplicidad, se procederá a mostrar el proceso para estimar los errores de dígitos binarios cuando el sistema solo mide el voltaje ruido del canal. Un procedimiento similar se puede seguir para el caso de mediciones de corriente.

La figura 3 ilustra los tres posibles niveles de la media cuadrática del voltaje de ruido del canal para las situaciones 00, 01/10 y 11.

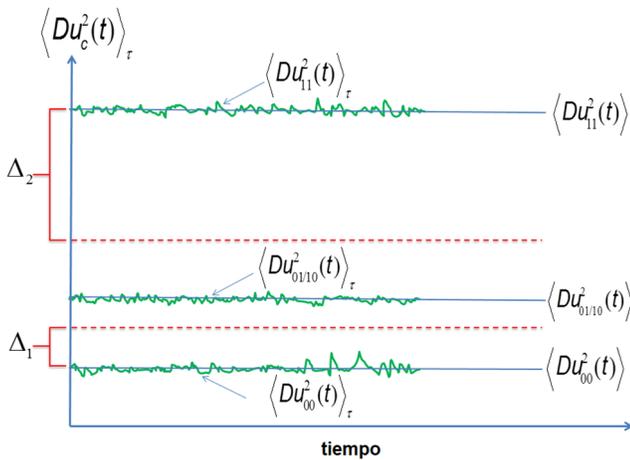


Figura 3. Posibles niveles de la media cuadrática del voltaje de ruido del canal (escala arbitraria).

Los valores $\langle Du_{11}^2(t) \rangle_\tau$, $\langle Du_{10/01}^2(t) \rangle_\tau$ y $\langle Du_{00}^2(t) \rangle_\tau$ representan las medias cuadráticas para las situaciones 11, 10/01 y 00, respectivamente. Las líneas sólidas representan las mediciones cuando se cuenta con un tiempo infinito (ideal). Por simplicidad, $R_0 = \alpha R_1$ para $\alpha \gg 1$. Figura modificada de la versión original, traducida al español [30].

Cabe resaltar que la medición final de la media cuadrática del voltaje de ruido del canal está dada por:

$$\langle Du_c^2(t) \rangle_\tau = \langle Du_c^2(t) \rangle + \mu_\tau(t), \quad \text{donde}$$

$$\langle Du_c^2(t) \rangle \in \left\{ \langle Du_{11}^2(t) \rangle, \langle Du_{10/01}^2(t) \rangle, \langle Du_{00}^2(t) \rangle \right\}$$

representa la componente DC, es decir, los valores exactos (ideales) de las medias cuadráticas cuando se cuenta con una ventana de tiempo medición τ infinita ,

$$D = \frac{1}{1 \text{ Voltio}}$$

es el coeficiente de transferencia del dispositivo multiplicador hipotético para proporcionar una unidad de Voltio también para el cuadrado del valor del voltaje de ruido [33], y $\mu_\tau(t)$ representa la componente AC generada al obtener el valor medio en un tiempo finito y que está ilustrada por las fluctuaciones (aleatorias) alrededor del valor DC (Ver figura 3).

Con muy poca probabilidad, las fluctuaciones (Gaussianas con alta precisión [33]) de los valores promedio medidos, podrían cruzar de un nivel a otro y producir una interpretación de bit errónea por parte de *Alice* y *Bob*, causando así un error de bit. Por tal motivo, en [30] se definieron valores umbrales Δ_1 y Δ_2 (Ver figura 3) para determinar los límites entre los diferentes niveles para la interpretación de las magnitudes de la media cuadrática de voltaje de ruido de canal durante el tiempo τ . Dichos umbrales fueron definidos, para fines de normalización, como una fracción de la componente DC de la media cuadrática del voltaje de ruido de canal medido, es decir [30]:

$$\Delta_1 = \beta \langle Du_{00}^2(t) \rangle \text{ para } 0 < \beta < 1 \quad (3)$$

y

$$\Delta_2 = \delta \langle Du_{11}^2(t) \rangle \text{ para } 0 < \delta < 1.$$

(4)

Las interpretaciones de las mediciones de las medias cuadráticas del voltaje de ruido del canal son: [30]

- 00, para $\langle Du_c^2(t) \rangle_\tau < \langle Du_{00}^2(t) \rangle + \Delta_1$,
- 11, para $\langle Du_c^2(t) \rangle_\tau > \langle Du_{11}^2(t) \rangle - \Delta_2$, y
- 10/01, para $\langle Du_{00}^2(t) \rangle + \Delta_1 \leq \langle Du_c^2(t) \rangle_\tau \leq \langle Du_{11}^2(t) \rangle - \Delta_2$.

La tabla 1 resume los diferentes tipos de errores de interpretación de mediciones que podrían ocurrir en el sistema KLJN debido a imprecisiones estadísticas [30].

De acuerdo la tabla 1, los errores en los que la decisión final del sistema es una situación de *bit* no

segura (00 y 11) son autocorregidos por el sistema, ya que el mismo descarta todas las situaciones que comprometen información acerca de la clave. Por lo tanto, solo los casos cuando las situaciones de bit actuales 00 y 11 son interpretados erróneamente como la situación de bit segura 01/10, son de interés [30].

Para estimar las probabilidades de los diferentes tipos de error en el sistema KLJN, en [30] se utilizó la fórmula de Rice [34], [35], la cual calcula el número promedio de cruces por un nivel fijo por un proceso estocástico en un intervalo de tiempo.

Tabla 1. Tipos de errores en el sistema KLJN [30]* (Traducida al español)

		Situación Actual		
		00	11	01/10
Interpretación de la Medición	00	Correcto (sin error)	Error, removido (automáticamente)	Error, removido (automáticamente)
	11	Error, removido (automáticamente)	Correcto (sin error)	Error, removido (automáticamente)
	01/10	Error (probabilidad?)	Error (probabilidad?)	Correcto (sin error)

indica un error independiente. Por lo tanto, una buena estimación de las probabilidades de error en este límite de error, es el producto del promedio de la frecuencia de cruces de los umbrales Δ_1 y Δ_2 , y el tiempo τ [36], [37].

Las probabilidades $\varepsilon_{u,00}$ y $\varepsilon_{u,11}$, que denotan los errores cuando las situaciones 00 y 11 se interpretan como la situación 01/10, en el modo de medición de voltaje de ruido, para $\varepsilon_{u,00}, \varepsilon_{u,11} \ll 1$, están dados por, respectivamente [30]:

$$\varepsilon_{u,00} \approx \frac{1}{\sqrt{3}} \exp\left(-\frac{\beta^2}{4} \gamma\right) \quad (5)$$

y

$$\varepsilon_{u,11} \approx \frac{1}{\sqrt{3}} \exp\left(-\frac{\delta^2}{4} \gamma\right), \quad (6)$$

donde
$$\gamma = \frac{B_{KLJN}}{f_B} = B_{KLJN} \tau.$$

A pesar de que estas fórmulas capturan la influencia de los valores de umbral en los errores de *bit*, la única información que conocemos sobre estos valores de umbral es que fueron definidos como una fracción de la componente DC de la media cuadrática del voltaje de

Las fórmulas analíticas de las probabilidades de error en el sistema KLJN cuando se mide voltaje de ruido del canal, fueron estimadas con la probabilidad de que las componentes AC, $\mu_\tau(t)$, crucen los umbrales especificados para cada tipo de error, durante el tiempo τ . La estimación de la probabilidad de error se basa en el hecho de que, en el límite de error pequeño, la probabilidad de tener repetidos cruces de umbral dentro del tiempo de correlación del ruido de banda limitada converge a cero. Además, como el tiempo de correlación de $\mu_\tau(t)$ es igual a τ , cada cruce de umbral (en una dirección fija elegida)

ruido del canal. Por lo tanto, uno de los objetivos de este artículo es desarrollar una estrategia basada en optimización para encontrar los valores de umbral óptimos para la interpretación de los *bits* de la clave en el sistema KLJN, mientras se limita la probabilidad de error de bit permitida.

Además, las expresiones de probabilidad de error muestran una dependencia exponencial de la duración del periodo de intercambio de *bits* (es decir, la ventana de tiempo disponible para realizar estadística), como se muestra en las ecuaciones (5) - (6). Es decir, cuanto más tiempo *Alice* y *Bob* tienen que hacer estadísticas, mayor es la fidelidad del sistema KLJN. Desafortunadamente, aumentar el período de intercambio de bits también significa aumentar la tasa de conjetura de bits exitosa de *Eve*. Esto se debe a que, para situaciones prácticas, los ataques pasivos exitosos de *Eve* están restringidos por la duración del período de intercambio de *bits*. Por lo tanto, en este trabajo también se propone un enfoque basado en técnicas de optimización para encontrar el valor óptimo de la ventana de tiempo de medición que garantiza la probabilidad de error de *bit* para una fidelidad fija del sistema KLJN y un ancho de banda de ruido fijo. De esta manera, se asegura no solo una fidelidad del sistema razonablemente buena, sino que también debilitará las estadísticas de *Eve* al restringir la duración del período de intercambio de *bits*.

3. Formulación del problema

En esta sección, se describe la formulación de los problemas para la optimización de los valores de umbral y de la ventana de tiempo de medición para garantizar que la probabilidad de error de *bit* permanezca dentro de cierto límite aceptable. Por simplicidad, el análisis se hará para la probabilidad de error $\varepsilon_{u,00}$, es decir para los errores cuando la situación 00 se interpreta como la situación 01/10 en el modo de medición de voltaje de ruido. Sin embargo, una formulación similar se puede realizar para la probabilidad $\varepsilon_{u,11}$ y también para los errores en el modo de medición de corriente de ruido.

3.1 Optimización de los valores de umbral para interpretación de los *bits* de la clave en el sistema KLJN

La idea es obtener el valor de umbral óptimo que garantice que la probabilidad de error de *bit* permanezca por debajo del valor máximo de error permitido. Este valor óptimo de umbral, puede ser visto como el valor mínimo necesitado de β para el diseño de un sistema KLJN que asegure cierto valor de probabilidad de error de bit. La solución de este problema está dada por $\beta_{\text{inf}} \leq \beta < 1$, en donde β_{inf} representa el valor óptimo de umbral.

El problema de optimizar los valores de umbral para maximizar el error de probabilidad está formulado como:

$$\max_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} \exp\left(\frac{-\beta^2 \gamma}{4}\right) \quad (7)$$

sujeto a

$$\frac{1}{\sqrt{3}} \exp\left(\frac{-\beta^2 \gamma}{4}\right) \leq \varepsilon_{\text{sup}} \quad (7.1)$$

$$0 < \beta < 1, \quad (7.2)$$

donde ε_{sup} representa el valor máximo de error permitido por el diseñador del sistema de antemano, (7.1) garantiza que la probabilidad de error no sobrepase el nivel máximo estipulado y (7.2) define el rango para los valores de umbral.

El problema (7) puede ser fácilmente resuelto utilizando distintas herramientas de optimización [38].

3.2 Optimización del valor de la ventana de tiempo de medición que garantiza la probabilidad mínima de error de *bit*

El objetivo es desarrollar una estrategia de seguridad basada en optimización que obtenga el valor óptimo de ventana de tiempo de medición τ para asegurar que la probabilidad de error de *bits* permanezca dentro del límite deseado para un sistema KLJN con fidelidad fija y ancho de banda de ruido fijo. De esta forma, no solo se asegura una fidelidad aceptable del sistema, sino que también se debilita las estadísticas de Eve al restringir la duración del período de intercambio de *bits*.

Este valor óptimo de τ puede ser visto como el valor mínimo requerido para garantizar cierto nivel de probabilidad de error de *bit* en el sistema. La solución de este problema está dada por $\tau_{\text{inf}} \leq \tau \leq 50\tau_{BKLJN}$, en donde τ_{inf} representa el valor óptimo de τ .

$$\min_{\tau} = \frac{1}{\sqrt{3}} \exp\left(\frac{-\beta^2 B_{KLJN} \tau}{4}\right) \quad (9)$$

sujeto a

$$\frac{1}{\sqrt{3}} \exp\left(\frac{-\beta^2 B_{KLJN} \tau}{4}\right) \leq \varepsilon_{\text{sup}}, \quad (9.1)$$

$$0 < \tau \leq 50\tau_{BKLJN}, \quad (9.2)$$

donde la definición de γ fue utilizada, específicamente

$$\gamma = \frac{B_{KLJN}}{f_B} = B_{KLJN} \tau, \quad \varepsilon_{\text{sup}} \text{ representa el valor máximo}$$

de error permitido por el diseñador del sistema, τ_{BKLJN} representa el tiempo de correlación del ruido, definido

como $\tau_{BKLJN} \approx \frac{1}{B_{KLJN}}$, y el límite superior de τ fue

elegido en base a las demostraciones experimentales presentadas en [5], en donde estadísticas de ruido de alta fidelidad fueron alcanzados cuando $\tau = 50\tau_{BKLJN}$.

También, (7.1) garantiza que la probabilidad de error no sobrepase el nivel máximo estipulado y (7.2) define el rango para τ .

Observe que el problema (9) también puede ser resultado fácilmente utilizando herramientas de optimización similares.

4. Resultado Numéricos y Simulaciones

A continuación, se presentan los resultados numéricos y simulaciones para los problemas de optimización de los valores de umbral utilizados en la interpretación de *bits* y la ventana de tiempo de medición para garantizar que la probabilidad de error de bit permanezca dentro de cierto valor aceptable.

