

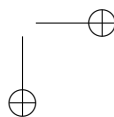
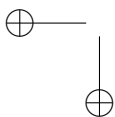
**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**
FACULTAD DE INGENIERÍA

Revista Ingeniería

Volumen 20 · Número 1 · ISSN 0121-750X · E-ISSN 2344-8393

REVISTA CIENTÍFICA SEMESTRAL

2015



Revista Ingeniería

Volumen 20 · Número 1 · Año 2015 · ISSN 0121-750X · E-ISSN 2344-8393

REVISTA CIENTÍFICA SEMESTRAL



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera 7 No. 40-53 Piso 4
Bogotá, Colombia
Correo electrónico:
revista.ing@udistrital.edu.co
Teléfono: + 57 (1) 323 93 00 ext. 2413

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

POSTURA EDITORIAL Y AUDIENCIA

Su principal objetivo es difundir y debatir avances en investigación y desarrollo en las diferentes áreas de la ingeniería, con artículos de contenido original e inédito. La revista está dirigida a investigadores, especialistas, docentes, estudiantes de pregrado y posgrado, ingenieros en ejercicio y al sector empresarial.

EDITOR

Sergio A. Rojas, PhD.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

COMITÉ EDITORIAL

PhD. Jose Marcio Luna GRASP Lab, University of Pennsylvania, Estados Unidos	PhD. Cristina González Caro Universidad Autónoma de Bucaramanga, Colombia
PhD. José Luis Villa Universidad Tecnológica de Bolívar, Colombia	PhD. Víctor Hugo Grisales Universidad Nacional de Colombia, Colombia
PhD. Carlos Eduardo Mantilla Universidad Nacional de Colombia, Colombia	PhD. Henry Alberto Dios Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia
PhD. Marco Aurelio Alzate Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia	PhD. Juan Carlos Figueroa Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia
Msc. Rodrigo Herrera Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia	PhD. Luz Esperanza Bohórquez Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

COMITÉ CIENTÍFICO

PhD. Iván Santelices Malfanti Universidad del Bio-Bío, Chile	PhD. Germán Jairo Hernández Universidad Nacional de Colombia
PhD. Diego Cantor University of Western Ontario, SRObarts Research Institute, Canadá	PhD. Diego Pardo Ayala Agile and Dexterous Robotics Lab - ETHZ (Zurich), Suiza
PhD. Germán Méndez Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia	PhD. Carlos Andrés Peña University of Applied Sciences Western Switzerland, Suiza
PhD. Ana María Peña Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia	PhD. Edwin Rivas Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

GESTORA EDITORIAL

Carolina Suárez R., Ing. Msc.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

DIRECTIVAS

Carlos Javier Mosquera Suárez (E)
Rector

Giovanni Rodrigo Bermúdez Bohórquez
Vicerrector Académico

Roberto Ferro Escobar
Decano Facultad Ingeniería

PREPARACIÓN EDITORIAL

Corrección de estilo
Jorge Alvis

Diagramación
Daniel Contreras Niño

IMPRESIÓN:
Carvajal

ÁRBITROS EN ESTA EDICIÓN

Santiago Murillo Rendón, Msc. Universidad Autónoma de Manizales, Colombia	Jorge Padilla, Msc. Universidad Manuela Beltrán, Colombia
Gerald Fuenmayor Rivadeneira, Msc (e) Universidad Santo Tomás, Colombia	Mónica Espinosa Buitrago, Msc. Universidad Santo Tomás, Colombia
Fernando Daniel Mele, PhD. Universidad Nacional de Tucumán, Argentina	Hugo Rondón Quintana, PhD. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia
Patricia Sing-Borrajó, Msc (e) Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría en La Habana, Cuba	Miguel Sotaquirá Gutiérrez, PhD. Universidad del Norte (Barranquilla, Colombia)
Diego Cantor, PhD. University of Western Ontario, Robarts Research Institute Canadá	Rene Lobo Quintero, Msc. Universidad Autónoma de Bucaramanga, Colombia
Adriana Aguirre C., Msc. Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia	Juan Carlos Figueroa, PhD. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia
Oscar Buitrago Suescun, Msc. Universidad Militar Nueva Granada, Colombia	Dustin Gomez Rodriguez, Msc. Corporación Unificada Nacional de Educación Superior, Colombia
Luis Moreno Anselmi, Msc. Universidad Militar Nueva Granada, Colombia	Henry Arguello, PhD. Universidad Industrial de Santander, Colombia
Edwin Forero García, Msc. Universidad Santo Tomás, Colombia	Jorge Duque Pardo, Msc. Universidad Tecnológica de Bolívar, Colombia
Javier Castillo García, PhD (e) Universidad del Valle, Colombia	Luis Fernando Botero, Msc. Universidad EAFIT, Colombia
Andrés Mauricio Hualpa Zuñiga, Msc. Universidad Cooperativa de Colombia	Juan Pablo Fernández Gutiérrez, Msc. Universidad de Medellín, Colombia
José Marcio Luna, PhD. GRASP Lab. (University of Pennsylvania), Estados Unidos	Diego Pardo Ayala, PhD. Agile and Dexterous Robotics Lab. (ETH Zurich), Suiza
Eval Bacca Cortes, PhD. Universidad del Valle, Colombia	Engelherth Soto Estrada, PhD. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Colombia
John Faber Archila, PhD (e) Universidad Industrial de Santander, Colombia	Edwin Rivas, PhD. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

PERMISO DE REPRODUCCIÓN

Los textos de los artículos incluidos en esta edición pueden ser utilizados y reproducidos con fines sin ánimo de lucro y dando crédito a los autores.



Este trabajo está bajo una Licencia de Creative Commons
Reconocimiento - No comercial - Sin Obra Derivada 3.0 Unported

SUSCRIPCIÓN

Cra. 7 No. 40-53 Piso 4 Decanatura Facultad de Ingeniería
Teléfono: + 57 (1) 3239300 ext. 2413
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/user/register>

INDIZADA EN



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

La imagen en la carátula es una alegoría a la universalidad y penetración de las TIC en el mundo contemporáneo, con alusión a sus repercusiones culturales y biológicas, y al papel que puede jugar la ingeniería en moldearlos.
(Idea creativa: Sergio A. Rojas y Carolina Suarez R. Diseño: Félix López).

CONTENIDO

EDITORIAL

Tecno-autoestopismo anti-trancón	5
Sergio A. Rojas, Ph.D.	

ARTÍCULOS REGULARES

Fuzzy entropy relevance analysis in DWT and EMD for BCI motor imagery applications	9
<i>Análisis de relevancia con entropía difusa en aplicaciones BCI con imaginación motora mediante descomposiciones DWT y EMD</i>	
Boris Medina Salgado · Leonardo Duque Muñoz	

Diseño y Evaluación del desempeño de una Red de Comunicaciones para Medición Inteligente utilizando Network Simulator-2	21
<i>Design and performance evaluation of a communication network for smart metering in Network Simulator-2</i>	
Juan Manuel Aranda	

Optimización multiobjetivo en la gestión de cadenas de suministro de biocombustibles. Una revisión de la literatura	37
<i>Multiobjective optimization in biofuel supply chain management. A review of the literature</i>	
Johan Alexander Aranda Pinilla · Javier Arturo Orjuela Castro	

Segmentación y conteo de las líneas de la nariz del feto en imágenes ecográficas de las 11-13⁺⁶ semanas de gestación	65
<i>Segmentation and nasal line counting in ultrasound fetal images at the 11-13⁺⁶ weeks of gestation</i>	
Ange Paola Ballesteros Maldonado · Laura Catalina López Alza · Rodrigo Javier Herrera García	

Aplicación móvil de realidad aumentada para la enseñanza de la clasificación de los seres vivos a niños de tercer grado	79
<i>A mobile augmented reality application for teaching the classification of living things to primary school's children</i>	
Cesar Augusto Solano Villanueva · Johan Fabiel Casas Díaz · Juan Carlos Guevara Bolaños	

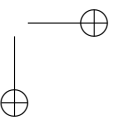
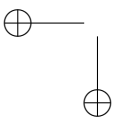
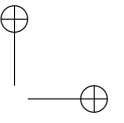
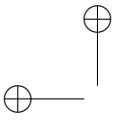
Pasarela para usar transmisores HART desde una red DeviceNet	95
<i>Gateway to use HART transmitters from a DeviceNet network</i>	
Asfur Barandica López · Andrés Ernesto Guevara Escobar	

SECCIÓN ESPECIAL: MEJORES TRABAJOS “VII SIMPOSIO EN OPTIMIZACIÓN”

A Hybrid Column Generation and Clustering Approach to the School Bus Routing Problem with Time Windows	111
<i>Un aproximación híbrida de generación de columnas y agrupación para resolver el problema de ruteo de buses escolares con ventanas de tiempo</i>	
Eduyn Ramiro López Santana · José de Jesús Romero Carvajal	

On the fuzzy extension principle for LP problems with Interval Type-2 Technological Coefficients	129
<i>Acerca del principio de extensión para problemas LP con parámetros difusos Tipo-2 de Intervalo</i>	
Juan Carlos Figueroa García	

Evaluación de políticas de protección en el sector papicultor mediante sistemas dinámicos: caso Villapinzón (Cundinamarca)	139
<i>Evaluation of protection policies to the potato farmer sector using dynamical systems: the Villapinzon-Cundinamarca case</i>	
Nidya Milena Farfán Pinzón · Geimar Peña Ardila	



Editorial

Tecno-autoestopismo anti-trancón

Que la movilidad en Bogotá está a punto de colapsar, es una realidad inminente. Somos testigos a diario. La raíz del problema es el desorbitado aumento de la demanda (usuarios y vehículos) y el limitado crecimiento de la infraestructura (avenidas, puentes, parqueaderos). Es una réplica del fenómeno de escasez de terrenos para viviendas, que obligó a construir casas apiladas sobre más casas (edificios), multiplicando la capacidad real de hábitat de familias coexistiendo sobre la misma superficie. Similarmente pareciera que en términos de movilidad, la solución más viable para reducir la congestión es optimizar el uso del vehículo particular o público, compartiéndolo. Es decir, que donde antes se movilizaba un ciudadano ahora se movilicen cinco. La solución en el papel parece fácil. En la práctica poner a cinco desconocidos de acuerdo no les hace cinco de gracia.

Y aunque ahora suene algo extraño, en un tiempo no muy lejano, cuentan las abuelas, la gente solía compartir los viajes y los vehículos. Claro, eran épocas en las que ni había muchos vehículos, ni había muchos recursos para pagar el transporte. Entonces las personas salían a las calles y "echaban dedo", es decir, señalaban con el dedo pulgar al primer conductor atento que cruzara, con la esperanza de lograr un aventón. Se denomina a esta práctica *autoestopismo*, antigua moda popular tanto para distancias cortas como largas. Con los años este hábito ingenioso se ha perdido, en gran medida debido a la inseguridad ciudadana. Hoy día a ningún conductor en sus cabales se le ocurriría parar a recoger a un errante en la calle, a no ser que busque ser despojado de su carro a mano armada. Así como nadie, ¡ni loco!, se subiría al carro de un desconocido en tránsito, a menos de querer arriesgarse a ser víctima de un paseo millonario. De esta manera, la idea de compartir el vehículo con extraños parece utópica.