4.1 Optimización de los valores de umbral para la interpretación de los bits de la clave en el sistema KLJN

Para este caso, se consideró el siguiente escenario: $\epsilon_{sup} = 0.025$, $0 < \beta < 0.7$, $B_{KLJN} = 1000 Hz$, $\gamma = [50 \ 100 \ 150 \ 200 \ 250]$, en donde el rango de los valores de β fue calculado para valores concretos de R_0 y R_1 , específicamente $R_0 = 2kOhm$ y $R_1 = 11kOhm$, tal como se utilizaron en [5]. Esto es porque por razones obvias (el sistema se quedaría sin bits seguros), β no puede aproximarse a 1.

En tabla 2 se muestran los valores óptimos obtenidos del umbral β_{inf} cuando el valor de γ varía. Estos resultados fueron obtenidos utilizando la fórmula para el valor óptimo del umbral β_{inf} en (8). Esto también puede ser observado en la figura 4.

Nótese que este problema obtiene el valor mínimo de β_{inf} (representado con “*” en figura 4) que garantiza $\epsilon_{u,00} \leq \epsilon_{sup}$ para diferentes valores de γ .

Tabla 2. Valores óptimos de β_{inf} que garantizan $\epsilon_{u,00} \leq \epsilon_{sup}$ para diferentes valores de γ

γ	β_{inf}
50	0.2241
100	0.2506
150	0.2893
200	0.3544
250	0.5012

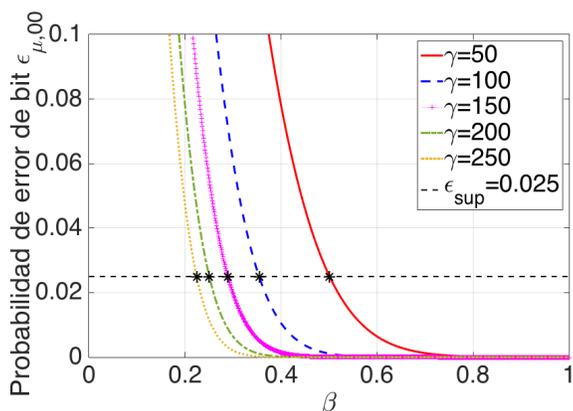


Figura 4. Valores mínimos de β que garantizan $\epsilon_{u,00} \leq \epsilon_{sup}$ para diferentes valores de γ .

Además, se puede observar que los valores de β dependen grandemente del valor de probabilidad de

error $\epsilon_{u,00}$ deseado. La figura 5 muestra los valores de β necesarios para garantizar cierto valor de $\epsilon_{u,00}$

cuando $\tau = \frac{50}{B_{KLJN}}$. Se puede observar que los valores

de $\epsilon_{u,00}$ incrementan a medida que los valores de β decrecen, lo cual es esperado ya que se necesita un valor alto de β para obtener un valor bajo de $\epsilon_{u,00}$. También, se observa que esta estrategia de seguridad garantiza una probabilidad de error de bit no mayor a 0.57 bajo ciertas asunciones.

Este resultado puede ser de gran importancia al momento de diseñar estrategias de seguridad para garantizar cierto nivel de error en escenarios complejos.

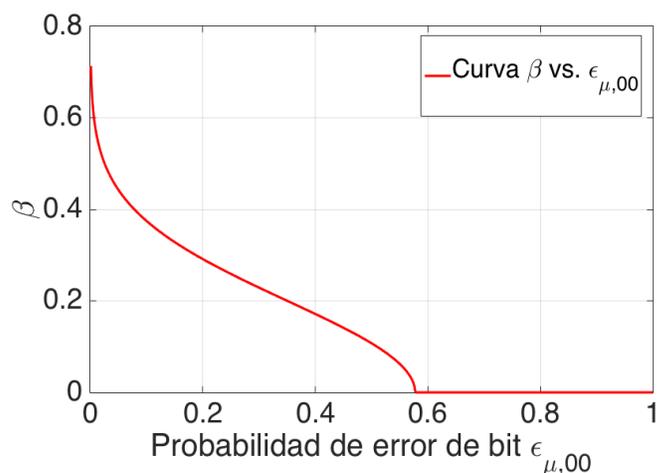


Figura 5. Valores de β necesarios para garantizar cierto valor de $\epsilon_{u,00}$ cuando $\tau = \frac{50}{B_{KLJN}}$.

4.2 Optimización del valor óptimo de la ventana de tiempo de medición que garantiza la probabilidad mínima de error de bit

Para este caso, se consideró el siguiente escenario:

$\epsilon_{sup} = 0.025$, $0 < \tau < \frac{50}{B_{KLJN}}$, $B_{KLJN} = 1000 Hz$,

$\beta = [0.50 \ 0.55 \ 0.60 \ 0.65 \ 0.70]$. Para este escenario, cualquier valor de β menor a 0.50 provee siempre una probabilidad de error de bit mayor a ϵ_{sup} para todos los valores de τ .

Tabla 3 muestra los valores óptimos obtenidos del periodo de intercambio de bits τ_{inf} cuando el valor de β varía. Estos resultados fueron obtenidos utilizando la

fórmula para el valor óptimo del período de intercambio de *bits* τ_{inf} en (10).

Tabla 3. Valores óptimos de τ_{inf} que garantizan $\varepsilon_{u,00} \leq \varepsilon_{\text{sup}}$ para diferentes valores de β .

β	τ_{inf} (s)
0.50	0.0500
0.55	0.0413
0.60	0.0347
0.65	0.0296
0.70	0.0255

Los resultados mostrados en tabla 3 y figura 6, demuestran el beneficio de diseñar e implementar estrategias de optimización que obtienen el valor mínimo de τ_{inf} (representado con “*” en figura 6) que garantiza $\varepsilon_{u,00} \leq \varepsilon_{\text{sup}}$ para diferentes valores de β . Este modelo, además de garantizar un nivel de probabilidad de error deseado, también permite manejar eficientemente los recursos del sistema al utilizar el valor óptimo del período de intercambio de *bits*, el cual es inversamente proporcional a la tasa de muestreo utilizado.

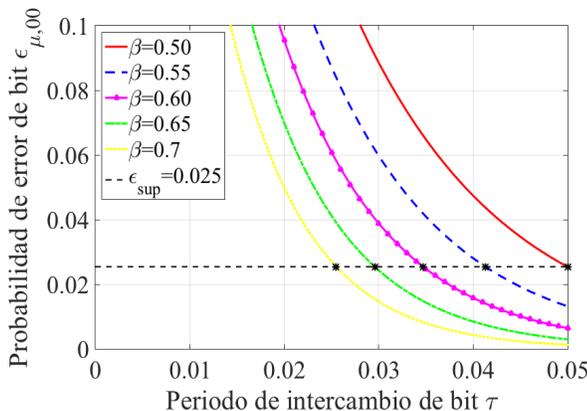


Figura 6. Valores óptimos de τ_{inf} que garantizan $\varepsilon_{u,00} \leq \varepsilon_{\text{sup}}$ para diferentes valores de β .

Es imprescindible mencionar que la seguridad en sistemas de comunicación cableada utilizando el intercambio de clave segura KLJN es un tema considerablemente nuevo, el cual solo ha sido estudiado matemáticamente y empíricamente en laboratorios [16]-[20]. El presente trabajo utiliza los resultados específicos del análisis de errores en el sistema KLJN presentado en [31]-[32], y se aplica optimización a ese modelo específico. Lamentablemente, al ser la primera

vez que se le aplican técnicas de optimización a este modelo de análisis de error para este sistema, no es posible encontrar otros resultados para evaluar y comparar. Sin embargo, el plan a futuro es utilizar otros modelos de optimización con el fin de mejorar el rendimiento del propuesto en este artículo.

5. Conclusiones

En este estudio se presentó un nuevo enfoque para optimizar el sistema de intercambio de clave segura KLJN, con el fin de garantizar que la probabilidad de error de *bits* permanezca siempre dentro del límite permitido. La estrategia de optimización propuesta se enfoca principalmente en controlar óptimamente el umbral para la interpretación de los *bits* de la clave y la ventana de tiempo para realizar el intercambio de dichos *bits*, ya que se ha demostrado que los errores estadísticos dependen principalmente de estos parámetros. Además de esto, el problema de optimización consta de restricciones que permiten garantizar que la probabilidad de error de *bits* no podrá sobrepasar el valor deseado establecido de antemano por el diseñador.

Los resultados numéricos mostraron que las estrategias de optimización propuestas para optimizar el sistema de intercambio de clave segura KLJN, no sólo garantizan que los errores no sobrepasen el límite de error máximo fijo permitido, sino que también permite manejar eficientemente los recursos del sistema al utilizar valores óptimos de los parámetros importantes en el análisis de error. Adicionalmente, se puede concluir que estas estrategias no solo aseguran una fidelidad del sistema razonablemente buena, sino que también debilitan las estadísticas de *Eve* al restringir la duración del período de intercambio de *bits*.

Este trabajo se enfoca principalmente en analizar la probabilidad de error entre *Alice* y *Bob* y no considera la probabilidad de error de *Eve*. En este sentido, estrategias para optimizar el sistema de intercambio de clave segura KLJN que garanticen también que la probabilidad de error de *Eve* siempre permanezca por encima de un valor deseado podría considerarse una extensión importante de este estudio.

6. Contribución de los Autores

Los autores declaran haber contribuido por igual en la escritura, simulación y análisis de datos de este artículo.

7. Referencias

- [1] Y. Liang, H. V. Poor, and S. Shamai. "Information Theoretic Security." *Foundations and Trends in Communications and Information Theory* 5, pp.355–580, Jun. 2008.
- [2] W. Ford. *Computer Communications Security: Principles, Standard Protocols and Techniques*. Prentice-Hall, Inc, 1994.
- [3] D. Stinson. *Cryptography: Theory and Practice*. CRC press, 2005.
- [4] R. Mingesz, L.B. Kish, Z. Gingl, C.G. Granqvist, H. Wen, F. Peper, T. Eubanks, and G. Schmera. "Unconditional Security by the Laws of Classical Physics." *Metrology and Measurement Systems* 20.1, pp.3–16, Mar. 2013.
- [5] R. Mingesz, L. B. Kish, Z. Gingl, C.G. Granqvist, H. Wen, F. Peper, T. Eubanks, and G. Schmera. "Information Theoretic Security by the Laws of Classical Physics." *Soft Computing Applications: Proceedings of the 5th International Workshop Soft Computing Applications (SOFA)*, Springer Berlin-Heidelberg, pp. 11–25, 2013.
- [6] L. B. Kish, D. Abbott, and C. G. Granqvist. "Critical Analysis of the Bennett-Riedel Attack on Secure Cryptographic Key Distributions via the Kirchhoff-Law-Johnson-Noise Scheme." *PLoS ONE* 8.12, e81810, Dec. 2013.
- [7] E. Gonzalez, L. B. Kish, and R. S. Balog. "Information Theoretically Secure, Enhanced Johnson Noise based Key Distribution over the Smart Grid with Switched Filters." *PLoS ONE* 8, e70206, 2013.
- [8] C. H. Bennett, G. Brassard, S. Breidbart, and S. Wiesner. "Quantum Cryptography, or Unforgeable Subway Tokens." *Advances in Cryptology: Advances in Cryptology*, Plenum Press, pp. 267–275, 1982.
- [9] H. P. Yuen. "On the Foundations of Quantum Key Distribution- Reply to Renner and Beyond." Manuscript: arXiv:1210.2804, Oct. 2012.
- [10] H. P. Yuen. "Unconditional Security in Quantum Key Distributions." Manuscript: arXiv:1205.5065v2, May 2012.
- [11] O. Hirota. "Incompleteness and Limit of Quantum Key Distribution Theory." Manuscript: arXiv:1208.2106v2, Aug. 2012.
- [12] R. Renner. "Reply to Recent Scepticism about the Foundations of Quantum Cryptography." Manuscript: arXiv:1209.2423v.1, Sept. 2012.
- [13] H. P. Yuen. "Security Significance of the Trace Distance Criterion in Quantum Key Distribution." Manuscript: arXiv:1109.2675v3, Sept. 2012.
- [14] H. P. Yuen. "Key Generation: Foundation and a New Quantum Approach." *IEEE Journal Selected Topics in Quantum Electronics* 15 pp.1630–1645, Nov. 2009.
- [15] H. Salih, Z. H. Li, M. Al-Amri, and H. Zubairy. "Protocol for Direct Counterfactual Quantum Communication." *Physical review letters* 110.17 p.170502, Apr. 2013.
- [16] L. B. Kish. "Totally Secure Classical Communication Utilizing Johnson (-like) Noise and Kirchhoff's Law." *Physics Letters A* 352.3, pp.178–182, Mar. 2006.
- [17] R. Mingesz, Z. Gingl, and L. B. Kish. "Johnson (-like)-Noise-Kirchhoff-Loop Based Secure Classical Communicator Characteristics, for Ranges of Two to Two Thousand Kilometers, Via Model-Line." *Physics Letters A* 372.7, pp.978–984, Feb. 2008.
- [18] L. B. Kish and T. Horvath. "Notes on Recent Approaches Concerning the Kirchhoff-Law-Johnson-Noise-Based Secure Key Exchange." *Physics Letters A* 373.32, pp.901–904, Aug. 2009.
- [19] L. B. Kish and C. G. Granqvist. "On the Security of the Kirchhoff-Law-Johnson-Noise (KLJN) Communicator." *Quantum Information Processing* 13.10, pp.2213–2219, Oct. 2014.
- [20] D. Abbott and G. Schmera. "Secure Communications Using the KLJN Scheme." *Scholarpedia* 8.8, p.31157, Aug. 2013.
- [21] L. B. Kish. "Protection Against the Man in the Middle attack for the Kirchhoff-Loop Johnson(-like)-Noise Cipher and Expansion by Voltage-Based Security." *Fluctuation and Noise Letters* 6.01, pp.L57-L63, Mar. 2005.
- [22] L. B. Kish. "Enhanced Secure Key Exchange Systems Based on the Johnson-Noise Scheme." *Metrology and Measurement Systems* 20.2 pp. 191-204, Jun. 2013.
- [23] L. B. Kish and C. G. Granqvist. "On the Security of the Kirchhoff-Law-Johnson-Noise (KLJN) Communicator." *Quantum Information Processing*, 13.10, pp.2213–2219, Oct. 2014.
- [24] L. B. Kish. "Enhanced Usage of Keys Obtained by Physical, Unconditionally Secure Distributions." Manuscript: <http://arxiv.org/abs/1408.5800>, 2014.
- [25] T. Horvath, L.B. Kish, and J. Scheuer. "Effective Privacy Amplification for Secure Classical Communications." *Europhysics Letters (EPL)* 94.2, p.28002, Apr. 2011.
- [26] Y. Saez, X. Cao, L. B. Kish, and G. Pesti. "Securing Vehicle Communication Systems by the KLJN Key Exchange Protocol." *Fluctuation and Noise Letters* 13, p.1450020, Sep. 2014.
- [27] X. Cao, Y. Saez, L. B. Kish, and G. Pesti. "On KLJN-Based Secure Key Distribution in Vehicular Communication Networks." *Fluctuation and Noise Letters* 14, p.1550008, Mar. 2015.
- [28] L. B. Kish and R. Mingesz. "Totally Secure Classical Networks with Multipoint Telecloning (Teleportation) of Classical Bits Through Loops with Johnson-Like Noise." *Fluctuation and Noise Letters* 6.02, pp.C9–C21, Jun. 2006.
- [29] L. B. Kish and O. Saidi. "Unconditionally Secure Computers, Algorithms and Hardware, such as Memories, Processors, Keyboards, Flash and Hard Drives." *Fluctuation and Noise Letters* 8.02, pp.L95-L98, Jun. 2008.
- [30] Y. Saez and L. B. Kish. "Errors and their Mitigation at the Kirchhoff-Law-Johnson-Noise Secure Key Exchange." *PLoS ONE* 8.11, p.e81103, Nov. 2013.
- [31] Y. Saez, L. B. Kish, R. Mingesz, Z. Gingl, and C. G. Granqvist. "Current and Voltage Based Bit Errors and their Combined Mitigation for the Kirchhoff-Law-Johnson-Noise Secure Key Exchange." *Journal of Computational Electronics* 13.1, pp.271–277, Mar. 2014.
- [32] Y. Saez, L. B. Kish, R. Mingesz, Z. Gingl, and C. G. Granqvist. "Bit Errors in the Kirchhoff-Law-Johnson-Noise Secure Key Exchange." *International Journal of Modern Physics Conference Series* 33, p.1460367, 2014.
- [33] L. B. Kish, R. Mingesz, Z. Gingl, and C. G. Granqvist. "Spectra for the Product of Gaussian Noises." *Metrology and Measurement Systems*, 19(4), pp.653–658, 2012.
- [34] S. O. Rice. "Mathematical Analysis of Random Noise." *Bell Labs Technical Journal* 23.3, pp.282–332, 1944.
- [35] I. Rychlik. "On Some Reliability Applications of Rice's Formula for the Intensity of Level Crossings." *Extremes* 3.4, pp.331–348, Dec. 2000.