Sin embargo hay esperanza. Las novedosas TIC de la economía compartida, un concepto de distribución y reuso de exceso de capacidad en productos y servicios mediante mercados digitales, podrían hacerla realidad. Estas tecnologías ofrecen plataformas que permiten conectar a través de una aplicación móvil, conductores y pasajeros que transitan una misma ruta interesados en compartir el viaje. A cambio de una tarifa administrativa, la plataforma garantiza un programa

de inscripción y validación de antecedentes de los usuarios e igualmente mantiene, mediante el mecanismo de recomendaciones y quejas, sus perfiles de credibilidad y fiabilidad. Eliminando así el factor inseguridad (o reduciéndolo en gran medida), lo anterior podría significar el renacimiento del *autoestopismo*. Un tecno-autoestopismo donde “echar dedo” se logra con un botón de manito con pulgar extendido, como la del “me gusta” de *Facebook*.

La primera plataforma de este estilo en funcionar en Colombia fue *Uber*. En ella, los conductores son taxistas y los aventones no son gratis, se pagan como cualquier carrera de taxi solo que con la tarjeta de crédito del pasajero. El servicio tiene la ventaja de ofrecer viajes más cómodos y seguros, en contraprestación a un mayor costo. Claramente está dirigido a un segmento de la población con alta capacidad de pago. Sin embargo el poderoso gremio de taxis amarillos lo consideran una competencia desleal, feroz y digna de ser declarada “objetivo militar”. Su cabildeo acucioso, con amenaza de bloqueo incluida, logró convencer al gobierno de declarar ilegal la prestación del servicio *Uber*, aduciendo anacrónicas normas sobre vehículos de *servicio especial*, redactadas cuando estas tecnologías ni se habían imaginado. En vez de propender por una nueva legislación, nuestros ministros optaron por la prohibición. No era de asombrarse, menos cuando *Uber* tiene líos similares en otras geografías. Lo que si resulta sorprendente es su actuación tan inmediata en un país acostumbrado al letargo en los despachos de sus gobernantes. Como dato curioso, a marzo de 2015, Colombia hace parte del selecto grupo de tan solo 7 países en el mundo y 2 estados de EE.UU. que lo han prohibido.

Pero la esperanza es lo último que se pierde. El problema con *Uber* es que está concebido alrededor del lucro inherente a su modelo de negocio, que es el servicio de taxi. Mientras que, como ya mencionamos, el tecno-autoestopismo puro, propende por compartir el vehículo por razones altruistas mas que monetarias: descongestionar, descontaminar, desestresar. Si se enfocara el sistema en vehículos particulares, se suprimiría de tajo los argumentos leguleyos del *servicio especial* al convertirlo en *servicio individual*, lo que originaría un mercado digital de conductores deseosos de prestar sus carros y tecno-autoestopistas ávidos de compartir sus viajes. Que por supuesto intercalarían papeles mutuamente en sus respectivos turnos de pico y placa.

De hecho ya existen plataformas que contemplan este escenario: *Lyft* en San Francisco y 65 ciudades más de EE.UU., *Haxi* en Noruega, y hasta las colombianas *MiAguila.com* y *Fuimonos.co*. Su futuro exitoso dependerá de la viabilidad de su modelo de negocio, que en la actualidad también gira en torno a un pago del pasajero que es repartido en un 80% para el conductor, y un 20% para el prestador del servicio. Sin embargo sería interesante explorar otras fuentes de financiación. Por ejemplo, suscripciones mensuales, ingresos por publicidad, venta de paquetes institucionales a grandes compañías, universidades u organismos gubernamentales, aportes de responsabilidad social del sector productivo, incentivos tributarios de la Secretaria de Hacienda o subsidios de la Secretaria de Movilidad como parte de las políticas asociadas al transporte en el plan de gobierno distrital. El abanico de opciones se antoja interesante.

Los retos por resolver no serán solo financieros. En efecto, este tipo de sistemas podría representar para la Alcaldía una oportunidad para fomentar y fortalecer la cultura ciudadana. Y proponer medidas alternativas de disuasión de uso del carro, diferentes a la prohibición de circulación o a la celebración del día sin carro anualmente (que de hecho se pretende extender al día sin carro mensual, y más pronto que tarde quizás semanal o ¡hasta diario!). Sin contar con que se trata de medidas incoherentes con los impuestos de rodamientos y seguros obligatorios contra accidentes que pagan los conductores, esos si por todo el año.

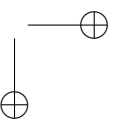
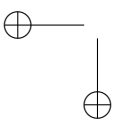
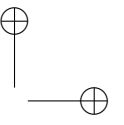
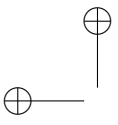
Sería muy bonito en vez de pico y placa extendidos y días sin carro, conformar una cruzada anti-trancón con multitudes de tecno-autoestopistas y conductores altruistas circulando raudos por las avenidas.

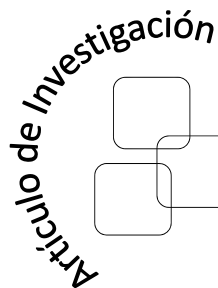
Así mismo, la pedagogía en torno al transporte compartido podría ser otro eje de interés en las políticas de la Administración. Cuestiones relacionadas con el cumplimiento del código vial, primeros auxilios (humanos y mecánicos), ética y civismo, protocolo y etiqueta, bilingüismo (pues suponemos que turistas también harían parte del ecosistema), entre otros, serían de absoluta relevancia. Además, estas “asignaturas” constituirían un currículo técnico deseable para conductores o aspirantes a conductor de taxi, que el Ministerio de Transporte podría considerar establecer como requisito para expedirles su permiso de conducción y operación.

En fin, el tecno-autoestopismo representa una posible contribución desde las TIC al descongestionamiento de la ciudad, aprovechando de mejor manera la infraestructura y capacidad instalada. Aún así puede parecer insuficiente, pues de manera similar a como está sucediendo con la proliferación de edificios, mas tarde que temprano el crecimiento de la flota de vehículos compartidos terminará copando las calles. De allí que la solución total al descongestionamiento contemple combinarla con otras iniciativas igualmente necesarias, como el fortalecimiento de Transmilenio, la construcción del Metro, la ampliación de la infraestructura vial (puentes, avenidas, ciclorutas), el asentamiento en cercanías a los lugares de trabajo y no en extremos opuestos, la intensificación del uso de la bicicleta, el teletrabajo y muchas otras que requerirán un esfuerzo conjunto soportado en nuevas tecnologías, nuevas regulaciones y nuevos comportamientos ciudadanos.

Colofón. En este número encontramos contribuciones relativas al procesamiento de señales en tareas de imaginación motora, el reconocimiento de patrones en imágenes ecográficas, la medición inteligente de desempeño de redes de comunicación, la revisión de enfoques de optimización multi-objetivo para cadenas de suministro de biocombustibles, la aplicación de realidad aumentada en la enseñanza escolar primaria, el desarrollo de una puerta de enlace entre dos protocolos industriales y una selección especial de los mejores trabajos extendidos del VII Simposio en Optimización, organizado en octubre de 2014 por la Universidad Distrital junto con la Universidad Central y Universidad Santo Tomás. Expresamos nuestra gratitud a los autores, revisores y editores participantes, y nuestra invitación a todos nuestros lectores a vincularse con estas páginas.

Sergio A. Rojas, PhD.
Editor General Revista *INGENIERÍA*





Boris Medina Salgado
Docente UNAD
boris.medina@unad.edu.co

Leonardo Duque Muñoz
Docente ITM
leonardoduque@itm.edu.co



Fuzzy entropy relevance analysis in DWT and EMD for BCI motor imagery applications

Análisis de relevancia con entropía difusa en aplicaciones BCI con imaginación motora mediante descomposiciones DWT y EMD

Abstract

Rhythm analysis in advanced signal processing methods has long of interest in application areas such as diagnosis of brain disorders, epilepsy, sleep or anesthesia analysis, and more recently in brain computer interfaces. In this paper the Discrete Wavelet Transform (DWT) and Empirical Mode Decomposition (EMD) techniques are applied to extract the brain rhythms from electroencephalographic (EEG) signals in motor imagination tasks, of left-and right hand, using public dataset BCI Competition 2003. Then the brain rhythms are characterized by statistical features. Additionally, fuzzy entropy algorithm was used to perform the relevance analysis to determine the most important features in the training set. Classification stage was performed using K-NN classifiers and SVM, obtaining classification accuracy up to 100 % with EMD. Classification results allow us to infer that the techniques used are appropriate to generate solutions in BCI applications for recognizing motor imagination in people with motor disabilities.

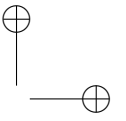
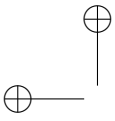
Key words: fuzzy entropy, wavelet, EMD, BCI.

Resumen

El análisis de ritmos en métodos avanzados de procesamiento de señal es de interés en áreas de aplicación, tales como diagnóstico de trastornos cerebrales, epilepsia, análisis del sueño o anestesia, y más recientemente en las interfaces cerebro-computador. En este trabajo se aplican la transformada wavelet discreta (DWT) y descomposición por modos empíricos (EMD) para extraer los ritmos cerebrales de señales electroencefalográficas (EEG) en tareas de imaginación de motora, de mano izquierda y derecha, utilizando la bases de datos pública BCI Competition 2003. Los ritmos cerebrales se caracterizan mediante funciones estadísticas; además, se utilizó el algoritmo de entropía difusa para realizar el análisis de relevancia y determinar las características más importantes en el conjunto de entrenamiento. La etapa de clasificación se realizó utilizando clasificadores K-NN y SVM, de la que se obtuvieron porcentajes de precisión de hasta el 100 % de clasificación. Los resultados de la clasificación permiten inferir que las técnicas utilizadas son adecuadas para generar soluciones en aplicaciones BCI para el reconocimiento de la imaginación motora en las personas con discapacidad motora.

Palabras claves: entropía difusa, transformada wavelet, EMD, BCI.

Recibido: 19-09-2014
Modificado: 12-11-2014
Aceptado: 26-11-2014



1. Introduction

The left-right hand motor imagination can alter neuronal activity in major sensorimotor areas, leading to changes in mu rhythm (noted μ , with frequencies $8 - 12 Hz$) and beta rhythm (noted β , with frequencies $> 13 Hz$). The BCI systems require efficient online processing methods to classify these EEG signals in order to build a system that allows communication with its environment to patients with physical disabilities [1].

Several feature extraction techniques have been used for this purpose, including autoregressive models [2],[3], Common Spatial Patterns [4] and Wavelet Transform [5],[6]. Two methods for characterizing EEG signals in motor imagination task are used in this work. First, the Discrete Wavelet Transform (DWT), and second, the Empirical Mode Decomposition (EMD), which have shown promise in the treatment of EEG signal [6],[7] are used to decompose the EEG signal in its brain rhythms. Then, the brain rhythms are characterized with statistical functions as relative energy and standard deviation. Additionally, fuzzy entropy algorithm is used to perform a relevance analysis and determinate the most important features in the training set. Finally, different classifiers are used to recognize patterns of motor imagination. The application of this method was used to analyze the data set provided by Graz BCI Competition 2003.

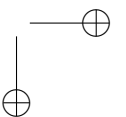
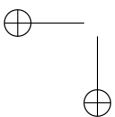
2. Methods

2.1. Discrete Wavelet Transform (DWT)

Specifically, DWT analyzes the signal in different scale bands (frequency bands) ΔF_n , with different resolutions by decomposing the signal into approach and detail components. DWT employs two sets of functions called scaling functions and wavelet functions, which are associated with low-pass filters and high-pass filters, respectively. The decomposition of the signal into different frequency bands ΔF_n , is performed iteratively, producing a set of approximation and detail coefficients at different levels or scales [8]. For $x(t)$ signal, DWT decomposition equation is given by (1):

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} C_{n,k} \phi(2^{-n}t - k) + \sum_{j=1}^n \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} d_{j,k} 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k) \quad (1)$$

Where $x(t)$ represents a time-domain signal, $C_{n,k}$ represents the approximation coefficients to the level n and traslation factor k , while $d_{j,k}$ ($j = 1$ to n) represents the detail coefficients at level j , $\psi(t)$ is the wavelet function and $\phi(t)$ is a scale function. The mother wavelet selection, determines the signal representation. Daubechies, Coiflet and Symlet are generally used as mother wavelet families. The coefficients derived from wavelet decomposition are too long to be used as features for classification; in this paper, two features were used to characterize the wavelet coefficients in each sub-levels of decomposition.



2.2. Empirical mode decomposition (EMD)

Through EMD, used for the analysis of nonstationary and nonlinear signals, the different functions are obtained by intrinsic modes (IMF) that compose it. The general procedure used to decompose the EEG signals into IMF is proposed in [9], described in Table I, where i represents the total number of IMF produced.

Table I
EEG signals decomposition Algorithm into IMF

Decomposition of EEG signals into IMF

Step 1: Read EEG signal, x_i

Step 2: $c_0 = x_i$, $k = 0$

Step 3: Identification of maximum and minimum of x_k , $k = k + 1$

Step 4: Set upper envelopes, u_k , and lower envelopes, l_k .

Step 5: Calculate the mean of the envelopes $m_k = [u_k + l_k]/2$

Step 6: Calculate $c_k = c_{k-1} - m_k$

Step 7: if c_k is an IMF: $i = i + 1$, $d_i = c_k$, $x_i = x_i - 1 - d_i$ go to step 2, otherwise go to step 3

End If

Step 8: If more function cannot be extracted, Residue $r_i = x_i$

End

The original data are the sum of the IMF $c_j(t)$ components plus the final residue $r_n(t)$, expressed as in (2).

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t) \quad (2)$$

In EMD analysis, the first IMF has the highest frequency content, this frequency content decreases with increasing in the IMF component, until n-IMF component, which is almost a linear function of time. Compared with wavelet decomposition, the components of the IMF have lower frequency content, are useful for analyzing low-frequency oscillations, and can be used in the Hilbert spectral analysis to obtain instantaneous frequency [10]. Hilbert transform is mainly used to construct the analytical signal $z(t) = x(t) + i y(t)$. The analytical signal can be separated into its component signal amplitude $\alpha(t)$ and instantaneous phase $\theta(t)$, whose real part is equal to the original signal, as shown in (3), where w_j is instantaneous frequency.

$$x(t) = \text{Real} \sum_{j=1}^n \alpha(t) e^{i \int w_j(t) dt} \quad (3)$$

2.3. Fuzzy entropy

Information theory founded by Shannon, has been formally engaged with communication systems in its infancy, but has also been applied to other areas such as clustering, fuzzy sys-

tems and decision making. The theory of information relates to the quantification of the information. The quantity of information is defined as the amount of information conveyed in an event and depends on the probability of the event [11]. The definition of the amount of information means the logarithm of the probability of an event x , $P(x)$. The average amount of information on all events, based on the classical information theory, called entropy, and is given by (4).

In the probabilistic approach, Shannon entropy is a well-known measure of uncertainty and is extensively covered in the literature. An extension of the Shannon entropy is the fuzzy entropy concept, in which the fuzzy sets used to assist estimation of entropy. Fuzzy entropy differs from Shannon classical entropy from the point at which fuzzy entropy contains fuzzy uncertainties (possibilistic) while Shannon entropy contains randomness uncertainties (probabilistic).

Fuzzy entropy, as Shannon entropy satisfies the four axioms of De Luca-Termini [12]. Shannon entropy is defined from a discrete random variable x with probability function $p(x_i)$, given by (4), where i denotes the number of elements and $p(x_i)$ denotes the occurring probability of the element x_i .

$$H(X) = - \sum_i p(x_i) \log_2 p(x_i) \quad (4)$$

From Shannon entropy, in [13] Khushaba defines fuzzy entropy of the elements of the class i along each specific feature function f (fuzzy set), as in (5), where $P(f, c_i)$ can be interpreted as the degree to which the sample is pre-defined to belong to class i really contributes to that specific class.

$$H(f, c_i) = -P(f, c_i) \log P(f, c_i) \quad (5)$$

Complete entropy diffuse along the C-class is given by (6):

$$H(f, C) = \sum_i^c H(f, c_i) \quad (6)$$

Fuzzy equivalent for the joint probability of the training patterns belonging to class i , is given by (7).

$$P(f, c_i) = \frac{\sum_{k \in A_i} \mu_{ik}}{NP} \quad (7)$$

Where A_i is the set of indices of the training patterns belonging to class i , NP is the total number of patterns, and μ_{ik} represents the k -th fuzzy membership value belonging to class i , given by (8), with fuzziness parameter m , for the k -th measurement vector x_k and the i -th centroid vector v_i .

$$u_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left(\frac{\|x_k - v_i\|}{\|x_k - v_j\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad (8)$$

The fuzzy entropy measure was used to evaluate the significance of the different characteristics of the signal, so a high value represents fuzzy entropy function which does not contribute

greatly to the deviation between classes, and an entropy value under presents more informative features. The most informative features translate into groups with minimum overlap and maximum class separability [14].

3. Experimental Set-up

In this paper, we used data collected from online BCI experiments, and analyzed as described in this section.

3.1. Data Bases

Database Graz BCI Competition 2003 – III was provided by the Department of Medical Informatics, Institute of Biomedical Engineering, Graz University of Technology [15]. This dataset was recorded from a normal subject (female, 25y) during a feedback session. The subject sat in a relaxing chair with armrests. The task was to control a feedback bar by means of imagery left or right hand movements. The order of left and right cues was random. The positions of the electrodes and the distribution system are shown in Figure 1.

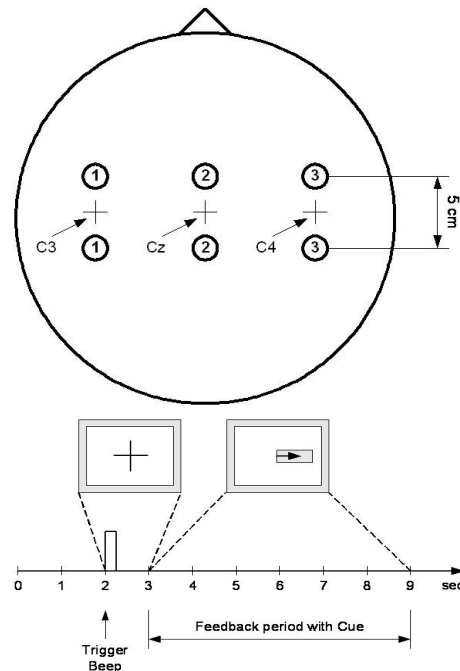


Figure 1. Schematic of time and position of electrodes in the experiment.

The experiment consists of 7 runs of 40 trials each. All of them were carried out the same day. In total there were 280 trials 9 s length. During the first two seconds, $t = 2 s$ an acoustic stimulus indicates the beginning of the test, trigger channel (# 4) was located in a low to high

and a cross “+” is displayed for 1 second, then $t = 3 s$, an arrow (left or right) is shown for reference. At the same time, the subject was asked to move one bar in the direction of the signal. The recording was performed using an amplifier g.tec and Ag/AgCl.

Three bipolar channels (anterior EEG “+”, later “-”) were measured at C3,Cz and C4. EEG samples were taken with 128 Hz, filtered between 0.5 and 30 Hz.

Database Graz BCI Competition 2003 – IV was provided by Fraunhofer -FIRST, Intelligent Data Analysis Group (Klaus- Robert Müller), and Department of Neurology at Freie Universität Berlin [16]. This data set was recorded from a normal subject during a session without feedback. The subject was seated in a normal chair, relaxed arms resting on the table, fingers in the standard position to write on the computer keyboard. The task was to press with the index and little fingers the corresponding keys on your order when your own pace. The experiment consisted of 3 sessions of 6 minutes each. All sessions were held on the same day with few breaks in between. Pressing was performed at an average rate of 1 key per second.

3.2. Experiments

Because the channel Cz is independent in motor imagination [6], only C3 and C4 channels of each database are used for feature extraction. First, the average power spectral density (PSD) in C3 and C4 channels was calculated, in order to provide an effective reference in wavelet decomposition stage.

3.2.1. Wavelet features

According to the EEG signals of motor imagination and power spectrum in C3 and C4 channels, were chosen five levels of decomposition and the mother wavelet Daubechies10. Table II shows the frequency bands obtained for each level of wavelet decomposition, with 128Hz and 100Hz sampling frequency for the respective datasets. The extracted wavelet coefficients provide the distribution of motor imagination signal in time and frequency.

Table II. Wavelet Decomposition Levels.

Decomposition level	Frequency BCI 2003- III	Frequency BCI 2003- IV
D1	64 a 128 Hz	50-100 Hz
D2	32 a 64 Hz	25-50 Hz
D3	16 a 32 Hz	12.5-25 Hz
D4	8 a 16 Hz	6.25-12.5 Hz
D5	4 a 8 Hz	3.12-6.25 Hz
A5	0 a 4 Hz	0-3.12 Hz

3.2.2. EMD features

First, we apply EMD to each EEG signal. Subsequently, we determined by PSD, which IMFs are on the same frequency band of the rhythms in order to group it.