- [36] L. B. Kish. "End of Moore's Law; Thermal (Noise) Death of Integration in Micro and Nano Electronics." *Physics Letters A* 305.3, pp.144–149, Dec. 2002.
- [37] L. B. Kish and C. G. Granqvist. "Electrical Maxwell Demon and Szilard Engine Utilizing Johnson Noise, Measurement, Logic and Control." *PLoS ONE* 7, p.e46800, 2012.
- [38] S. Boyd and L. Vandenberghe. *Convex optimization*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK: Cambridge University.

Delitos a través redes sociales en el Ecuador: una aproximación a su estudio

Crimes through social networking sites in Ecuador: an approach to their study

Luis Jara Obregón^{1*}, Enrique Ferruzola Gomez², Guillermo Rodríguez López³

¹ Catedrático de la Carrera de Ingeniería de Sistema, Universidad Católica de Cuenca, ² Escuela de Computación e Informática en Computación, Universidad Agraria del Ecuador, ³ Catedrático de la Carrera de Ingeniería de Sistemas, Universidad Católica de Cuenca

¹ Lsjaraob@ucacue.edu.ec, ² Eferruzola@uagraria.edu.ec, ³ mgrodriguezl@ucacue.edu.ec

Resumen– El presente trabajo muestra la conceptualización de los principales delitos, que se comenten comúnmente usando como medio las redes sociales. Se reunió información como métodos y técnicas que usan los delincuentes o denominados ciberdelincuentes en la internet para acercarse a sus víctimas y crear un ambiente propicio para lograr su cometido. Así, principalmente, se investigó el marco jurídico para hacer frente a estas prácticas delicias, que si bien son consideradas prácticas comunes actualmente se realizan, aprovechando el acceso de información que ofrecen redes sociales como Facebook, en la cual se enfoca nuestro estudio por ser considerada la red social con mayor número de usuario activo. Posterior a esto se consultó el nuevo código integral penal del Ecuador, para verificar la existencia de un marco legal que penalice este tipo de comportamientos antijurídicos en las redes sociales. Se realizó la observación de los diferentes sitios web de las fuerzas del orden del país, con el fin del obtener información que aporte al desarrollo del presente estudio, se emplearon técnicas como la entrevista y encuesta, las cuales fueron aplicadas a los agente fiscales y elementos de la Policía Judicial para determinar cuáles son los procesos actuales que se siguen en la investigación de este tipo de delitos, obteniendo resultados que se contraponen a la realidad con muy pocas instrucciones fiscales y procesos referentes a este tema en estudio.

Palabras claves– Delitos informáticos, medios telemáticos, redes sociales, procesos de investigación.

Abstract– The present work shows the conceptualization of the main crimes, which are commonly commented on as means of social networking sites. It gathered information such as methods and techniques used by criminals or so-called cybercriminals on the internet to approach their victims and create an environment conducive to achieving their mission. So, mainly, we investigated the legal framework to deal with these practical delights, which are considered common practices are currently carried out, taking advantage of the access of information offered by social networks such as Facebook, which focuses our study for being considered The social networking sites with the largest number of active users, after which the new integral penalty code of Ecuador was consulted, to verify the existence of a legal framework that penalizes this type of anti-legal behaviors in social networking sites. The observation of the different websites of law enforcement agencies was carried out in order to obtain information that contributed to the development of the present study. Techniques such as the interview and survey were used, which were applied to the fiscal agents and elements Of the Judicial Police to determine what are the current processes that are followed in the investigation of this type of crimes, obtaining results that are opposed to reality with very few tax instructions and processes regarding this subject under study.

Keywords– Cybercrime, electronic media, social networking sites, research processes.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 4 de mayo de 2017

Fecha de Aceptación: 25 de septiembre de 2017

1. Introducción

Actualmente las relaciones sociales han innovado con la aplicación de las tecnologías de información y

comunicación. Existen un gran número de redes sociales de acceso libre en internet, donde cualquier cibernauta puede crear una cuenta, configurar un perfil

con información personal auténtica o ficticia y acceder a un mundo de comunicaciones e interacciones con amigos, familiares, compañeros o simplemente relacionarse con usuarios completamente desconocidos que cuente con un perfil dentro de una red social como Facebook, convirtiéndose sin lugar a dudas en el instrumento favorito para el contacto e intercambio de experiencias.

La principal ventaja de estas redes sociales es la comunicación, la publicación de contenidos gratuitos como: fotos, videos, estados, música entre otros. Sin embargo, a pesar de la importancia y el papel que desempeñan estas redes sociales como medios de comunicación y difusión, en muchas ocasiones la libertad de publicar cualquier tipo de contenido (datos) escrito y/o audiovisual, está ocasionando que colisionen la libertad de expresión con el derecho del honor y privacidad consagrados en la Constitución del Estado Ecuatoriano.

El usuario como actor más vulnerable en este entorno, puede no conocer de los artículos de ley integrados en el código integral penal del Ecuador, publicado el 10 de agosto del año 2014. Que no tipifican explícitamente los delitos cometidos a través de redes sociales pero sí hacen referencia a delitos relacionados con medios telemáticos como son: el *phishing*, robo de identidad, las injurias, las calumnias, la extorsión, el acoso, la publicación de pornografía, la pedofilia, el *grooming*, difusión de *malware*, trata de blancas, sicariato, *happy slapping*, la estafa.

Estos delitos mencionados anteriormente son comunes pero su *modus operandi*, ha cambiado con el uso de medios telemáticos para sus operaciones, cuyo proceso en ocasiones no tiene la tecnología como fin.

Un importante medio de operación para estas prácticas delictivas son las redes sociales, de acuerdo con el INEC (Instituto Nacional de Estadísticas y censos del Ecuador), alrededor del 98% de las personas mayores de 12 años tienen una cuenta en Facebook en el Ecuador. No obstante, con el crecimiento de usuarios en redes sociales, la presencia de los cibercrimes también ha cobrado fuerza.

Según informes de la Policía, las bandas utilizan los datos de las víctimas para perpetrar delitos, como la extorsión. Pero hay casos más extremos como el secuestro. Además, hay otros delitos reportados en el país como trata de personas, pornografía infantil y acoso

sexual. Este tipo de delitos generalmente quedan en la impunidad por la volatilidad de la información, la globalización del internet y el anonimato.

La falta de procesos claros y el desconocimiento por parte del usuario sobre el marco legal existente, para penalizar este tipo de prácticas antijurídicas, crean dificultad para identificar a los autores materiales e intelectuales del hecho, siendo este, uno de los principales problemas al emprender investigaciones de delitos realizados por medios telemáticos en el Ecuador.

La presente investigación buscó establecer los principales delitos cometidos a través de una red social como Facebook en el Ecuador, para describir los métodos o técnicas utilizados por los cibercriminales y de que manera el marco legal influye en la identificación del autor material e intelectual, esclarecimiento del hecho, y aportar con conocimiento para su investigación.

2. Conceptualización

En cada país se usan definiciones distintas sobre el tema de delitos informáticos, sin embargo, han surgido esfuerzos de expertos y de organizaciones como la ONU, UNESCO, ITU. Buscando proponer la universalidad de delitos relacionados con la tecnología, se han formulado conceptos funcionales atendiendo a realidades nacionales concretas a la legislación de cada país.

Sin embargo, al consultar bibliografía de diferentes fuentes específicamente al insigne estudioso español Carlos Sarzana, el cual indica que los crímenes a través de computadora comprenden "Cualquier comportamiento criminógeno en el cual la computadora ha estado involucrada como material o como objeto de la acción criminógena, o como mero símbolo" [1].

María de la Luz Lima conceptualiza que el "delito electrónico", [2] "en un sentido amplio es cualquier conducta criminógena o criminal que en su realización hace uso de la tecnología electrónica ya sea como método, medio o fin y que, en un sentido estricto, el "delito informático", es cualquier acto ilícito penal en el que las computadoras, sus técnicas y funciones desempeñan un papel ya sea como método, medio o fin" [1].

Por otro lado, debe mencionarse que se han formulado diferentes denominaciones para indicar las conductas ilícitas en las que se usa a la computadora,

tales como "delitos informáticos", "delitos electrónicos", "delitos relacionados con la computadora", "crímenes por computadora", delincuencia relacionada con el ordenador" "delitos telemáticos".

Analizando las definiciones antes mencionadas por diversos autores podemos plantear una aproximación al delito informático para el presente estudio como: "todas aquellas conductas ilícitas susceptibles de ser sancionadas por el derecho penal, que hacen uso indebido de cualquier medio Informático ya sea como medio o como fin, implicando actividades criminales" [3].

2.1 Redes sociales de internet

"Son formas de interacción social, definida como un intercambio dinámico entre personas, grupos e instituciones. Un sistema abierto y en construcción permanente que involucra a conjuntos que se identifican en las mismas necesidades y problemáticas y que se organizan para potenciar sus recursos. La intervención en red es un intento reflexivo y organizador de esas interacciones e intercambios, donde el sujeto se funda a sí mismo diferenciándose de otros [4]".

Es importante tener en cuenta que las redes sociales dan al anónimo popularidad, a la discriminada integración, al sujeto diferente igualdad. Pero, además, permite que la fuerza del grupo genere cambios que de otra manera podrían ser difíciles y afiance nuevos vínculos [5], que en muchas ocasiones pueden ser aprovechados por delincuentes usando técnicas de ingeniería social.

Según un estudio desarrollado por la empresa de seguridad informática "Shupos", sobre los riesgos de hurto de identidad en una de las redes sociales más grandes de Internet, llega a la conclusión que los usuarios de Facebook facilitan el robo de su información personal, en su investigación, Sophos creó un perfil falso –el cual tenía la imagen de una rana de plástico– para hacer invitaciones y enviar mensajes a cerca de 200 usuarios aleatorios de Facebook [6]. La idea era determinar cuántas personas respondían y qué cantidad de información personal podía ser obtenida de ellas. El resultado: 41% de los usuarios no tiene inconveniente en suministrar datos personales, como dirección de correo electrónico, fecha de nacimiento o teléfono celular, a cualquier desconocido, incluyendo una rana [6].