By grouping the IMF signals at different levels that show similar spectral behavior, the Hilbert transform is applied to each level shown in Table III. In this case, after applying Hilbert transform given by (3) to the signals formed in each level, we obtain the real component of the amplitude of the analytic signal.

To characterize the brain rhythms and represent the distribution of the frequency and amount of changes in it, were calculated two statistical functions on the dataset obtained from the wavelet decomposition and datasets extracted through EMD for each frequency level. These features are Standard Deviation and Relative Energy. Each statistical function is applied to the respective sub-levels of decomposition (6 DWT coefficients and 4 EMD levels), for both C3 and C4 channels. Thus, 24 and 16 statistical features of DWT and EMD were respectively obtained.

Table III. Spectral grouping levels of the IMF.

Level	IMFs Cluster	Frequency range
1	IMF1 + IMF2	$> 12 Hz$
2	IMF3	$8 Hz$ a $12 Hz$
3	IMF4	$4 Hz$ a $8 Hz$
4	IMF5 + IMF _n	$< 4 Hz$

3.2.3. Results and discussion

We use the function *fuzzy c-means* of MATLAB[®], to construct the fuzzy membership values for the features obtained of the two databases; each of these reflects the degree of membership of the sample for each of the two classes. Combining the membership values obtained μ_{ik} and equations (5), (6) and (7), were calculated the fuzzy entropy on specific features space. Table IV details the number of features, in order, with the lowest value of fuzzy entropy that identifies patterns with greater information content. Figure 2 shows the box plots of the average evaluation of fuzzy entropy algorithm applied to different numbers of selected features. In this way, to reduce the space dimensions, the ten features with less fuzzy entropy value were trained and classified by cross-validation (10 fold cross-validation) for $k - nn$ classifiers and support vector machines (SVM).

Table IV. Wavelet decomposition levels.

	Features selected			
	DWT-Fuzzy Entropy		EMD-Fuzzy Entropy	
	Dataset III	Dataset IV	Dataset III	Dataset IV
1.	Std C4 D3	Std C4 D3	Std C3 L4	Std C3 L1
2.	Std C4 D4	Std C4 D5	Std C3 L3	Std C3 L4
3.	EnR C4 D1	Std C4 D4	Std C3 L2	Std C3 L3
4.	Std C4 D1	Std C3 A5	Std C3 L1	Std C3 L2
5.	EnR C3 D2	Std C4 A5	EnR C3 L3	EnR C3 L2
6.	EnR C4 D2	Std C4 D2	EnR C3 L2	EnR C3 L1
7.	EnR C4 D4	Std C3 D4	EnR C4 L3	EnR C4 L2
8.	Std C3 D2	Std C4 D1	EnR C3 L1	EnR C3 L4
9.	Std C3 D3	Std C3 D3	EnR C4 L1	EnR C3 L3
10.	ERW C3 D1	Std C3 D2	Std C4 L1	EnR C4 L2

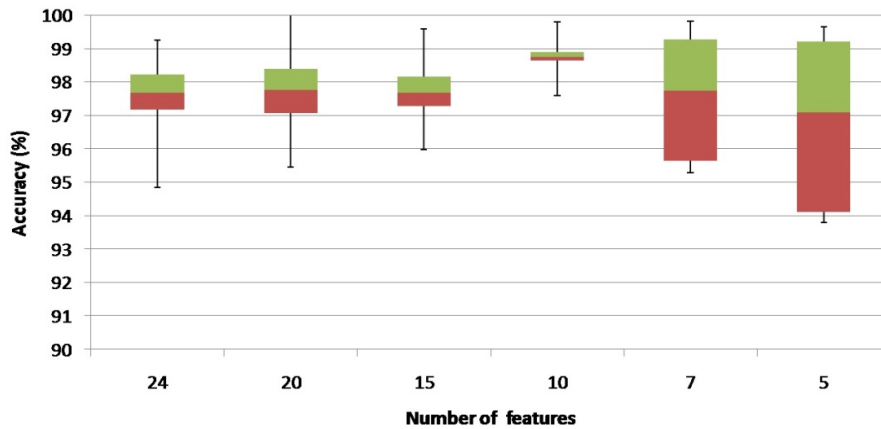


Figure 2. Accuracy Fuzzy entropy applied to different number of features.

Classification results of the features extracted by the proposed method are shown in Table V for $k - nn$ ($k = 3$) and SVM classifier with linear kernel function to map the training points to a higher-dimensional space.

The results of classification based on the characterization by wavelet transform and fuzzy entropy widely evident that the SVM classifier has better results than k-nn classifier in most occasions when validation is performed. However, the feature extraction based on the EMD and fuzzy entropy, both classifiers tend to show the same results in accuracy, which makes them generally have the yield potential for use in pattern recognition tasks of motor imagination.

Generally, the method of fuzzy entropy maintains or improves the accuracy of the feature of EMD and DWT where it was evaluated for the database Competition BCI 2003. The results,

using fuzzy entropy, show greater impact when evaluated using k-nn classifier, increasing by up to 3.36 % of accuracy using less features.

Figure 3 shows the computational cost of the training in EMD and DWT in both databases. It is worth to notice that DWT takes less than 70 % time to obtain the results with similar accuracy. Determining the computational cost is achieved by running each of the proposed algorithms using Matlab® on a laptop with Intel second generation Core i5 processor and 4GB RAM. The time of highest execution was considered 100 %, and by rule of three, the remaining percentages were made.

Other feature methods applied to the databases used in this work show lower results, as in [17] with accuracy 90 % using wavelet coefficients and autoregressive parameters; also, Qiao [18] obtained accuracies of 90 % applying entropy coefficients Wavelet Packet (WEP). Fang et al. [19] used Approximate Entropy (ApEn) and linear classifier LDA with accuracy results of 91.4 %, and Zou et al. [6] obtained 3.94 % misclassification using DWT and SVM classifier.

Table V. Accuracy of the proposed method using SVM classifier and $K - NN$.

Dataset	Classifier	DWT	DWT-Fuzzy Entropy	EMD	EMD-Fuzzy Entropy
BCI III	SVM	97.94±1.29	99.09±0.82	99.48±0.76	99.27±0.89
	K-NN	93.97±2.19	97.33±1.73	99.17±0.98	99.39 ± 0.86
BCI IV	SVM	100±0.00	99.87±0.27	100±0.00	100±0.0
	K-NN	97.72±0.87	98.70±1.00	96.25±1.17	99.01±0.63

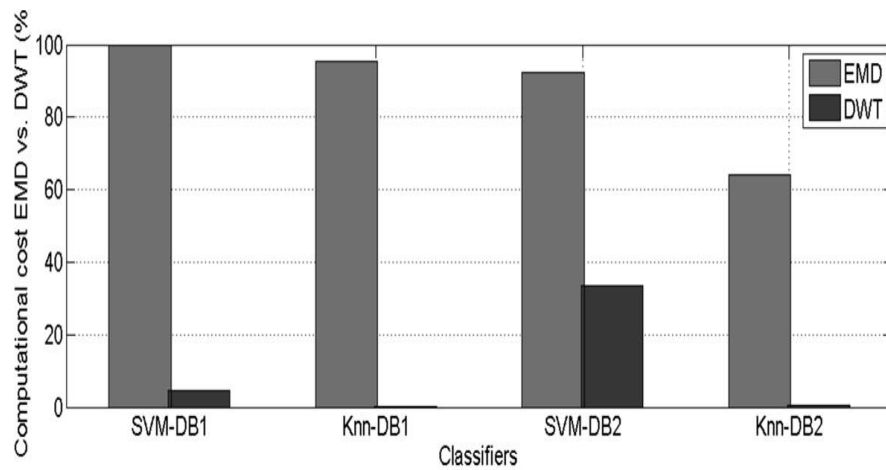
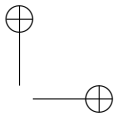
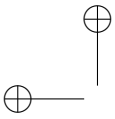


Figura 3. Computational cost EMD vs. DWT.



4. Conclusions

In this paper we proposed and compared two methods for feature extraction of EEG signal for motor imagery of right and left hand, based on DWT and EMD. Also, the fuzzy entropy algorithm was used to select the most relevant features. The methodology described in this paper enable the automated recognition of motor imagery in BCI systems. Obtained results are very close in EMD and DWT decompositions; however the computational cost of DWT is less than 70 % of EMD.

We have analyzed the signals electroencephalography contained in datasets Competition 2003 dataset III and dataset IV, according to the classification results obtained effectively check the signals extracted through electrodes positioned on the C3 and C4 channels contain information interest concerning rhythms engines left and right hand.

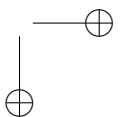
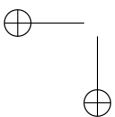
The classification of patterns extracted through the wavelet decomposition methods and EMD, experienced two different data sets, has yielded good results accuracy. Also, by applying the fuzzy entropy algorithm, the classification accuracy is maintained using a lower dimensionality space. The fact of using different databases and different methods of characterization of EEG signals in addition to optimal classification results, makes the fuzzy entropy algorithm, a technique that could be extrapolated to other datasets and characterization techniques for used in tasks of motor imagination through BCI systems.

5. Acknowledgment

This work is supported by project P13259 from Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín-Colombia, and also Master thesis project “Diseño de una metodología para la extracción de características de electroencefalografía en sistemas con interfaz cerebro-computador”.

References

- [1] T. M. Vaughan, “Guest editorial brain-computer interface technology: a review of the second international meeting,” *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 94–109, Jun. 2003.
- [2] J. Wang, G. Xu, L. Wang, and H. Zhang, “Feature extraction of brain-computer interface based on improved multivariate adaptive autoregressive models,” *2010 3rd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics*, pp. 895–898, Oct. 2010.
- [3] D. Cruz-Baron, J. M. Ramirez, M. Baker, V. Alarcon-Aquino, and O. Carrera, “A BCI motor imagery experiment based on parametric feature extraction and Fisher Criterion,” *CONIELECOMP 2012, 22nd International Conference on Electrical Communications and Computers*, pp. 257–261, Feb. 2012.
- [4] C. Chen, W. Song, J. Zhang, Z. Hu, and H. Xu, “An Adaptive Feature Extraction Method for Motor-Imagery BCI Systems,” *2010 International Conference on Computational Intelligence and Security*, pp. 275–279, Dec. 2010.
- [5] D. Hu, W. Li, and X. Chen, “Feature extraction of motor imagery EEG signals based on wavelet packet decomposition,” *The 2011 IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering*, pp. 694–697, May 2011.
- [6] L. Zou, X. Wang, G. Shi, and Z. Ma, “EEG feature extraction and pattern classification based on motor imagery in brain-computer interface,” *9th IEEE International Conference on Cognitive Informatics (ICCI'10)*, pp. 536–541, Jul. 2010.



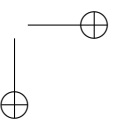
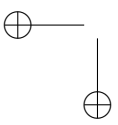
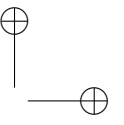
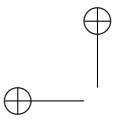
- [7] P. F. Diez, V. Mut, E. Laciari, A. Torres, and E. Avila, "Application of the empirical mode decomposition to the extraction of features from EEG signals for mental task classification," *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.*, vol. 2009, pp. 2579–82, Jan. 2009.
- [8] C. Parameswariah, S. Member, M. Cox, and S. Member, "Frequency Characteristics of Wavelets," vol. 17, no. 3, pp. 800–804, 2002.
- [9] N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. L. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N. C. Yen, C. C. Tung, and H. H. Liu, "The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis," *Proc. R. Soc. London A*, vol. 454, pp. 903–995, 1998.
- [10] HU Guang-shu, "Digital Signal Process-Theory, Algorithm, and Realization" [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 120, 1997, (in Chinese).
- [11] R. Gray. *Entropy and Information Theory* (1st ed.) New York: Springer Verlag, 1990.
- [12] A. De Luca and S. Termini, "A definition of a nonprobabilistic entropy in the setting of fuzzy sets theory," *Inf. Control*, vol. 20, no. 4, pp. 301–312, May 1972.
- [13] RN. Khushaba, S. Kodagoda, S. Lal, and G. Dissanayake, "Driver Drowsiness Classification Using Fuzzy Wavelet Packet Based Feature Extraction Algorithm," *IEEE*, 2011.
- [14] RN. Khushaba, A. Al-Jumaily, A. Al-Ani, "Novel feature extraction method based on fuzzy entropy and wavelet packet transform for myoelectric Control," *2007 Int Symp Commun Inf Technol.*, pp. 352–357, 2007.
- [15] B. Blankertz, K. Müller, G. Curio, T. M. Vaughan, G. Schalk, J. R. Wolpaw, A. Schlögl, C. Neuper, G. Pfurtscheller, T. Hinterberger, M. Schröder, and N. Birbaumer, "The BCI Competition 2003 : Progress and Perspectives in Detection and Discrimination of EEG Single Trials," vol. 51, no. 6, pp. 1044–1051, 2004.
- [16] Benjamin Blankertz, Gabriel Curio and Klaus-Robert Müller, *Classifying Single Trial EEG: Towards Brain Computer Interfacing*, In: T. G. Diettrich and S. Becker and Z. Ghahramani (eds.), *Advances in Neural Inf. Proc. Systems 14 (NIPS 01)*, 2002.
- [17] A. Zhang, B. Yang & L. Huang. *Feature Extraction of EEG Signals Using Power Spectral Entropy*. 2008 International Conference on BioMedical Engineering and Informatics, 435–439, 2008.
- [18] X. Qiao, Y. Wang, and D. Li, "Feature extraction and classifier evaluation of EEG for imaginary hand movements," *2010 Sixth Int. Conf. Nat. Comput.*, no. Incn, pp. 2112–2116, Aug. 2010.
- [19] Y. Fang, M. Chen, X. Zheng, and R. F. Harrison, "Feature Extraction of Motor Imagery in BCI with Approximate Entropy," vol. 6, no. March, pp. 2485–2491, 2012.

Boris Medina Salgado

Recibió su grado de Ingeniero Electrónico de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, en Octubre de 2002. Obtuvo su título de Maestría en Automatización y Control Industrial en el Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín, en Mayo de 2014. Su principal interés de trabajo investigativo está en el área de reconocimiento de patrones en señales biomédicas. Actualmente se desempeña como profesor catedrático en el área de Ingeniería de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD, Colombia.
e-mail: boris.medina@unad.edu.co

Leonardo Duque Muñoz

Recibió su grado de Ingeniero Electrónico de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales en el año 2009. En el año 2012 obtuvo el grado de Maestría en Ingeniería - Automatización Industrial en la misma Universidad. Actualmente realiza sus estudios de doctorado en Ingeniería Electrónica en la Universidad de Antioquia. El principal interés de trabajo docente e investigativo está en las áreas inteligencia computacional, aprendizaje de máquina y algoritmos de optimización, aplicados a la identificación y reconocimiento de patrones en señales biomédicas.
e-mail: leonardoduque@titm.edu.co





Juan Manuel Aranda
Docente investigador Universidad
Sergio Arboleda
juan.aranda@usa.edu.co



Diseño y evaluación del desempeño de una red de comunicaciones para medición inteligente en Network Simulator-2

Design and performance evaluation of a communication network for smart metering in Network Simulator-2

Resumen

Este artículo presenta los resultados de diseño y evaluación del desempeño de una red de comunicaciones para medición inteligente o AMI (*Advanced Metering Infrastructure*), empleando el simulador de redes Network Simulator-2 (NS-2). La red de comunicaciones propuesta combina las tecnologías PLC (*Power Line Communication*) y HSDPA (*High Speed Downlin Packet Access*), así como el uso de concentradores de datos (DC) y de protocolos aplicación y transporte como DLMS/COSEM y TCP-UDP/IP. Los resultados de evaluación indicaron que al introducir dispositivos DC dentro del diseño de red de comunicaciones, ésta presenta un desempeño superior frente a otras que no los emplean para concentrar la información de diferentes medidores inteligentes. Finalmente, se observó una mayor cobertura y un menor número de acceso directos a la red de comunicaciones al considerar DC en el diseño.

Palabras claves: AMI, comunicaciones móviles 3G, DLMS/COSEM, PLC, redes inteligentes.

Abstract

This article presents the results of design and performance evaluation of a Smart Metering or AMI network, using the Network Simulator-2. The communication network proposed combines technologies such as, PLC and HSPDA, using data concentrators (DCs) and application and transport protocols such as DLMS/COSEM and TCP/IP. The performance evaluation results shown that introducing data concentrator inside a communication network provides a superior performance compared with others that not use it. Finally, the employment of DCs on the design also extended communication coverage and reduce direct accesses to the network.

Key words: AMI, 3G mobile communications, DLMS/COSEM, PLC, Smart Grids.

Recibido: 24-09-2014
Modificado: 24-11-2014
Aceptado: 02-12-2014

1. Introduction

Actualmente, las redes eléctricas del mundo están migrando hacia las redes de próxima generación, las cuales soportan el flujo de dos vías (tanto de energía como datos); controlan el consumo de energía de los clientes; permiten localizar, aislar y restaurar rápidamente los puntos donde ocurren cortes de energía; facilitan la integración de generación distribuida a la red de distribución, como un mecanismo para suplir la creciente demanda de energía generada por el advenimiento de las nuevas aplicaciones; y reduce tanto el impacto ambiental producido por las plantas de generación existentes como las pérdidas en la transmisión de la energía. Estas redes conocidas como *Smart Grids* (*redes inteligentes*) buscan implementar tres mecanismos clave: (1) eficiencia energética, (2) respuesta de la demanda y (3) control directo sobre la carga [1].

El primer paso de la evolución de las redes eléctricas convencionales a *Smart Grids* es la implementación de una infraestructura de medición avanzada o AMI (*Advanced Metering Infrastructure*). AMI hace referencia a un sistema que mide, almacena y analiza la energía utilizada desde dispositivos avanzados, tales como medidores inteligentes (MI), a través de una red de comunicaciones bidireccional implementada sobre diferentes tecnologías. La Figura 1 muestra una arquitectura típica de una red AMI, la cual se compone de tres bloques principales: (1) las unidades de recolección de datos local, (2) la red de comunicaciones y (3) el Centro de Gestión y Control de la compañía de energía.

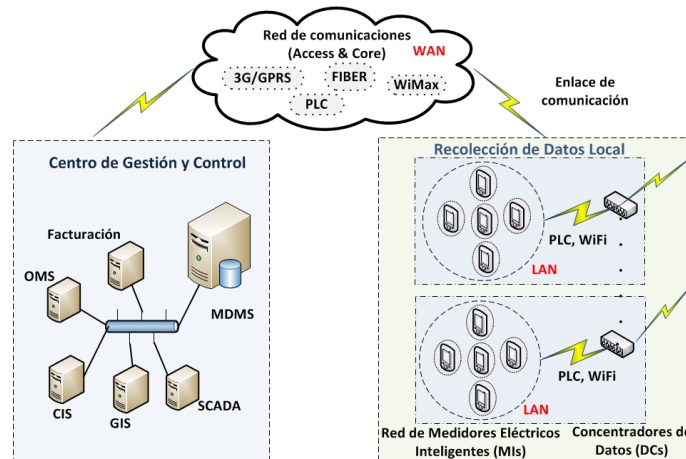


Figura 1. Arquitectura de una red AMI (adaptada de [2]). Se compone principalmente de tres bloques: las unidades de recolección de datos local, la red de comunicaciones y el centro de gestión y control.

De acuerdo con la Figura 1, las redes de comunicaciones constituyen la “columna vertebral” de una arquitectura AMI; por tanto, de la adecuada definición del esquema de comunicaciones dependerá el éxito de la operación de las redes AMI en los *Smart Grids*.

¿Cuál(es) sería(n) la(s) tecnología(s) y la(s) topología(s) de comunicaciones a implementar en una red AMI? ¿Qué configuración AMI utilizar para lograr interoperabilidad, confiabilidad, rentabilidad y escalabilidad? ¿Cómo aprovechar las infraestructuras eléctricas existentes para transportar al mismo tiempo energía y datos? ¿Cuál sería el impacto del tráfico AMI en

las redes de telecomunicaciones existentes? ¿Éstas soportarán simultáneamente los servicios de aplicaciones de telefonía móvil/fijo y las aplicaciones AMI? En caso de que se llegara a sobrecargar la red celular, ¿cómo lograr reducir el número de accesos directos a ella, garantizando calidad en los servicios ofrecidos? El presente artículo aborda éstas y otras cuestiones, que surgen a la hora de diseñar o decidir ofrecer servicios de telecomunicaciones a redes AMI.

Revisando la literatura sobre el tema, se encontraron trabajos similares centrados en la evaluación del desempeño de esquemas y protocolos de comunicaciones para redes de lectura de medición o AMR (*Automated Meter Reading*)/AMI implementados sobre las tecnologías de comunicación a través de las líneas de potencia o PLC (*Power Line Communication*) [3] y celular [4], y el protocolo DMLS/COSEM (*Device Language Message Service/Companion Specification for Energy Metering*, protocolo de comunicaciones europeo que permite la interoperabilidad entre los equipos de medición y el centro de recolección de datos en una red AMI). En el primer trabajo revisado [3], se aclara que la implementación del protocolo se centró únicamente en el nivel de aplicación, dejando de lado todo lo relacionado con la capa de transporte COSEM-TCP. Mientras que en el segundo trabajo [4], se implementó la subcapa de transporte *COSEM-WRAPPER*, pero no hay claridad en la implementación realizada. Adicionalmente, los autores en [4] propusieron un esquema de comunicaciones para una red AMI implementada sobre la tecnología celular de acceso a descarga de paquetes a alta velocidad o HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) con capacidad de soportar hasta 130 medidores inteligentes sin afectar los requerimientos de calidad y garantizando factibilidad de interoperabilidad de servicios de acceso a Internet, aplicaciones en tiempo real y servicios AMI compartiendo una misma red de acceso.