Facebook ha comunicado una impresionante cifra de 1000 millones de personas que se conecta cada día. Ya no hay momentos de "conexión a Internet", como podía suceder hace algunos años, en la actualidad "viven conectados".

Los factores antes mencionados fomentan un mundo virtual y como en toda sociedad existirán peligros, actualmente existen diferentes tipos de plataformas de redes sociales en Internet en los que se podrían realizar prácticas delictivas, pero Facebook, es la más común, según estudios que se la ubican con la red social más utilizada, los delincuentes crean cuentas de usuario para reunir información de sus víctimas, pero los métodos utilizados difieren según la naturaleza del delito en cuestión, las tres categorías de delitos iniciados en redes sociales son: la ciberdelincuencia, el robo y los delitos sexuales [7].

2.2 Metodología de acción ante los delitos cometidos a través de redes sociales

En la investigación de campo realizada, a las diferentes entidades de justicia, no se pudo determinar la existencia de una metodología específica de actuación por parte de los entes judiciales del país, para la investigación de delitos cometidos a través de las redes sociales, se evidenció que los procesos investigativos se realizan bajo el mismo parámetro de la investigación de delitos comunes.

En países como Argentina existen entidades como la organización sin fines de lucro "Argentina cibersegura" que nació a mediados del año 2010, se creó bajo el modelo de ciudad cibersegura que fue implementado por la empresa ESET Estados Unidos, con el principal objetivo de educar a la población en temáticas relacionadas a la ciberseguridad [8].

Otros de los países a la vanguardia de los delitos informáticos es España, la cual dentro de su Guardia Civil y Policía Nacional, cuentan con un grupo de delitos telemáticos y Brigada de Investigación Tecnológica creada para investigar todos aquellos delitos que se comenten a través de internet, el esfuerzo principal del GDT ha sido desde su creación, la investigación de la delincuencia que se vale de las redes sociales y sistemas de información para su comisión. También cabe destacar los esfuerzos que realizan para fomentar un uso seguro de las nuevas tecnologías,

consciente de que a la larga este esfuerzo ayudará a minimizar el impacto de la delincuencia [9].

Entre los objetivos perseguidos por este tipo de organizaciones tenemos:

- Generar contenidos que colaboren a conformar un espacio digital más seguro.
- Impulsar leyes que regulen el espacio digital y protejan a quienes naveguen en los mismos.
- Concientizar y educar a niños, adolescentes y adultos en temas relacionados a la seguridad informática.
- Promover la alfabetización de la población.

Argentina cibersegura siendo una iniciativa de Securing Our eCity realiza con ESET un guía de seguridad en las redes sociales enfocando su documento en las 4 principales redes sociales con mayor popularidad en el año 2011 como son Facebook, MySpace, Twitter y LinkedIn [8].

El documento conformado por 16 páginas denominado guía de seguridad en las redes sociales identifica los principales riesgos en las redes sociales [10]:

- *Malware* acrónimo en inglés de las palabras *malicious* y *software*, es decir código malicioso.
- *Phising*, consiste en el robo de información personal y/o financiera del usuario través de la falsificación de un ente de confianza.
- Robo de información, el uso diario de redes sociales y los usuarios subiendo diversos datos de índole personal, que pueden ser de utilidad para los atacantes.
- Para muchas empresas de seguridad el robo de información en redes sociales, se relaciona directamente con el robo de identidad.

Existen 2 principales vectores de ataque para el robo de información estos son [10]:

- Ingeniería Social: El contacto directo con el usuario víctima, extrayendo información a través de la comunicación, la “amistad” o cualquier comunicación que permita establecerse a través de la red social.
- Información pública: una mala configuración de las redes sociales, puede permitir acceso a mucha información personal, que personas mal intencionadas podrían acceder y hacer mal uso de dicha información.

En los casos de acoso a menores de edad, los niños utilizan las redes sociales desde muy temprana edad,

incluso evadiendo los requisitos de seguridad que plantean las redes sociales al momento de crear una cuenta, existen una serie de amenazas como el *cyberbullying*, *grooming*, *sexting* [10].

En países como España en el año 2013 la policía propuso usar troyanos para la investigación, lo cual no tuvo aceptación por la legislación ya que viola los artículos que protegen la privacidad de usuarios en la red [11].

En México existe una organización denominada “ASI” (Alianza por la seguridad del internet) la cual en el año 2010 emitió un documento para poder conocer los delitos cibernéticos, como evitarlos y como denunciarlos [12].

Donde se mencionan como los delitos más comunes en el internet [12]:

- Ofertas falsas de empleo
- Fraudes financieros
- Agencias falsas de modelos
- El fraude nigeriano en internet.

El principal desafío que cita el documento del efecto internet emitido por “ASI” lo representa en, cómo comprobar la existencia y propiedad de la información que es robada [12].

Otra parte importante de la publicación de www.asi-mexico.org es la sesión de “internet en tu familia”, determina que para poder orientar a los hijos sobre el buen uso de la tecnología no se necesita ser experto en ella, lo que preocupa hoy en día no son los medios digitales que los adolescentes utilizan, sino las actividades que con estos se realiza y que mayormente tienen que ver con el nuevo paradigma digital, es decir la preocupación debe concentrarse en con quien hablan, de que hablan, que relaciones construye, en que comunidades participan. Cuando hablamos de riesgos para menores de edad navegando en internet, los clasifica de la siguiente forma [12]:

- Contenido inapropiado: A todos los usuarios en especialidad los padres preocupan el contenido pornográfico, violento, obsceno, de drogas y demás con que nuestros hijos pueden encontrarse en línea.
- Contacto inapropiado: Los grandes beneficios de internet no están disponibles únicamente para usuarios bien intencionados. Acosadores, depredadores y estafadores es un peligro para los menores de edad.

- Conducta inapropiada: El teórico anonimato puede dar lugar a conductas hostiles por parte de los usuarios.
- En documento emitido por “ASI” en su sesión internet en la familia describe una de las etapas fundamentales para el cometimiento de acoso especialmente en redes sociales el cortejo.

El proceso de “el cortejo” se lo especifica en siete etapas [12]:

1. Encuentro: sitios populares entre los menores de edad donde son ubicados por el acosador.
2. Compartir intereses: desarrollan la nueva “amistad” haciendo ver al menor cuantas cosas tiene en común.
3. Ganar confianza: Se gana su confianza con un apoyo constante a sus ideas.
4. Obtener secretos: Desarrolla intimidad con el menor, lo convence de que son mejores amigos, nada debe interponerse.
5. Romper barreras de resistencia: como esta relación es diferente a todas las demás, se establecen nuevos parámetros y fronteras.
6. Amenazas: Lo adentra en la posibilidad de exponer todo lo que han hablado como amigos, se supone que son cosas privadas, o peor aún, lastimar a su familia.
7. Encuentro físico: Sin importar cómo llegó aquí, el menor siempre es la víctima.

2.3 Efectos que se generan con estos delitos

Los efectos que se generan con estos delitos son muchos a considerar debido al fuerte impacto que tienen en sus víctimas estos pueden ser [13]:

- Viralización. - Se trata de difusión de contenidos, la viralización se produce en el momento que estos contenidos llegan a internet para luego en forma masiva pasa de dispositivo en dispositivo en redes sociales (WhatsApp, Twitter o Facebook).
- El anonimato. - Adolescentes quienes sufren, injurias, acosos, extorsión a través de redes sociales, pero por temor a la credibilidad o regaño de sus familiares, el rechazo de sus amigos la vergüenza, no se denuncia el hecho.
- El desprestigio social y laboral. - Existen casos donde personas son descalificadas no solo en su humanidad sino también profesionalmente, [13].
- Bajo rendimiento escolar. - Un alumno víctima del acoso tendrá efectos no solo en su contexto

familiar sino también escolar, reflejándose en bajo rendimiento [13].

- Las tensiones que los adultos pueden transmitir a los niños. - La ambivalencia señalada, hace que los padres y las madres, muchas veces hagan de las TIC un “chivo exploratorio”, sobre el que depositan la causa de dos malestares: uno coyuntural (el encierro forzoso derivado de los contextos urbanos cada vez más inseguros); otro estructural (los progresivos desapegos de los hijos conforme van creciendo) [13].

3. Marco Legal

En Ecuador no existe una ley especial o capítulo del código penal ecuatoriano, que penalice los delitos relacionados con la tecnología o delitos informáticos. Muchos países de nuestra región cuentan hace varios años con leyes específicas para la penalización de prácticas delictivas relacionadas a la tecnología y la protección de datos como son:

- Colombia: En año 2009, se crea un nuevo bien jurídico tutelado denominado “De la protección de la información y de los datos”.
- Perú: En octubre del 2013, se promulga la ley de delitos informáticos con 7 capítulos teniendo por objeto prevenir y sancionar las conductas ilícitas que afectan los sistemas y datos informáticos y otros bienes jurídicos de relevancia penal.

Cómo legislar algo que físicamente no existe y cómo respaldar responsabilidad penal sobre un individuo u organización criminal detrás de un computador operando desde cualquier parte del mundo, son los principales interrogante al momento de plantear una legislación para este tipo de prácticas.

Una de las leyes vigentes en Ecuador es la “Ley de comercio electrónico, firmas y mensaje de datos” promulgada en el registro oficial el 22 de abril del 2002 cuya última modificación se dio el 11 de octubre del 2011.

Esta ley regula los mensajes de datos, la firma electrónica, los servicios de certificación, la contratación electrónica y telemática, la prestación de servicios electrónicos, a través de redes de información, incluido el comercio electrónico y la protección a los usuarios de estos sistemas, cuenta con un capítulo denominado “Infracciones informáticas” donde se utiliza el término “daño informático” [14]. La

mencionada ley hace referencia a muchos artículos del Código integral penal anterior al año 2014; lo cual queda sin efecto, en el nuevo código integral penal publicado el 10 de agosto del año 2014.

El Nuevo COIP reemplazó a Código Penal vigente desde el año 1971, en este nuevo COIP se contemplan nuevos tipos penales y dentro de los cuales se hace referencia a delitos a través de medios telemáticos de manera generalizada:

- Artículo 174.- Oferta de servicios sexuales con menores de dieciocho años por medios electrónicos. [15]
- Artículo 476.- Interceptación de las comunicaciones o datos informáticos. [15]
- Artículo 173.- Contacto con finalidad sexual con menores de dieciocho años por medios electrónicos. [15]
- Artículo 230.- Interceptación ilegal de datos. [15]
- Artículo 234.- Acceso no consentido a un sistema informático, telemático o de telecomunicaciones. [15]

Los otros tipos penales como la calumnia, la extorsión, la estafa, violación a la intimidad, hacen solamente referencia entre el proceso de violación del artículo que también pueden ser por medios telemáticos, sistemas informáticos, soportes informáticos.

3.1 Estructura del sistema penal acusatorio en el Ecuador

El Código Orgánico Integral Penal es un cuerpo legal que define garantías básicas y principios generales del sistema de administración de justicia penal, dirigido a la infracción penal, el proceso y la ejecución punitiva. Este instrumento recoge definiciones conceptuales teóricas desarrolladas en la siguiente estructura según la guía para actuaciones del Fiscal dentro del Código Orgánico Integral Penal emitido por la Fiscalía General del Estado.

CÓDIGO ORGÁNICO INTEGRAL PENAL			
Libro preliminar:	Libro Primero:	Libro Segundo:	Libro Tercero:
Garantías y principios generales del sistema penal.	Concepto elemental de infracción y circunstancias de responsabilidad. Catálogo de delitos.	Procedimiento para el juzgamiento de las personas con base en el debido proceso.	Ejecución punitiva, régimen y tratamiento penitenciario.

Figura 1. Estructura del Sistema Penal Acusatorio.

De esta manera está organizado el nuevo Código Integral Penal publicado en el registro oficial el 10 de agosto del 2014, el cual contempla un total de 77 nuevos delitos graves a la lista de crímenes que conllevan al encarcelamiento en el Ecuador [15].

Un punto muy importante que se describe en la guía para actuaciones del Fiscal dentro del Código Orgánico Integral Penal es el esclarecimiento sobre la participación de los actores en el hecho y su tipificación para lo cual se lo detalla en el siguiente cuadro [16]:

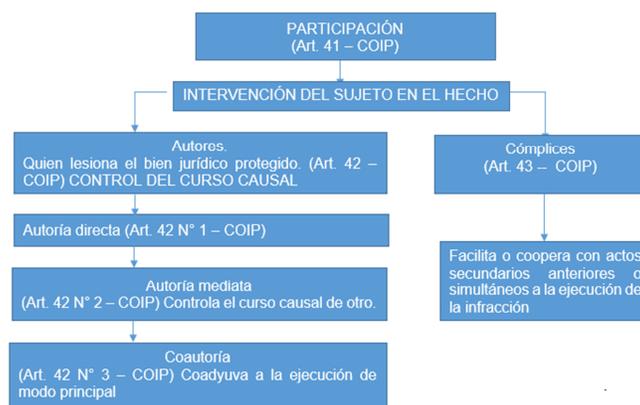


Figura 2. Participación de actores sobre el hecho según COIP.

Este cuadro resulta muy importante al momento de investigar delitos cometidos a través o en medios informáticos, el esclarecimiento sobre la participación de los actores en el hecho [17], en ocasiones, el dueño del equipo informático, o de la conexión de internet no es consiente del acto que se puede estar cometiendo con sus recursos técnicos, cabe considerar que un perfil de una red social puede ser robado, adulterado, clonado, lo mismo puede suceder con una conexión de red o a su vez un equipo telemático.

3.2 La investigación previa

El nuevo Código Integral Penal describe a la investigación previa como “La investigación de elementos de cargo y descargo que dan lugar a bases mínimas necesarias para realizar o no la imputación. Arts. 580, 584, 585.

Esta investigación tiene tiempos estipulados para su desarrollo los cuales son [16]:

- 1 año (Delitos con pena de hasta 5 años)
- 2 años (Delitos con pena mayor a 5 años)
- Indefinida (delitos de desaparición de personas).

Las investigaciones pueden archivarse solo por las tres causas aquí descritas [16]:

- No hay elementos de convicción (Art. 586,1)
- El hecho no constituye delito (Art. 586,2)
- Obstáculo legal insubsanable (Art. 586, 3)
- La conciliación (Art. 665, 2).

Todos los procesos y acciones descritas anteriormente están especificadas en la guía de actuación Fiscal dentro del Código Integral Penal, lo cual no es pertinente para investigaciones relacionadas con la tecnología porque pueden durar horas, días o años.

3.3 Problemas para identificar estos delitos y sus responsables

El principal desafío para poder identificar los delitos informáticos, consisten en que no siempre se utiliza como fin la tecnología, para esto se divide en 3 tipos según el objetivo del delito. [18]:

- La Tecnología es el fin
- La Tecnología es el medio
- La Tecnología es incidental.

Entre los desafíos a los que se enfrentan las fuerzas del orden, al momento de investigar delitos cometidos usando medios telemáticos y en especial nuestro enfoque que son las redes sociales tenemos a [18]:

- Globalización
- Falta de Marco Legal
- Falta de Capacitación
- Falta de Recursos
- Tecnología y la Sociedad

4. Materiales y métodos

Se realizó una investigación mixta comprendiendo procesos cuantitativos como estadísticas de reportes de delitos relacionados con la tecnología, informes de diferentes organizaciones como la UNICEF en su informe titulado “la seguridad de los niños en línea”, el observatorio para el cibercrimen en Latinoamérica y el Caribe [19], y la aplicación de una encuesta en una muestra determinada. Para los procesos cualitativos se aplicaron entrevistas a un agente fiscal y un representante de la policía judicial, así como la revisión bibliográfica de artículos y libros relacionados con el tema, lo cual nos permitió dar un alcance descriptivo.

Se aplicó método inductivo en el análisis de datos para establecer conclusiones o teorías universales que

relacionan fenómenos, ya que actualmente en el país no existen estadísticas sobre índices de delitos cometidos a través de redes sociales como Facebook. Se cuenta con muy poca información al respecto por lo que debemos estudiar casos singulares. Se considera pertinente basarnos de la experiencia de agentes Fiscales, Policías Judiciales y Peritos, lo cual aporta una perspectiva no solo local sino global del actual tratamiento de los delitos cometidos a través de redes sociales como Facebook.

4.1 Entrevista

Se realizó un diálogo directo, con un agente fiscal y un teniente de la policía judicial con el fin de percibir cuales son los procesos o acciones de las fuerzas del orden, para proceder en este tipo de eventos o a su vez verificar la existencia de una técnica o método establecido para la investigación de delitos a través de redes sociales.

Para nuestro trabajo utilizamos el tipo de entrevista informativa, en la que el entrevistador pretende obtener información sobre un tema determinado para nuestro caso “delitos cometidos a través de redes sociales” donde se captó información valiosa sobre el tratamiento actual de este tipo de comportamientos antijurídicos.

4.2 Encuesta

Para realizar una encuesta el primer paso es seleccionar una muestra, para esto necesitamos definir las características que integran a nuestra población de estudio, estableciendo la particularidad que tendrán para nuestro caso el grupo de usuarios de la red social de Facebook.

El tipo de muestra se determinó como probabilística estratificada, cuando no basta que cada uno de los elementos muestrales tenga la misma probabilidad de ser escogidos, sino que además es necesario segmentar la muestra en relación con estratos o categorías que se presentan en la población y que además son relevantes para los objetivos de estudios. [20]

Para esto basamos las categorías en los resultados de la encuesta nacional de empleo y desempleo 2012-2015 realizada por el INEC [21] donde califica el grupo etario con mayor número de personas que utilizaron computadora es el que está entre 16 a 24 años con el 76,1%, el grupo de 25 a 34 años 57,6%, un grupo de 35 a 44 años con un 45% y el último considerado entre 45 – a 54 años con un 31,9%. Todos estos resultados

corresponden al año 2015. Basados en estos indicadores segmentaremos nuestra población para obtener nuestra muestra.

Se eligió una población comprendida por adolescentes de los colegios de bachillerato, personas comunes de las avenidas y un grupo de adultos pertenecientes a una organización de trabajadores en total se realizaron 467 encuesta donde se intentó estimar la apreciación de los usuarios de las redes sociales.

Al no existir información verificada de entidades oficiales de justicia sobre delitos cometidos a través de redes sociales en el Ecuador, el investigador se basó en conocimiento como perito y en referencias de otros estudios, para desarrollar y aplicar una encuesta, tomado la población de **42.610 habitantes** (Según último censo de población y vivienda 2010 aplicado por el INEC) con los que cuenta el Cantón La Troncal provincia del Cañar.

El censo de población y vivienda 2010 divide los siguientes intervalos de habitantes por edad, para nuestro estudio tomaremos en cuenta las edades de entre 15 y 54 años que basados en los resultados del censo [22]tenemos un total de 23.172 habitantes para determinar nuestra muestra utilizaremos el programa Launch Stat 2.0 el cual nos indica una muestra de: 378 habitantes a encuestar asumiendo un margen de error de 5%.



Figura 3. Software estadístico STATS 2.0.

5. Resultados

Una vez establecido el valor mínimo de la muestra en 378 habitantes asumiendo un error del 5%, se procede a estratificar la muestra de la siguiente forma. Se ha considerado a un total de 467 sujetos para abordar el total de integrantes de la Junta Cantonal del Artesano.

Tabla 1. Clasificación de la Muestra

Entidad de aplicación	N. Encuestas
Junta Cantonal del Artesano	67
Colegio Tomas Rendón Solano	150
Universidad Católica de Cuenca Sede san Pablo de La Troncal	150
Habitantes en General	100
Total, de la Muestra	467

Para el cuestionario de la encuesta nacional de empleo y desempleo, se realizaron las siguientes preguntas:

1. ¿Es usted usuario de Facebook?
2. ¿Con cuántos amigos cuenta usted aproximadamente en la red social Facebook (se categorizaron 6 intervalos desde el 1 a 1000 y el último abierto superior a mil)?
3. ¿De sus amigos en la red de Facebook indique aproximadamente cuantos conoce realmente (se colocaron 5 intervalos de 1 a 1000)?
4. ¿Tiene usted conocimiento de los delitos comunes que se comenten a través de Facebook?
5. ¿Ha sido víctima usted de algún delito a través de Facebook?
6. ¿Indique el tipo o tipos de delitos que cree haber sido víctima a través de Facebook? (se colocaron un total de 20 delitos comunes)
7. ¿Cuándo se presentó el incidente dio parte a las autoridades de Justicia?
8. ¿Por qué no se dio conocimiento del hecho a las autoridades?
9. ¿Cuándo se reportó el incidente, la respuesta a su requerimiento fue? (Inmediata, no tan inmediata y demoró mucho).
10. ¿La ayuda que prestaron las entidades de justicia permitió que el caso? (Se solucionó, no se solucionó, se archivó).
11. ¿Conoce sobre la configuración de privacidad y seguridad para las cuentas de Facebook?
12. ¿Cuándo usted crea un perfil de Facebook usa? (Su nombre, Seudónimo, Otro personaje).

Realizado el trabajo de campo se obtuvieron datos importantes donde el 97% de los encuestados utiliza la red social Facebook, sobre el número de amigos un 26% indicó que tiene menos de 200 amigos mientras que un 15% indicó que tiene entre 801 y 1000 amigos, otro

20% entre 401 y 600 amigos, los encuestados también reconocieron según datos ponderados que conocen a menos del 45% de todos sus amigos en Facebook, un 71% de los encuestados reconoció que sí tienen conocimiento del cometimiento de delitos a través de redes sociales, un 23% reconoció haber sido víctima de amenazas, acosos, extorsión y *hacking* de sus cuentas de usuario. El 96% de los que reconocieron haber sido víctimas de estos delitos indicó que no dieron parte a las autoridades porque prefirieron ignorarlo o creyeron que no sería necesario.

El restante 4% que sí dio parte a las autoridades y se obtuvieron que un 75% indicaron que no se recibió respuesta inmediata y el 25% restante que denunció en hecho indica que demoró mucho.

Tabla 2. Tabla de datos

Opciones	Indicadores	Porcentajes
Inmediata	0	0%
No tan inmediata	3	75%
Demoró mucho tiempo	1	25%
Total	4	100%

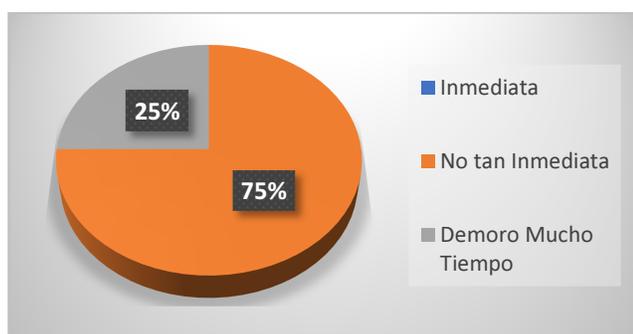


Figura 4. Respuesta al incidente.

Un resultado muy interesante fue el porqué, no se dio conocimiento del hecho a las autoridades se representa por el siguiente gráfico.



Figura 5. Por qué no se dio conocimiento.

Los indicadores más relevantes: un 35% fue que prefería ignorarlo y un 22% que el usuario no consideró necesario dar conocimiento del hecho, un 16% no sabía que se podía denunciar, solo un 2% indicó que no lo hizo por temor a represalias, un 10% indica que recibió amenazas, un 12% indica que no contó con asesoramiento, y un 2% que no recibió la ayuda necesaria cuando intentó denunciar.

6. Análisis de la situación actual

Según la investigación de campo realizada no existe un estudio completo respecto a delitos comunes en redes sociales en el Ecuador y las autoridades locales no cuentan con el conocimiento de los convenios de cooperación internacional y el aporte que pueden otorgar las empresas web 2.0 a la investigación de un delito, por otra parte según los datos recabados de páginas que pertenecen a las fuerzas del orden como www.ministeriointerior.gob.ec, entidades de justicia como www.policiaecuador.gob.ec/dnpj/ y el sitio web de www.fiscalia.gob.ec [23], y la Unidad de Cibercrimen que actualmente se restaura como Observatorio del cibercrimen, lamentablemente no cuenta con un sitio web oficial, únicamente publican contenidos en una página de Facebook en <https://www.facebook.com/CibercrimenPJ.EC>, no se cuenta con una guía de prevención e investigación de delitos comunes cometidos a través de redes sociales que permita investigación de forma local y oportuna.

El Policía Judicial entrevistado indicó que los datos de cualquier delito o sospecha del mismo realizado a través de redes sociales como Facebook se envía directamente mente a Quito y no tiene respuesta oportuna.

También se verificó en las autoridades judiciales del Cantón la Troncal no se cuenta con gran número de denuncias realizadas por conductas delictivas asociadas a las redes sociales, pero se encontró otra gran variante respecto a este tema, ya que actualmente se apoyan las fuerzas del orden en las redes sociales para sus procesos de investigación de cualquier delito con el objetivo de recabar datos de posibles sospechosos. Las encuestas verificaron que sí existen víctimas de delitos comunes a través de redes sociales como Facebook, pero que por el desconocimiento y el descontento con los procesos inciden en las decisiones de denunciar este tipo de delitos y prefieren ignorarlos u ocultarlos.

6.1 Estadísticas de usuarios falsos en Facebook

En el año 2012 los profesionales de WebSide realizó una infografía graficando la información que Facebook otorgara a la US Securities and Exchange Commission de manera trimestral, la cual fue traducida al idioma español en el sitio Socialmedia. De esta manera, interpretando los datos del reporte logramos tener una idea clara sobre cuantos usuarios reales y activos hay en Facebook [24].

En el informe presentado a la Comisión de Valores de Comercio de los Estados Unidos, se indicó que el 5% de los 955 millones de usuarios tienen cuentas duplicadas y que alrededor de 83 millones de cuentas son falsas [25].

Tabla 3. Cuentas falsas en Facebook

Cuentas duplicadas	45.000.000
Cuentas de spam	15.000.000
Cuentas de usuario mal clasificadas	23.000.000

En la entrevista realizada al agente fiscal nos indicó que el nuevo Código Orgánico Integral Penal regula en formas específicas los delitos que se cometen a través de medios informáticos incluso en formas más detalladas los elementos constitutivos, para cada tipo penal de esa naturaleza, delitos contra la seguridad de los activos, de los sistemas de información y comunicación.

Sobre los métodos indicó que llevan un proceso adecuado, porque la misma norma procesal contenida en el COIP, la Fiscalía cuenta con peritos especializados, afines a delitos informáticos con los cuales sirven de

elementos de convención, para establecer en primero que tipo de delitos informáticos y determinar los procesos del mismo, que está a cargo del sistema especializado integral de investigación de medicina legal y ciencias forenses, no la respuestas a los requerimientos por este organismo no siempre es oportuna.