Analizando los resultados obtenidos en el segundo trabajo [4], 130 medidores es un número reducido comparado con los miles de medidores que se espera que sean capaces de soportar las redes AMI [5]. Al considerar la tecnología celular para estos tipos de redes, hay que tener en cuenta que los dispositivos de medición requieren múltiples conexiones con la estación base para transferir muy pocos datos. Dado que cada conexión tiene señalización y *overheads* relativos a los datos, resultan paquetes significativamente grandes comparados con la información transmitida. Por tanto, a medida que se incrementa el número de medidores dentro de la red, podría llegarse a sobrecargar la red celular, limitar la cobertura y afectar la calidad de los servicios prestados, situación que se presentó en el segundo trabajo [4].

El presente artículo va dirigido especialmente a los operadores de red que lideran proyectos de *Smart Grids* o buscan desplegar una red AMI sobre sus redes eléctricas. Así mismo, está dirigido a los operadores de telefonía móvil interesados en proveer servicios de infraestructura celular requeridos por las aplicaciones AMI, pero que, al mismo tiempo, desean conocer el impacto que conlleva el tráfico AMI a través de sus infraestructuras de telecomunicaciones, de forma que puedan estimar y validar la capacidad de comunicaciones requerida, de acuerdo con distintos parámetros de calidad de servicio y resultados obtenidos por simulación usando distintos escenarios.

Este artículo se encuentra organizado como sigue: la sección 2 presenta el esquema de comunicaciones propuesto para una red AMI, seguido de la descripción del diseño e implementación en NS-2 de los modelos experimentales del protocolo de comunicaciones DLMS/COSEM y del dispositivo concentrador de datos. Posteriormente, en la sección 3 se detallan el escenario de simulación y los requerimientos de telecomunicaciones (métricas) para evaluar el

desempeño del esquema de comunicaciones, continuando en la sección 4 con el análisis de resultados y finalizando con las conclusiones de la investigación y trabajo futuro en la sección 5.

2. Red de comunicaciones y modelos experimentales

2.1. Esquema de comunicaciones para una red AMI

El esquema propuesto combina las tecnologías de acceso PLC y HSDPA para establecer una conexión entre una red de medidores inteligentes y el Centro de Control de la compañía de energía. Se compone tanto de medidores inteligentes (MI), incorporados en cada uno de los abonados, como de concentradores de datos (DC), cuyo objetivo es agrupar el tráfico producido por un conjunto de medidores dentro del alcance de su red, implementada sobre la tecnología NB-PLC (*Narrow Band-PLC*), y de enviarlas hacia el Centro de Control cuando éste los solicite. Entre el concentrador de datos y el Centro de Control se implementa una red de acceso HSDPA y una red de transporte con cobertura metropolitana sobre fibra óptica. La arquitectura de telecomunicaciones, empleada para transferir los paquetes a los diferentes servidores dentro de las instalaciones del Centro de Control, consiste en una red de área local Ethernet.

Con el fin de garantizar la interoperabilidad entre los equipos de medición y de concentración de datos, se propone el protocolo DLMS/COSEM, muy utilizado en proyectos europeos de medición avanzada [5]. Para la comunicación entre el Centro de Control y los DCs se propone una aplicación *RequestingAPP* (Figura 2), implementada sobre los protocolos TCP-UDP/IP y diseñada para correr programas de respuesta de la demanda y aplicaciones de medición avanzada. La Figura 2 presenta la pila de protocolos de los nodos principales que conforman el esquema de comunicaciones para una red AMI implementada en NS-2¹.

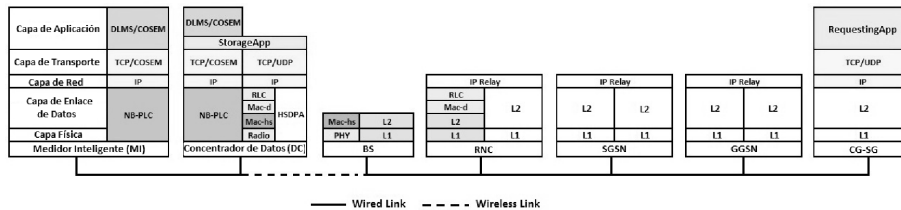


Figura 2. Pila de protocolos: nodos principales del modelo de simulación en NS-2 para el esquema de comunicaciones AMI.

2.2. Protocolo de comunicaciones DLMS/COSEM

El protocolo de comunicaciones DLMS/COSEM es un modelo de comunicación que opera bajo el esquema cliente/servidor, donde el MI desempeña el papel de servidor y el DC, el papel de cliente. Este modelo está soportado por la capa de aplicación COSEM y la capa de

¹Simulador de eventos discretos. Información adicional en: T. Issariyakul and E. Hossain, "Introduction to Network Simulator NS2," Springer: NY, p. 435, 2009.

transporte COSEM-TCP, las cuales permiten a los procesos de aplicación cliente/servidor comunicarse entre sí, por medio del intercambio de mensajes tipo *request/response* y a través del perfil de comunicaciones basado en TCP/IP. La Figura 3 presenta la estructura y los servicios soportados por el modelo.

La estructura, los mensajes, los servicios y los protocolos del modelo de comunicaciones DLMS/COSEM (Figura 3) se encuentran estandarizados en las normas IEC 62056-47 (capa de transporte COSEM TCP para redes IPv4) e IEC 62056-53 (capa de aplicación COSEM). Los procesos de aplicación COSEM cliente/servidor (modelo de interfaces) se describen en la norma IEC 62056-62 [6]. Este trabajo se enfocó en la parte de comunicaciones, es decir, la capa de aplicación COSEM y la capa de transporte COSEM-TCP.

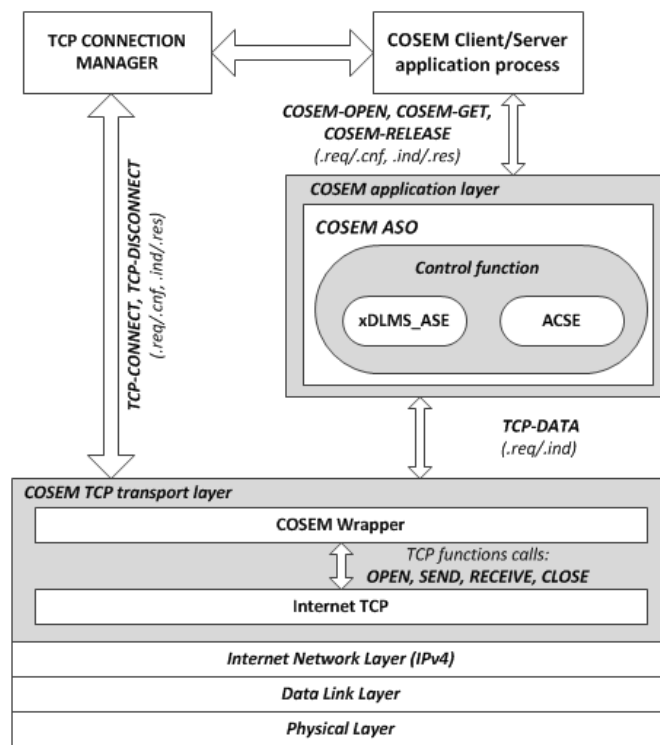


Figura 3. Estructura y servicios: modelo de comunicaciones DLMS/COSEM de los nodos Clientes/Servidor.

Con el fin de lograr la interoperabilidad entre los equipos de medición (MI) y los equipos de recolección (DC) y poder así evaluar por simulación el desempeño del esquema de comunicaciones propuesto, se realizó una extensión al simulador NS-2 mediante la adición de nuevos módulos [7], modelados con conceptos de la programación orientada a objetos (POO), tales como herencia y polimorfismo, los cuales facilitaron la codificación en C++ y permitieron aprovechar las librerías existentes NS-2.

2.3. Modelo de concentrador de datos

Con el fin de no sobrecargar la red celular con el tráfico AMI y reducir así el número de accesos directos, se diseñó e implementó en C++ y se incorporó en NS-2 el componente del concentrador de datos (DC) [7]. Este dispositivo se encarga de recolectar la información generada por los MI dentro del alcance de su red (red local PLC) y de transferirlos al Centro de Control de la compañía de energía en uno o varios paquetes, reduciendo así el número de accesos directos, conexiones, señalización y *overheads* en la comunicación.

El diseño del componente se presenta en la Figura 4. Se compone principalmente de cuatro módulos: (1) *módulo PLC*, hardware NB-PLC para la comunicación con la red de medidores inteligentes; (2) *módulo HSDPA*, módem celular para comunicarse con el Centro de Control; (3) *módulo StorageApp*, encargado de gestionar la memoria del DC y los datos recibidos: permite al módulo PLC almacenar en memoria los datos capturados de la red de medidores para que el módulo HSDPA pueda hacer uso de dichos datos, los procese y los envíe por la red de acceso HSDPA y (4) *módulo COSEMAApp*, contiene el protocolo de comunicación DLMS/COSEM, que permite el intercambio de mensajes entre el DC y los MI conectados a su red. Este último se conecta al hardware NB-PLC. Adicionalmente, el componente posee dos puntos de conexión: (1) *puerto de entrada y salida PLC*, al cual se conecta la línea de potencia de baja tensión perteneciente a la “última milla” (tramo que forma parte la red de medidores inteligentes) y (2) una *antena Tx/Rx HSDPA*, utilizada para acceder a la red celular HSDPA y permitir la comunicación con el Centro de Control.

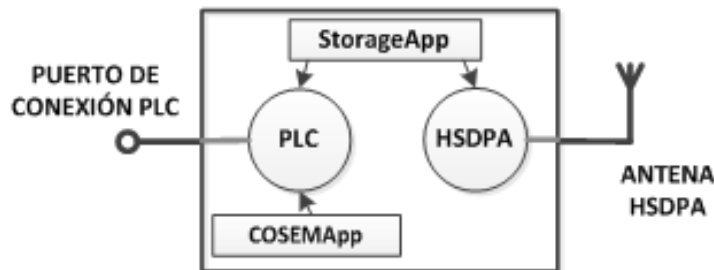


Figura 4. Arquitectura del modelo experimental de concentrador de datos (DC). Se compone de dos módulos de comunicaciones (PLC y HSDPA) y dos módulos de aplicación (COSEMAApp y StorageApp), conectados para constituir un solo nodo NS-2.