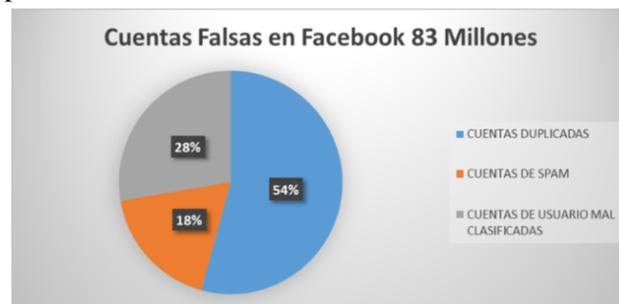


Figura 6. Cuentas Falsas.

También nos indicó el apoyo que representan las nuevas tecnologías en casos de algunos delitos y por experiencia a través del sistema de mensajería instantánea de nombre WhatsApp, mediante indicio inicial de un número telefónico se llegó a determinar la imagen fotográfica de un sospechoso el cual una vez que fue verificada su identidad en los sistemas de archivos de la Policía se llegó a determinar su identidad. Asimismo con este índice se logró determinar el perfil público en la red social Facebook, logrando constatar en el mismo la foto de evidencia que relacionó al sospechoso con el delito perseguido.

En la entrevista realizada al agente de la policía judicial se constató que tienen plenamente identificados los artículos de COIP que contemplan delitos o conductas antijurídicas en las redes sociales, que la PJ (Policía Judicial), cuenta con herramientas TI (Tecnologías de Información) para dar seguimiento e investigación a este tipo de delitos, con la desventaja que estas herramientas las manejan los agentes en las ciudades principales del Ecuador, sobre su experiencia con las redes sociales en delitos, indica que personalmente a trabajado en delitos comunes y se ha utilizado redes sociales como Facebook y WhatsApp para logran la identificación de sospechosos.

Considera que estas herramientas TI aportan mucho al desarrollo de investigaciones, pero que aún falta mucha capacitación para los agentes del orden respecto a estos temas, no solo para el cuerpo de ley, también lo usuarios necesitan conocer que los delitos que utilizan

redes sociales como medio están contemplados en el COIP y pueden ser sancionados.

7. Conclusiones

- Las personas que indicaron tener más de 400 amigos se relacionan con que conocen solo el 45% de ellos.
- Más del 70% de los encuestados indica tener conocimiento de los delitos comunes que se realizan a través de redes sociales como Facebook.
- A pesar de que el tema parece un poco alarmante en estos tiempos solo un 23% de todos los encuestados indicó haber sido víctima de algún tipo de delitos a través de la red social como Facebook.
- Los tres principales delitos identificados en el presente estudio son, acoso, amenaza y robo de cuenta de usuario.
- El 96% de los encuestados, que reconoció haber sido víctima de un delito, indicó que no dio conocimiento a las autoridades, lo que puede relacionarse al desconocimiento de la penalización de estos delitos.
- La investigación bibliográfica indicó que no existe información estadística completa o de fuentes oficiales sobre los delitos comunes a través de redes sociales como Facebook, lo que se relaciona directamente por el tipo penal que se identifican los delitos.
- Los agentes del orden conocen los efectos y delitos que se cometen a través de redes sociales, pero no tienen definida una metodología de investigación exclusiva para delitos de este tipo y los agentes especializados son muy poco en el área de la informática, pero se encuentran en las unidades de las ciudades principales, existen víctimas de este tipo de delitos, pero en las fiscalías se reciben muy pocas denuncias de este tipo.
- La principal vulnerabilidad para el cometimiento de los delitos en redes sociales es el usuario, que desconoce plenamente el marco legal existente en el Ecuador para delitos cometidos a través de medios telemáticos.
- Hasta la fecha de realización del presente estudio, los agentes del orden locales no conocen el procedimiento de petición de información sobre un perfil de usuario a Facebook con fines de investigación.

8. Agradecimiento

Agradecimiento a los agentes de la PJ del Cantón La Troncal quienes muy respetuosamente brindaron la información solicitada. Fiscalía provincial de la provincia del Cañar. Al Fiscal Milton Bernal Patiño quien nos brindó su tiempo para realizar la encuesta y estuvo siempre presto a responder nuestras inquietudes.

9. Referencias

- [1] C. V. G. G. y. M. V. Por Nora Paterlini, “www.aadat.org,” 2015. [En línea]. Available: http://www.aadat.org/delitos_informaticos20.htm. [Último acceso: 22 01 2017].
- [2] A. Nacional, Ley Orgánica de comunicación, Quito: Almacen Editora Nacional, 2013.
- [3] J. O. Luis, “Los procesos seguidos en la investigación de los principales delitos comunes, cometidos a través de redes sociales, denunciados en el cantón la troncal, provincia del Cañar y su influencia en la identificación del autor material e intelectual.,” Unemi, Milagro, 2015.
- [4] A. D. Cea Jiménez, Los delitos en las redes sociales: aproximación a su estudio y clasificación, 2012.
- [5] O. D. E. Americanos., “Guía de manejo de las redes Sociales e Internet.,” OEA, Washington, 2009.
- [6] S. P. Release, “Shophos,” 01 02 2010. [En línea]. Available: <http://www.sophos.com/es-es/press-office/press-releases/2010/02/security-report-2010.aspx>. [Último acceso: 18 02 2015].
- [7] A. G. YUSTE, “Delitos informáticos: malware, fraudes y estafas a través de la red y cómo prevenirlos,” LEGANÉS, 2012.
- [8] ESET, “argentinacibersegura,” 6 Noviembre 2013. [En línea]. Available: <https://www.argentinacibersegura.org/>. [Último acceso: 03 06 2016].
- [9] G. d. d. telemáticos, “Fundación guardia Civil.,” 2015. [En línea]. https://www.gdt.guardiacivil.es/webgdt/home_alerta.php.
- [10] Welivesecurity, “welivesecurity,” 2013. [En línea]. Available: https://www.welivesecurity.com/wp-content/uploads/2014/01/documento_redes_sociales_baja.pdf. [Último acceso: 12 08 2015].
- [11] Elpais, “www.eldiario.es,” 06 06 2013. [En línea]. Available: http://www.eldiario.es/zonacritica/Troyanos-investigacion-policia-justifica-medios_6_140395962.html. [Último acceso: 21 11 2014].
- [12] Efectointernet.org, “efectointernet,” 2010. [En línea]. Available:http://asimexico.org/sitio/archivos/Efecto_Internet_a_1_n_1_Revista_baja.pdf.
- [13] A. chicos.net, “Impacto de la Tecnología en niñas y niños de América Latina.,” 2015.
- [14] C. Nacional, “http://www.oas.org,” 2012. [En línea]. Available: http://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4_ecu_comer.pdf. [Último acceso: 06 11 2016].

- [15] D. H. y. C. S. d. D. N. Ministerio de Justicia, Código Orgánico Integral Penal, Quito: Ministerio de Justicia, 2014.
- [16] M. D. G. B. A. M. Dr. Xavier Andrade Castillo, "Guía para Actuaciones del Fiscal dentro del Código Orgánico Integral Penal," Escuela de Fiscales de la Fiscalía General del Estado, Quito, 2014.
- [17] D. A. Z. Pasquel, "La Teoría de la Participación," Judicatura Online, pp. 55-60, 2009.
- [18] P. M. A. D. Cybercrimen, "Delitos Informaticos Aventuras y Desventuras," Policía metropolitana, BUENOS AIRES, 2014.
- [19] I. N. D. Ciberseguridad, "INCIBE," 28 05 2014. [En línea]. Available: https://www.incibe.es/blogs/post/Seguridad/BlogSeguridad/Articulo_y_comentarios/osint_la_informacion_es_poder.
- [20] E. A. R. MOGUEL, Metodología de la investigación, vol. QUINTA EDICIÓN, U. J. A. D. TABASCO, Ed., MÉXICO, 2005.
- [21] INEC, "Encuesta Nacional de Empleo y Desempleo 2012-2015," ecuadorencifras, Quito, 2016.
- [22] INEC, "ecuadorencifras," 2012. [En línea]. Available: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/base-de-datos-censo-de-poblacion-y-vivienda-2010/>. [Último acceso: 12 10 2016].
- [23] F. G. d. Estado, "Fiscalia," 13 Junio 2015. [En línea]. Available: <http://www.fiscalia.gob.ec/index.php/sala-de-prensa/3630-los-delitos-inform%C3%A1ticos-van-desde-el-fraude-hasta-el-espionaje.html>.
- [24] WebSide, "WebSide," 29 Octubre 2012. [En línea]. Available: <http://soxialmedia.com/infografia-estadisticas-de-usuarios-falsos-en-facebook/>.
- [25] N. Unidas, "12° Congreso de las Naciones Unidas sobre prevención del delito y justicia penal," Salvador(Brazil), 2010.
- [26] A. R. A. R. Egil Emilio Ramírez Bejerano, "Eumed," 05 2009. [En línea]. Available: <http://www.eumed.net/rev/cccss/04/rbar2.htm>. [Último acceso: 17 02 2015].
- [27] D. P. Consuelo Ramos, "Portal.oas.org," 11 2009. [En línea]. Available: <http://portal.oas.org/LinkClick.aspx?fileticket=RHIIdC3cS3Qw%3D&tabid=1483>. [Último acceso: 18 02 2015].
- [28] D. E. Universo., "El Universo," 12 Junio 2014. [En línea]. Available: <http://www.eluniverso.com/noticias/2014/06/12/nota/3093076/fiscalia-allana-dos-viviendas-caso-publi-fast>.
- [29] M. D. Interior, "Ministerio del Interior del Ecuador," 02 abril 2015. [En línea]. Available: <http://www.ministeriointerior.gob.ec/policia-nacional-frena-actividad-ilicita-de-tres-organizaciones-delictivas-y-a-sujeto-dedicado-a-la-pornografia-infantil/>.
- [30] (RVD), "ecuadorinmediato.com," 3 Septiembre 2013. [En línea]. http://www.ecuadorinmediato.com/index.php?module=Noticias&func=news_user_view&id=204235&umt=proyecto_codigo_penal_contempla_hasta_2_anos_prision_para_injurias_y_calumnias. [Último acceso: 23 Agosto 2014].
- [31] www.eltelegrafo.com.ec, "Delitos electronicos.," 25 junio 2014. [En línea]. Available: <http://www.telegrafo.com.ec/justicia/item/hay-600-casos-de-delitos-electronicos-en-17-meses.html>. [Último acceso: 19 Noviembre 2014].
- [32] C. N. D. Ecuador, Ley de comercio electronico, mensaje de datos y firmas digitales, Quito, 2002.
- [33] U. I. D. telecomunicaciones, "El cibercrimen guia para paises en desarrollo.," @UIT, Ginebra, Suiza, 2009.
- [34] A. D. C. Jiménez, "gredos.usal.es," 2012. [En línea]. <http://gredos.usal.es/jspui/bitstream/10366/121119/1/Los%20delitos%20en%20las%20redes%20sociales%20una%20aproximaci%C3%B3n%20a%20su%20estudio%20y%20clasificaci%C3%B3n.%20Andrea%20de%20Cea%20ji.pdf>. [Último acceso: 22 Diciembre 2014].

Instructivo para autores

Guide for authors

Nombre del autor principal ^{1*}, Nombre de cada coautor ^{1...n}

¹ Unidad a la que está adscrito, entidad a la que está afiliado, ^{1...n} Unidad a la que está adscrito, entidad a la que está afiliado
¹ correo_electrónico_autor_principal@ejemplo.com, ^{1...n} correo_electrónico_coautor@ejemplo.com

Resumen– Todo trabajo debe presentar un resumen con un aproximado no más de doscientas cincuenta (250) palabras. Esta sección va después de la información de los autores y con su respectiva traducción al inglés. Utilice las palabras “Resumen” (español) y “Abstract” (inglés) como títulos, alineados a la izquierda, en letra Times New Roman 12 puntos, tipo negrita y seguido de un guión. Luego, inicie el resumen en letra Times New Roman 10 puntos, cursiva y espacio sencillo. Finalmente, deje dos (2) espacios en blanco de tamaño 10 puntos y empiece a desarrollar el contenido del artículo.

Palabras claves– En esta sección debe utilizar las frase “Palabras Claves” (español) y la palabra “Keywords” (inglés), alineadas a la izquierda, en letra Times New Roman 12 puntos, tipo negrita y seguido de un guión. Finalmente, debe incluir un máximo de siete (7) palabras claves o frases claves en letra Times New Roman 10 puntos, separadas por comas y en orden alfabético.

Abstract– This section provides a sample of an abstract and keywords which conform to the formatting guidelines for Revista de I+D Tecnológico.

Keywords– Abstract, guidelines for authors, keywords, Revista de I+D Tecnológico.

Uso exclusivo del editor (no remover)
Uso exclusivo del editor (no remover)
Uso exclusivo del editor (no remover)

1. Introducción

Este instructivo es una plantilla que el autor puede modificar para estructurar fácilmente su artículo según las disposiciones establecidas por el Comité Editorial (CE) de la Revista de I+D Tecnológico (RIDTEC) de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP).

El documento provee reglas de estilo que explican el manejo de ecuaciones, figuras, tablas, abreviaturas y siglas. Además, el autor encontrará secciones para preparar los agradecimientos y referencias.

2. Componentes del artículo

El contenido del documento debe limitarse a un máximo de doce (12) páginas, incluyendo texto, ilustraciones, gráficos y referencias. Por página se entiende una cara de papel tamaño carta ó 21.59 cm x 27.94 cm (8.5" x 11"). El cuerpo del artículo es a dos (2) columnas, cada una con 8.79 cm de ancho y 1.0 cm de espacio entre cada columna.

La configuración de los márgenes es la siguiente: superior 3 cm, inferior 2.5 cm, izquierdo 1.5 cm y derecho 1.5 cm.