Por último, el mecanismo implementado para solicitar datos a los MI utiliza “polling” (siguiendo el estilo de un planificador *Round Robin*). El DC solicita las mediciones a los MI siguiendo un orden predeterminado y mantenido por éste. Una vez culminado el proceso de solicitud de datos a un MI particular, el DC solicita las mediciones al siguiente MI de la lista. Este proceso continúa hasta atender a todos los MI que se encuentran conectados a la red local gestionada por el DC. Empieza una nueva “ronda” (i.e. realiza una nueva solicitud a todos los MI) al expirar el intervalo de tiempo establecido.

3. Escenario y métricas de desempeño

3.1. Escenario

Se propuso el escenario de simulación en NS-2 de la Figura 5 para evaluar y analizar el desempeño del esquema de comunicaciones propuesto para una red AMI. El escenario se compone de:

- Cinco redes locales de medidores inteligentes (MI), pertenecientes a una red de distribución de baja tensión, gestionadas por concentradores de datos (DC) e implementadas sobre PLC. Cada uno de los DC y los MI usa el protocolo DLMS/COSEM para establecer una comunicación con su entidad par (i.e. DC con MI y viceversa).
- Cinco concentradores de datos (DC) con capacidad de hasta 1.000 MI distribuidos sobre una zona urbana (en su mayoría residencial y comercial) y con habilidades de ejecutar mecanismos “polling” para solicitar las mediciones a los MI cada 1 minuto (tiempo coherente para aplicaciones de respuesta de la demanda). El límite del número de MI por DC se estableció teniendo en cuenta las especificaciones técnicas de diferentes DC comercialmente disponibles.
- Una micro-celda HSDPA² de 300 m de radio, configurada con los modelos y parámetros de la Tabla I. Tiene capacidad de atender simultáneamente a los DC y a varios usuarios móviles/fijos que demandan aplicaciones de Internet (FTP y HTTP (web)) y en tiempo real (VOIP (conversación) y Streaming (Video)), distribuidos de forma uniforme sobre el área de cobertura de la celda, dentro de una zona urbana mayoritariamente residencial y comercial, con edificios y casas de alturas uniformes por debajo de la altura de la torre celular. Los MI no necesariamente deben formar parte del área de cobertura de la celda, ya que no utilizan directamente el servicio de la red celular; por el contrario, los DC deben estar dentro del área para poder establecer una comunicación con el Centro de Control *Smart Grid*.
- Una red metropolitana implementada sobre fibra óptica y con capacidad de transportar el tráfico generado por los MI y los servidores.
- Cuatro servidores (VOIP, HTTP, FTP, *video streaming*) y el Centro de Control *Smart Grid* conectados a un enrutador. El Centro de Control corre la aplicación *RequestingAPP*, encargada de solicitar y recibir los datos de los DC cada 3 minutos (intervalo adecuado para aplicaciones de respuesta a la demanda).

La pila de protocolo de las entidades principales del esquema de comunicaciones para una red AMI se detalla en la Figura 2. La configuración e implementación de los nodos que componen la red celular (Nodo B y RNC) y la red metropolitana (SGSN y GGSN) se realizó según la guía de usuario de EURANE [8] y la descripción en [9].

²Haciendo la aclaración de que sólo es posible simular con una estación base (Nodo B) en EURANE [8].

Por último, se listan los supuestos realizados en la configuración de las redes locales PLC:

- Los MI se encuentran distribuidos uniformemente sobre la red local, lo cual implica que el número de MI localizados cerca del DC es menor a los que se encuentran alejados.
- Las distancias al DC (ubicado en el transformador de distribución) son menores a 200 m. Este hecho elimina la necesidad de emplear equipos de regeneración de la señal PLC.
- Todos los MI son capaces de enviar y recibir datos directamente del DC y no establecen ninguna comunicación con sus vecinos u otro medidor fuera de la sección de red. Se conectan al DC en una topología en estrella.

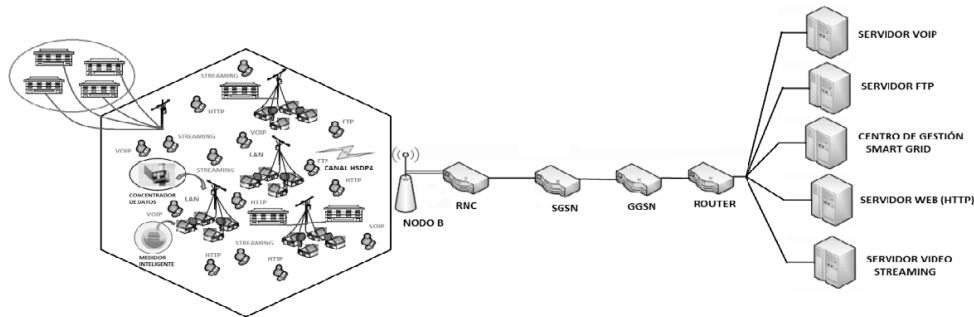


Figura 5. Escenario de simulación montado en NS-2. Se compone de 5 redes locales MIs, gestionada por 5 DCs contenidas en una micro-celda celular HSDPA de 300m de radio. Una red metropolitana sobre fibra óptica y 4 servidores de aplicaciones convencionales y el servidor del Centro de Control o Gestión Smart Grid.

Tabla I. Resumen de configuración de parámetros de la micro-celda
(Basado en [4] [10])

Configuración o Parámetros	Modelo o Valor
Modelo de propagación	COST 231 Walfish-Ikagami
Pérdidas promedio de propagación [dB]	112.33
Radio de la celda [m]	300
Perfil de canal	Pedestrian A
Velocidad UE [km/h]	3
RBS máximo (dBm)	43
Ganancia de la antena (dBi)	17.5
Correlación de distancia (m)	40
Desviación estándar (dB)	8
Interferencia intercelda (dBm)	-70
Interferencia intracelda (dBm)	30

3.2. Métricas de desempeño

En la Tabla II se resumen las métricas de desempeño (requerimientos de calidad o QoS (*Quality of Services*)), los protocolos de transporte y las fuentes de tráfico para cada una de las aplicaciones ofrecidas dentro de la red AMI. Las aplicaciones de Internet (FTP & HTTP) y en tiempo real (VOIP & *video streaming*) fueron configuradas en el escenario de simulación siguiendo las recomendaciones dadas en [4] [10] [11].

Tabla II. Requerimientos de calidad para las aplicaciones ofrecidas
(Basado en [11]–[15])

Aplicación	VOIP	VIDEO	HTTP	FTP	AMI
<i>End-to-End Delay</i>	< 150 ms	< 250 ms	< 400 ms	No límite	< 15 s
PLR	< 10^{-2}	< 10^{-1}	< 10^{-3}	< 10^{-3}	< 10^{-3}
Jitter	< 50 ms	< 2 segs	N.A.	No límite	N.A.
Tasa de datos (Kbps)	4 – 64	20 – 384	–	–	–
Fuente de Tráfico (NS-2)	Exp. ON/OFF	CBR	Pareto ON/OFF	FTP	DLMS/COSEM

4. Resultados

En primer lugar, se discute el impacto que genera el tráfico AMI sobre las métricas de desempeño de las aplicaciones ofrecidas en la red celular, por medio del análisis de resultados de simulación recogidos de varias corridas del escenario (con diferentes semillas), los cuales fueron procesados en Matlab. En cada corrida se incrementó el tráfico AMI enviado al Centro de Control, aumentando el número de MI atendidos por DC en cada una de las redes locales.

En segundo lugar, se analiza el desempeño de la red AMI ante el incremento en la demanda de los servicios de telefonía móvil, manteniendo fijo el número de medidores inteligentes dentro de la red PLC (número obtenido en el primer análisis).

4.1. Tráfico en la red celular (fijo) y tráfico AMI (variable)

La red celular transporta el tráfico generado por los servidores de aplicaciones de Internet y en tiempo real a los diferentes equipos de usuarios o UE (*User Equipments*) que solicitan sus servicios en la microcelda HSDPA. Adicionalmente, transporta el tráfico generado por los MI de las redes locales PLC, el cual es transferido por los nodos DC, a través de la infraestructura de telecomunicaciones hasta el Centro de Control; y por último, las solicitudes de datos emitidas por el Centro de Control a cada uno de los DCs.

Claramente, se puede observar en la Figura 6 que tanto el *Throughput* promedio como el retardo punto a punto promedio por aplicación se mantienen prácticamente constantes ante el incremento del número de MI por red, con variaciones muy pequeñas del orden de microsegundos y de unos cuantos bits/s, debido a la aleatoriedad introducida por el simulador NS-2

en la generación y transmisión de paquetes. Por tanto, el tráfico AMI a través de la red celular favorece la prestación de servicios de Internet y en tiempo real con el caudal de datos suficiente por aplicación y con retardos promedios dentro de los límites establecidos por los requerimientos de calidad.

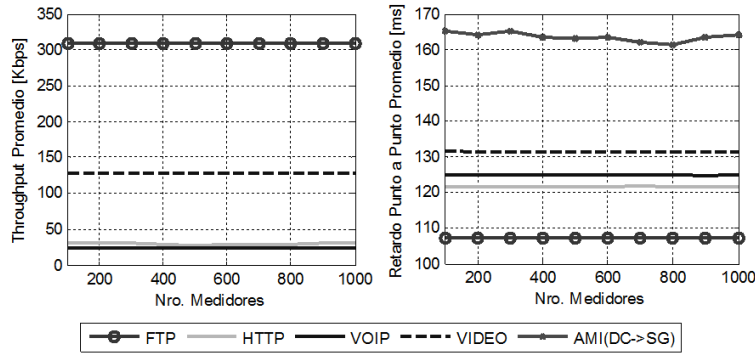


Figura 6. *Throughput* y retardo punto a punto promedio por aplicación. El tráfico AMI no afecta la calidad de servicios de las aplicaciones convencionales ofrecidas.

Con respecto al tráfico AMI a través de la red celular, se observa que el *Throughput* promedio en la dirección DC → Centro de Control (DC → SG) (Figura 7), se incrementa a medida que se aumenta el número de MI, lo cual es lógico, ya que el tráfico transferido por el DC aumenta como resultado del incremento del caudal de datos transferidos por la red de MIs. Sin embargo, está muy por debajo del *Throughput* promedio obtenido para las aplicaciones de Internet y en tiempo real (Figura 6). Lo anterior se debe principalmente al siguiente hecho: la cantidad de datos transferida satisfactoriamente por el DC, durante el mismo de tiempo de observación (2000s), es muy pequeña comparada con la transferida satisfactoriamente por los servidores de las aplicaciones de Internet y en tiempo real; en consecuencia, se obtiene un *Throughput* promedio muy bajo en relación con las demás aplicaciones. Adicionalmente, el *Throughput* promedio se ve afectado por los largos intervalos de tiempo establecidos para solicitar datos, de parte del DC y del Centro de Control (varios segundos en comparación con las demás aplicaciones).