A continuación se detallan los componentes del artículo y formato de presentación.

2.1 Tipos de letra y estilos

Utilice un procesador de texto con el tipo de letra Times New Roman. Por favor, evite el uso de “bit-mapped fonts”.

2.2 Título

El título debe ser breve e informativo, reflejando el hallazgo contenido en el artículo y debe estar en Times New Roman 18 puntos, negrita y centrada. La primera palabra comenzará con letra mayúscula y de ahí en adelante se utilizará la mayúscula solamente para los nombres propios y símbolos químicos. Se evitará el uso de abreviaciones y siglas en el título, así como palabras

innecesarias al principio del título, como por ejemplo: un, una, sobre, el, etc.

El título debe contar con su respectiva traducción al inglés o al español, según el idioma base del artículo. Ejemplo: si el artículo está redactado en español entonces el título debe aparecer en español y luego en inglés o viceversa si es el caso contrario.

2.3 Nombre de los autores y afiliaciones

Los autores y coautores deben escribir sus nombres de la misma forma como lo hacen en todas sus publicaciones y seguir el formato establecido al inicio del instructivo. Cada autor debe presentar la siguiente información: la unidad a la que está adscrito (departamento, centro de investigación, facultad, etc.); la entidad a la que está afiliado (universidad, empresa privada, etc.); y el correo electrónico. La importancia de este último dato es que permite una comunicación efectiva entre el autor y el lector.

Los autores y coautores de la UTP deben utilizar el nombre completo de la universidad y sin traducirlo a otro idioma. En otras palabras la entidad de afiliación es “Universidad Tecnológica de Panamá”. Esta medida contribuye positivamente en el conteo por entidad que realiza SCOPUS u otras herramientas, tales como: *Research ID*¹ y *WoS*². Además, el **autor correspondiente** debe indicarse con un asterisco (*).

2.4 Cuerpo del manuscrito

Los componentes principales del manuscrito deben dividirse en secciones con un uso apropiado de títulos y subtítulos, según lo requiera la organización y el desarrollo lógico del material.

2.4.1 Texto principal

Escriba el texto principal en Times New Roman 11-puntos y a espacio sencillo. Los párrafos deben iniciar con una sangría de 0.5 cm. Además, el texto debe estar completamente justificado, no debe agregar espacios en blanco entre los párrafos de cada sección y los extranjerismos (solo aplica para artículo en español) no adaptados deben escribirse en cursiva.

2.4.2 Cabeceras de primer nivel, cabeceras de segundo nivel y viñetas

Una cabecera de primer nivel debe estar en Times New Roman 12 puntos, negrita, la letra inicial en mayúscula y a la izquierda de la columna. Ejemplo: ver

el título de la sección 1 (introducción) del presente instructivo. Recuerde utilizar un punto (.) después de la numeración, no una coma (,). El texto del contenido va en la siguiente línea, recuerde mantener la sangría.

Una cabecera de segundo nivel debe estar en Times New Roman 11 puntos, negrita, la letra inicial en mayúscula y a la izquierda de la columna. Ejemplo: ver el título de la sección 2.3. El texto del contenido va en la siguiente línea, recuerde mantener la sangría.

Es importante indicar que estas especificaciones también aplican para las cabeceras de tercer nivel y su contenido. Además, la numeración de estas cabeceras no culminan con un punto. Las viñetas deben justificarse a la izquierda y a espacio sencillo. La sangría entre la viñeta y el texto es de 0.5 cm.

Nota: las secciones principales y subsecciones deben estar separadas mediante un interlineado sencillo (espacio en blanco) de tamaño 11 puntos. Además, escriba un texto entre el título de una sección y una subsección o entre subsecciones, no deje ese espacio en blanco, ver ejemplo entre las subsecciones 2.4 y 2.4.1.

2.4.3 Enumeración de páginas, encabezados y pies de páginas

Enumere sus páginas en el borde inferior derecho, ejemplo: 1, 2, 3, ..., n páginas. No utilice encabezados ni pies de páginas. Si necesita pie de página, colóquelo en la parte inferior de la columna en la cual se hace referencia con el siguiente formato: Times New Roman de 9 puntos y espacio sencillo. Para facilitar la lectura, se recomienda evitar el uso excesivo de pies de página e incluir observaciones entre paréntesis, ejemplo: (como se ilustra aquí...).

2.4.4 Ecuaciones

Si está utilizando *Microsoft Word*, use *Microsoft Editor de Ecuaciones* o el complemento *MathType* (www.mathtype.com) para ecuaciones en su artículo. Las variables, números y texto deben ser en Times New Roman 11 puntos.

Pasos para insertar ecuaciones:

- *Microsoft Editor de Ecuaciones: Insert/Insertar - Object/Objeto - Create New/Crear Nuevo - Microsoft Equation/Microsoft Editor de Ecuaciones.*
- *MathType: Insert/Insertar - Object/Objeto - MathType.*

La ecuación debe estar centrada y con su correspondiente numeración alineada a mano derecha, como se muestra a continuación,

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1)$$

Enumere las ecuaciones en forma consecutiva entre paréntesis. Use paréntesis para evitar ambigüedades en los denominadores. Utilice punto al final de la ecuación cuando ellas sean parte de una oración, como

$$\int_0^2 F(r, \varphi) dr d\varphi = [\sigma r_2 / (2\mu_0)] \cdot \int_0^\infty \exp(-\lambda |z_j - z_i|) \lambda^{-1} J_1(\lambda r_2) J_0(\lambda r) d\lambda \quad (2)$$

Los símbolos de las ecuaciones deben ser definidos antes o inmediatamente después de la ecuación; utilice letra cursiva y 11 puntos. Para la definición utilice letra normal y 11 puntos. En cuanto a la referencia de la ecuación dentro del contexto del artículo deben ir en minúscula y sin punto al finalizar el texto. Por ejemplo: “En la ecuación 1 se muestra el resultado estimado” o “En la ecuación (1) se muestra el resultado estimado”.

No se aceptan las abreviaciones de las ecuaciones como: “a ec. (1)”, “eq. #1” o “ecuación N°1”. Además, las ecuaciones extraídas de fuentes externas deberán ser citadas en el texto.

2.4.5 Imágenes y fotografías

Las imágenes y fotografías deben estar centradas en el artículo formando parte del texto. En cuanto a numeración, título y leyenda, ver la siguiente sección.

Si alguno de los elementos mencionados no puede ser ajustado en las columnas, entonces debe centrarlo en la parte superior de la página con su respectivo título y leyenda. Después, deben seguir las columnas del artículo en la parte inferior.

Las fotografías e imágenes (tablas, diagramas, gráficos y ecuaciones) deben tener una resolución mínima de 300 ppp (píxeles por pulgada) o dpi (*dots per inch*). Procure que la resolución de las imágenes facilite el envío del artículo a través de la plataforma.

No hay un límite en cuanto a la cantidad máxima de imágenes permitidas. Sin embargo, límitese a incluir las imágenes y ecuaciones más esenciales o novedosas.

Si su artículo es aprobado por el Comité Editorial para su publicación, entonces, debe seguir las instrucciones de la sección 4.

2.4.6 Leyendas de figuras y títulos de las tablas

Las leyendas de figuras y títulos de las tablas deben ser en Times New Roman de 10 puntos. La primera palabra de la leyenda debe iniciar con letra mayúscula. Las palabras “Figura” y “Tabla” deben ser en negrita, incluyendo el número de secuencia y el punto.

Las figuras y tablas deben enumerarse separadamente y llevar su respectiva secuencia, ejemplo: “**Figura 1.** Diagrama de control” y “**Tabla 1.** Mediciones en campo”. Las leyendas de las figuras se colocan justificadas debajo de la imagen y los títulos de las tablas se colocan centrados arriba de las tablas.

2.5 Secciones usuales de un artículo

Las secciones más usuales de un artículo científico, pero NO limitantes, son las siguientes:

2.5.1 Introducción

Debe ubicar al lector en el contexto del trabajo:

- La naturaleza del problema cuya solución o información se describe en el documento.
- El estado del arte en el dominio tratado (con sus respectivas referencias bibliográficas).
- El objetivo del trabajo, su relevancia y su contribución en relación al estado del arte.
- Descripción de la estructura del artículo.

2.5.2 Materiales y métodos

Es importante presentar el diseño y tipo de investigación, pasos de la investigación, materiales y métodos. Además, el autor debe incluir los criterios de la selección del material tratado, los controles, estudios planeados y realizados.

2.5.3 Resultados

Los resultados deben presentarse en orden lógico acorde a la metodología planteada. Usar tablas y figuras cuando sea posible para presentar los resultados de forma clara y resumida. Además, las referencias de tablas y figuras dentro del contexto del artículo deben ir en minúscula y sin punto al finalizar el texto. Ejemplo: En la figura 2 se muestran las mediciones realizadas en el período de enero a marzo.

Tenga mucho cuidado en el texto del artículo al usar porcentajes o estadísticas con un pequeño número de muestras. Incorrecto: "El 60% (3/5) de las muestras de David y el 20% (1/5) de Santiago han demostrado resistencia a los medicamentos." Correcto: "Tres de cada cinco ejemplares de David y 1 de cada 5 ejemplares de Santiago han demostrado resistencia a los medicamentos."

Cuando un número empieza una oración entonces debe escribirlo en letras. Además, utilice numerales cuando las cifras sean mayores que 10.

Posterior a la presentación de los resultados, se destacarán y discutirán los aspectos más importantes del trabajo. Toda afirmación debe estar avalada por los resultados obtenidos. Y por último, comparar los resultados obtenidos con estudios previos.

Se recomienda extremar el poder de síntesis evitando repeticiones innecesarias. Además, las unidades numéricas con su respectiva magnitud deben estar unidas. Ejemplo: 30°C o 25%.

2.5.4 Conclusiones

Deben ser enunciadas con claridad y deben cubrir:

- Las contribuciones del trabajo y su grado de relevancia.
- Las ventajas y limitaciones de las propuestas presentadas.
- Referencia y aplicaciones de los resultados obtenidos.
- Recomendaciones para futuros trabajos.
- Impacto sobre la comunidad científica.

2.5.5 Agradecimiento

Utilice el término en singular como encabezado, aun cuando sean muchos agradecimientos. En esta sección se recomiendan las siguientes expresiones: "Agradecemos a Juan Pérez por su asistencia técnica" o "Agradecemos también a nuestro colaborador Carlos Pérez de la Dirección de Investigación en la Universidad Tecnológica de Panamá". El reconocimiento a patrocinadores por el apoyo financiero se indica en esta sección, ejemplo: "Este trabajo fue financiado por la Secretaría Nacional bajo contrato...".

2.5.6 Referencias

Las referencias se identificarán en el texto mediante números arábigos entre corchetes, alineados con la escritura. Se enumerarán por orden de aparición en el

texto al final del trabajo. Las listas de referencias deben seguir el estilo de la **IEEE**. El autor tiene la libertad de utilizar un administrador de fuentes bibliográficas que incluyen los procesadores de texto o un *software* específico. La letra debe estar en Times New Roman 9 puntos.

No se aceptará que los nombres de todos los autores de un artículo o libro se den como et al., debiéndose especificar la cita completa.

El autor es responsable de la exactitud del contenido y citación de todas las referencias. Todas las referencias deben ser citadas en el documento. Los números de las referencias en el texto deben colocarse entre corchetes.

A continuación, se detallan algunos ejemplos de citas:

Citación de un artículo

- [1] G. Pevere. "Infrared Nation." *The International Journal of Infrared Design*, vol. 33, pp.56-99, Jan. 1979.

Citación de un libro

- [2] W.K. Chen. *Linear Networks and Systems*. Belmont, CA: Wadsworth, 1993, pp. 123-35.

Citación de un documento electrónico

- [3] A. Paul. (1987, Oct.). "Electrical properties of flying machines." *Flying Machines*. [Online]. 38(1), pp. 778-998. Available: www.flyingmachjournal/properties/fly.edu [Dec. 1, 2003].

2.5.7 Apéndice

El apéndice consiste en la presentación de cualquier otro material que impida el desarrollo continuo del artículo, pero puede ser importante para justificar los resultados del trabajo.

3. Normas para la recepción de los artículos

La RIDTEC es una revista abierta indexada (OA) evaluada por pares (doble ciego) con publicación semestral (enero-junio y julio-diciembre) de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP), especializada en las áreas de las ciencias e ingenierías (ver definición en la sección 4).

El CE aceptará solamente artículos científicos relacionados con trabajos de investigación, tales como:

- Agroindustria Alimentaria y no Alimentaria.
- Robótica, Automatización e Inteligencia Artificial.
- Biotecnología.
- Procesos de Manufactura y Ciencia de los Materiales.
- Energías Renovables Convencionales y no Convencionales, y Ambiente.

- Tecnologías de la Información y Comunicación.
- Infraestructura.
- Ciencias Naturales y Ciencias Exactas.
- Innovación, Logística y Transporte.
- Educación y Ciencias Sociales.
- Recursos Hídricos y Cambio Climático.
- Ciencias de la Tierra.

Los autores de artículos pueden ser docentes, investigadores, estudiantes universitarios de pregrado y postgrado con orientación de un profesor tutor. Además, los interesados pueden ser profesionales de entidades públicas (autónomas y semiautónomas) y entidades privadas, ya sean, nacionales e internacionales. Los estudiantes de pregrado con interés de publicar pueden enviar sus trabajos a la Revista de Iniciación Científica de la UTP (<http://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric>).

El autor puede encontrar en el portal de la RIDTEC (<http://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico>) los siguientes ítems:

- Miembros del CE.
- Ediciones anteriores.
- Instructivo para autores.
- Objetivos, alcance, misión y temática.
- Política editorial de la revista.
- Declaración de ética de publicación de la revista.
- Plataforma para la recepción de artículos.
- Fechas de convocatorias para la recepciones de los artículos.

El autor debe enviar una primera versión de su artículo durante el periodo establecido. Además, el autor debe utilizar el formato establecido en el instructivo para estructurar su artículo y enviarlo a través de la [plataforma para la recepción de artículos](#). Además, los artículos recibidos en la plataforma pasado de la fecha límite de la convocatoria, pasaran al estatus de “**espera**” para formar parte de la próxima convocatoria. El archivo del artículo debe cumplir con las siguientes características: formato .doc o .docx y no debe superar los 20MB.

El someter el manuscrito a esta revista implica que el autor está de acuerdo con el método de evaluación aplicado al artículo, no ha enviado a evaluación ni ha publicado el artículo en otra revista, el artículo no está en proceso de publicación en otra revista. Por consiguiente, el autor se compromete a no enviar el artículo a otra revista mientras espera el informe de evaluación del Comité Editorial.

No existe un límite para el envío de artículos por autor. Sin embargo, si dos o más artículos de un autor son aceptados entonces solo se publicará un artículo por número y los demás artículos en los siguientes números.

Nota: El autor solo puede modificar o retirar el artículo antes de la fecha establecida para el corte de la recepción. Esto implica que el artículo no puede ser reemplazado durante el proceso de evaluación o retirado si es recomendado para su publicación (ver documento “*Declaración de ética de publicación*” de la revista para mayor detalles).

4. Evaluación y aceptación de artículos

Cada artículo será evaluado mediante el método de “**revisión por pares**” para conocer su calidad técnica, la originalidad, la contribución científica, entre otros criterios relevantes. La revisión por pares se rige por el método de “**doble ciego**” para garantizar un proceso de evaluación libre de sesgo o conflicto de interés. Los dictámenes finales serán emitidos por el CE de la revista.

Si el dictamen final (opinión de ambos evaluadores y el CE) consiste en no recomendar un artículo para su publicación, se procede con devolverlo al autor con el informe de evaluación notificándole sobre las debilidades de fondo y forma. Un dictamen final de este tipo se sustenta con los siguientes puntos: el trabajo no incorpora el componente de ingeniería, deficiencias en la redacción y claridad de las secciones, no hay una contribución original y significativa al área del conocimiento. Sin embargo, si existe una contradicción entre los evaluadores entonces se recurrirá a un tercer evaluador para definir la evaluación, comúnmente el periodo de evaluación por parte de los revisores puede tomar de uno a dos meses.

En el caso de que el artículo sea recomendado para su publicación, se procede con devolver el artículo y el informe de evaluación. El autor debe mejorar el documento y remitirlo con la información de los autores en un plazo no mayor de **15 días** al correo electrónico revista.idtecnologico@utp.ac.pa, de lo contrario puede estar sujeto a la política del estatus de “**espera**”.

Posterior a la aceptación de los ajustes en el artículo por parte del CE (abril u octubre), el autor principal recibirá una certificación sobre la publicación de su artículo en la RIDTEC.

Además, el autor debe entregar los archivos al correo electrónico revista.idtecnologico@utp.ac.pa o enviar un disco (CD o DVD) con sus respectivas imágenes o gráficos originales para la diagramación del artículo. En el caso de enviar un disco, este debe incluir los siguientes datos:

- Número de identificación del artículo (ID)
- Título del artículo
- Nombre del autor principal.

¿Qué queremos decir con una "**imagen original**"? Según nuestras experiencias con ediciones anteriores, se recomienda generar un PNG o JPG de la imagen con el software utilizado para crear dicha imagen y con una resolución mínima de **300 ppp**. Ejemplos del concepto "original": si la imagen es creada en *Autocad* entonces usted debe generar el archivo PNG o JPG de la imagen a partir del *Autocad*.

No se recomienda exportar la imagen a otra aplicación para generar el PDF porque puede afectar considerablemente la calidad de la imagen y complicar la tarea de diagramación. Ejemplo: exportar la imagen del *Autocad* e importarla en *Word* o *power point*.

Cada imagen debe aparecer en un archivo PNG o JPG por separado y debidamente identificada para facilitar el reemplazo en el artículo.

Nota: El autor es responsable de garantizar el cumplimiento de los requisitos establecidos para las imágenes. En caso contrario, el artículo quedará en cola de espera para su publicación.

5. Prioridad de publicación

La prioridad de publicación se va a regir por los siguientes criterios:

- Por impacto.
- Por tiempo de recepción del artículo.
- Enfoque de la temática.

Si un artículo tiene una mayor puntuación en base a estos criterios este tendrá prioridad para ser publicado, los otros artículos que fueron aprobados, pero no publicados en el actual número estarán en el estatus de *espera* hasta el próximo número.

6. Política de acceso y reúso

Los artículos científicos publicados en la RIDTEC son de exclusiva propiedad de sus autores. Todas las opiniones y contenidos expresados en la revista pertenecen a sus autores, siguiendo los lineamientos del documento "*Declaración de ética de publicación*", la

UTP declina de toda responsabilidad por los derechos que pudiera derivarse de la lectura, interpretación y uso del contenido de los trabajos publicados.

Los autores deben acatar el principio de libre acceso en revista científicas. Por lo tanto, todos los contenidos deben estar disponibles gratuitamente al público, con el objetivo de fomentar un intercambio de conocimiento científico-académico internacional mediante nuestra plataforma Open Journal System (OJS), repositorios y catálogos de indexaciones. Actualmente, la revista no tiene costo alguno de publicación.

7. Correspondencia o comunicaciones

Para la correspondencia, suscripciones o envío de documentación, sírvase hacerlo a siguiente dirección:

Universidad Tecnológica de Panamá

Editorial Tecnológica

Apartado 0819-07289, El Dorado, Ciudad de Panamá, República de Panamá

Además, para una comunicación directa, usted puede escribirnos al siguiente correo electrónico revista.idtecnologico@utp.ac.pa

8. Conceptos fundamentales de interés

Esta sección tiene el objetivo de ilustrar a nuestros autores y lectores sobre conceptos fundamentales de investigación y desarrollo experimental (I+D)³, y redacción científica⁴.

La I+D comprende el trabajo creativo llevado a cabo de forma sistemática para incrementar el volumen de conocimientos, incluido el conocimiento del hombre, la cultura y la sociedad, y el uso de esos conocimientos para crear nuevas aplicaciones.

El término I+D engloba tres actividades: investigación básica, investigación aplicada y desarrollo experimental. A continuación se definen cada una de estas actividades.

- La **investigación básica** consiste en trabajos experimentales o teóricos que se emprenden principalmente para obtener nuevos conocimientos acerca de los fundamentos de los fenómenos y hechos observables, sin pensar en darles ninguna aplicación o utilización determinada.
- La **investigación aplicada** consiste también en trabajos originales realizados para adquirir nuevos conocimientos y está dirigida fundamentalmente hacia un objetivo práctico específico.

- El **desarrollo experimental** consiste en trabajos sistemáticos que aprovechan los conocimientos existentes obtenidos de la investigación y/o la experiencia práctica, y está dirigido a la producción de nuevos materiales, productos o dispositivos; a la puesta en marcha de nuevos procesos, sistemas y servicios, o a la mejora de los ya existentes.

En cuanto a la redacción científica, su característica fundamental es la claridad. El éxito de la experimentación científica es el resultado de una mente clara que aborda un problema claramente formulado y llega a unas conclusiones claramente enunciadas. Idealmente, la claridad debería caracterizar todo tipo de comunicaciones; sin embargo, cuando se dice algo por primera vez, la claridad es esencial.

La mayoría de los artículos científicos publicados en las revistas de investigación primarias se aceptan precisamente porque aportan realmente conocimientos científicos nuevos. Por ello, debe exigirse una claridad absoluta en la redacción científica. Para una mejor comprensión entre los tipos de trabajos científicos, presentamos las siguientes definiciones:

- **Artículo científico:** informe escrito y publicado que describe resultados originales de una investigación.
- **Artículo de revisión:** no es una publicación original y su estructura es diferente a la de un artículo de investigación. Ofrece una evaluación crítica de los trabajos publicados y llegan a conclusiones importantes.
- **Ensayos cortos:** son el resultado de un examen crítico de artículos de investigación científica publicados, en donde se resaltan los trabajos más importantes o los que han brindado mayor aporte al conocimiento en una área determinada.

Los conceptos fueron extraídos de los siguientes documentos:

¹<http://www.researcherid.com/>, Thomson Reuters

²<https://www.recursoscientificos.fecyt.es/>, FECYT

³“Manual de Frascati”, 2003, FECYT y Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE).

⁴“Cómo escribir y publicar trabajos científicos”, 2005, Roberto Day



Portal de REVISTAS ACADÉMICAS UTP

INICIO ACERCA DE ÁREA PERSONAL BUSCAR

Inicio > Portal de Revistas Académicas UTP

Portal de Revistas Académicas UTP

Bienvenido al Portal de Revistas Académicas de la Universidad Tecnológica de Panamá. Este sitio es un componente del proyecto Repositorio Institucional (UTP-Ridda2). Muestra la producción científica de docentes, investigadores y estudiantes. Iniciativa que desarrolla la Vicerrectoría de Investigación, Postgrado y Extensión, la Dirección de Comunicación Estratégica y Editorial Universitaria, con el apoyo de las autoridades de esta casa de estudios.

[A](#) [B](#) [C](#) [D](#) [E](#) [F](#) [G](#) [H](#) [I](#) [J](#) [K](#) [L](#) [M](#) [N](#) [Ñ](#) [O](#) [P](#) [Q](#) [R](#) [S](#) [T](#) [U](#) [V](#) [W](#) [X](#) [Y](#) [Z](#) [Todo](#)



I+D Tecnológico

Desde 2002 se propuso la edición de la Revista de I+D Tecnológico (*P-ISSN 1680-8894 & E-ISSN 2219-6714*), con el propósito de promover la labor de investigación en el ámbito nacional e internacional.

La Revista de I+D Tecnológico (RIDTEC) es una revista abierta (OA) evaluada por pares (doble ciego) con publicación semestral de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP), especializada en las áreas de las ciencias básicas e ingeniería y otras áreas del conocimiento.

[VER REVISTA](#) | [NÚMERO ACTUAL](#) | [REGISTRARSE](#)



Prisma Tecnológico

Prisma Tecnológico (*P-ISSN 2076-8133 & E-ISSN 2312-637X*)

Es una publicación anual de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) bajo el sello Editorial Tecnológica. Es una revista abierta, indexada a Latindex, que ofrece artículos de contenido tecnológico y científico multidisciplinarios, su objetivo es divulgar conocimiento técnico-científico, comunicar temas de ingeniería, ciencias básicas y exactas, y presentar temas sociales desde una perspectiva técnica-científica, a profesionales y estudiantes de las diversas áreas de la ingeniería, así como al público nacional e internacional, de manera comprensible y amena, con claridad, amplitud y responsabilidad.

[VER REVISTA](#) | [NÚMERO ACTUAL](#) | [REGISTRARSE](#)



Revista de Iniciación Científica

RIC (*P-ISSN 2412-0464 & E-ISSN 2413-6786*), es una revista abierta a la difusión, a los intercambios y a los debates de interés de la comunidad universitaria, esencialmente a nivel de pregrado, con el objetivo de promover la creación, la expresión y la diseminación de trabajos novedosos y empíricos. En RIC se publican, prioritariamente trabajos originales relacionados con los temas de ciencias, tecnología e ingeniería, desarrollados por estudiantes de licenciatura, en español, portugués o en inglés, incluyendo resultados de trabajos de términos de grado y otros trabajos de investigación desarrollados en pregrado.

[VER REVISTA](#) | [NÚMERO ACTUAL](#) | [REGISTRARSE](#)

OPEN JOURNAL SYSTEMS

Servicio de ayuda de la revista

USUARIO/A

Ha iniciado sesión como...
dannym

- Mis revistas
- Mi perfil
- Cerrar sesión
- Cerrar sesión de usuario/a

IDIOMA

Escoge idioma

Spanish

CONTENIDO DE LA REVISTA

Buscar

Ámbito de la búsqueda

Todo



UNIVERSIDAD
TECNOLÓGICA
DE PANAMÁ

El **Portal de Revistas Académicas UTP**, es un componente del proyecto **UTP-RIDDA2** (Repositorio institucional de acceso abierto de la Universidad Tecnológica de Panamá).

Componentes del Repositorio Institucional

- Portal de Revistas
- Repositorio de Investigación
- Repositorio de Tesis
- Repositorio de Organizacional
- Repositorio de Académico

Objetivo General del Portal de Revistas

Mejorar la visibilidad de las publicaciones científicas de la Institución a nivel nacional e internacional a través del uso de un sistema de gestión, de información y de consulta ágil y de uso internacional.

Visítenos en:

<http://www.revistas.utp.ac.pa>

No es necesario registrarse para tener acceso a los contenidos de las revistas

Camino a la excelencia a través del mejoramiento continuo



Universidad Tecnológica de Panamá
Campus Universitario Dr. Víctor Levi Sasso,
Edificio de Postgrado, Planta Baja.
Teléfono: (507) 560-3703 | (507) 560-3442
Correo Electrónico: editorial@utp.ac.pa
Web: www.utp.ac.pa
Apartado Postal 0819-07289 El Dorado,
Panamá, República de Panamá.