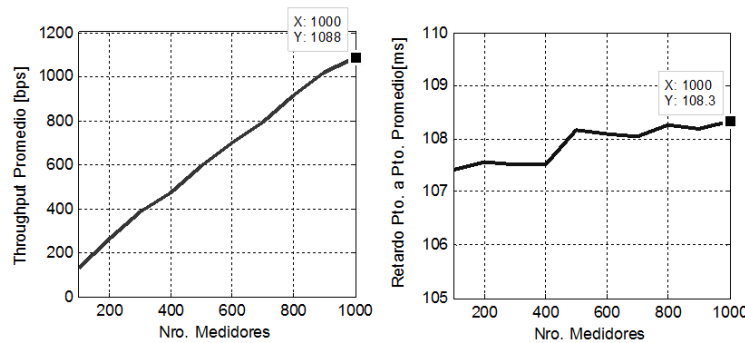


Figura 7. Métricas de desempeño del tráfico AMI sobre la red celular.

Por otro lado, se presentan mayores retardos punto a punto promedios en la transmisión de paquetes en la dirección SG → DC (Figura 6) comparada con la dirección DC → SG

(Figura 7). Las diferencias principales entre las dos direcciones están en el canal físico y en el protocolo de transporte empleado: en la dirección SG → DC se emplea el canal compartido HS-DSCH (*High Speed-Downlink Shared Channel*) y los paquetes son transferidos utilizando el protocolo de transporte no orientado a la conexión, UDP; mientras que en la dirección DC → SG se emplea el canal dedicado DPDCH (*Dedicated Physical Data Channel*) y el protocolo orientado a la conexión, TCP. Los altos retardos promedios presentados en la dirección SG → DC pueden ser ocasionados por los retardos introducidos en las colas de PDU (*Protocol Data Units*) dentro del transmisor del Nodo B (i.e. se transmiten los PDU en el siguiente TTI³) y por el hecho de utilizar un canal compartido por todos los UE.

Por otro lado, el retardo total AMI promedio (Figura 8), es decir, el tiempo empleado desde el momento que se emite la solicitud por parte del Centro de Control hasta que éste recibe los datos transferidos por el DC, es de 3,089 s, intervalo durante el cual se transfieren 26,37 Kbytes en promedio en cada solicitud realizada por el Centro (para un total de 1.000 MI por DC). Este retardo está por debajo del límite establecido por los QoS (Tabla II).

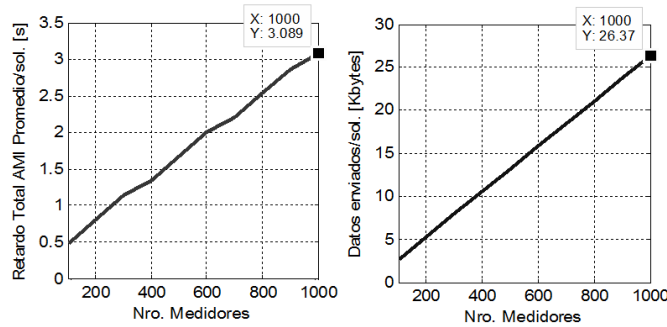


Figura 8. Retardo total promedio y tráfico AMI transferido al Centro.

Tabla III. Tabla comparativa de desempeño entre redes AMI implementadas sobre PLC + HSPA y HSDPA (Basado en [11]–[15])

Métricas	Aplicación	5000 MIs (PLC + HSDPA) ¹	130 MIs (HSDPA)[4]
Retardo punto a punto promedio [ms]	FTP	107,1	346
	HTTP	121,5	235
	VOIP	125	127
	VIDEO	131,3	231
	AMI(DC → SG)	108,3	245
	AMI(SG → DC)	164,1	-
Porcentaje de paquetes recibidos promedio [%]	FTP	99,99	99,99
	HTTP	99,99	99,19
	VOIP	99,99	98,66
	VIDEO	99,99	99,11
	AMI	100	99,99

Por último, en la Tabla III se confrontan los resultados de desempeño obtenidos para el es-

³Transmission Time Interval. En HSDPA es igual a 2 ms.

quema de comunicaciones propuesto en este artículo con el esquema propuesto por los autores en [4]. Ambos esquemas utilizan el protocolo DLMS/COSEM para solicitar las mediciones y configuraciones similares en la microcelda HSDPA (Tabla I). Se puede observar que el esquema propuesto en este artículo presenta un desempeño superior al propuesto en [4], en cuanto a retardos punto a punto, lo cual da garantía de una alta calidad en la prestación de servicios de aplicaciones de Internet y en tiempo real. Además, presenta retardos DC \rightarrow SG de 108,3 ms en la transmisión de bloques de datos AMI (1040 Bytes) y ofrece una alta confiabilidad, por encima del 99,9 % en todas las aplicaciones. Por tanto, bajo este esquema, se logra alto porcentaje de cobertura en número de clientes para la compañía de energía y se reduce el número de accesos a la red celular, dado que acceden únicamente los 5 DC y no los 5.000 MI, lo que permite no sobrecargar la red y garantizar la calidad en los servicios actualmente prestados en la microcelda HSDPA. Este hecho puede motivar a los operadores de telefonía a ofrecer sus servicios de infraestructuras de telecomunicaciones a los operadores de red que los requieran.

4.2. Tráfico en la red celular (variable) y tráfico AMI (fijo)

Dado que el tráfico AMI generado por 5.000 medidores inteligentes no deterioró la calidad de los servicios de telefonía móvil prestados en la microcelda HSDPA, se analizaron escenarios con microceldas de mayor capacidad en número de usuarios⁴, manteniendo fijo el tráfico AMI. Se asumió que dentro de la microcelda predominan los usuarios que demandan servicios de VOIP y navegación por la web (HTTP).

Se derivó una carga de tráfico de aplicaciones de Internet y en tiempo real correspondiente a la carga de una celda de mayor capacidad de usuarios. Sin comprometer la exactitud de los resultados de simulación, se asumió que el tráfico recibido por un usuario (*User Equipment*) dentro de la microcelda, equivale al tráfico que recibirían simultáneamente múltiples usuarios que demandan los servicios de Internet y en tiempo real. Este hecho asume que los usuarios se encuentran ubicados sobre las mismas coordenadas en el escenario de simulación. En escenarios reales, se traduciría en múltiples usuarios muy cerca unos de otros.

La Figura 9 muestra los resultados de simulación obtenidos para diferentes cargas de tráfico de aplicaciones de telefonía móvil. Se escogieron las métricas y las aplicaciones mostradas en la figura, ya que fueron las más afectadas en las diferentes corridas de simulación realizadas.

Claramente se observa que las métricas de desempeño para las aplicaciones de video y *RequestingApp* (más específicamente, las solicitudes generadas por el Centro de Control, SG \rightarrow DC), se deterioran a medida que se incrementa el tráfico dentro de la microcelda, llegando hasta el punto en que ya no es posible garantizar los requerimientos de calidad para el servicio de video. Con 426 usuarios dentro de la microcelda, se obtuvo un retardo punto a punto promedio superior a 250 ms (i.e. no se satisface los QoS establecidos (Tabla II)) y un porcentaje de paquetes recibidos del 97,68 %, es decir, la confiabilidad se redujo un 2,31 % comparado con la confiabilidad obtenida en el análisis anterior (Tabla III). Por tanto, al no garantizar los requerimientos de calidad de servicio (QoS) de las aplicaciones de telefonía, ya no es posible seguir atendiendo a los 5.000 MI. Adicionalmente, el tiempo en que se demoran en llegar las

⁴UEs que demandan simultáneamente los servicios de Internet y en tiempo real. EURANE soporta únicamente 20 nodos UEs simultáneamente dentro una celda celular.

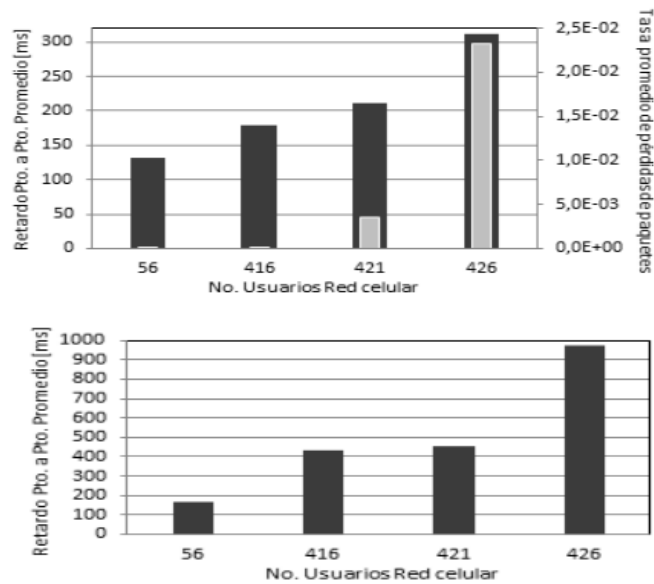


Figura 9. Métricas de desempeño obtenidas al variar el tráfico de las aplicaciones de telefonía móvil. (a) Aplicación de video (*streaming*): barra negra, tasa promedio de pérdidas de paquetes; barra gris, retardo punto a punto promedio (ms). (b) Aplicación *RequestingAPP*.

solicitudes generadas por el Centro a los DC ubicados al borde de la celda, se incrementó de 164,1 ms a 0,970s.

A partir del escenario con 426 usuarios simultáneos atendidos por la estación base ubicada dentro de la microcelda, se realizaron varios ensayos de simulación para determinar el número de MI por red local capaz de soportar la red AMI sin afectar los requerimientos de calidad de las demás aplicaciones. Luego de variar el número de MI por red local, realizando múltiples corridas de simulación, se determinó que con 275 MI por red local se logra prestar todos los servicios de Internet y en tiempo real, y se garantizan los requerimientos de calidad de servicio (QoS) establecidos. Este número sigue siendo favorable, comparado con los 130 MI logrados con el esquema AMI propuesto en [4], para el operador de red que desee desplegar una red AMI en sectores de menor capacidad de clientes.

5. Conclusiones y trabajo futuro

En este artículo se presentaron los resultados del diseño y evaluación del desempeño de un esquema de comunicaciones para una red AMI, usando el simulador de redes NS-2. El esquema combinó las tecnologías PLC (*Power Line Communication*) y HSDPA (*High Speed Downlin Packet Access*), así como el uso de concentradores de datos y de protocolos como DLMS/COSEM y TCP-UDP/IP.

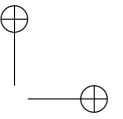
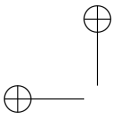
Se extendió el simulador NS-2 introduciendo los módulos: (1) Protocolo DLMS/COSEM de acuerdo con las normas IEC 62056-47 (capa de transporte) e IEC 62056-53 (capa de aplicación) y (2) el componente concentrador de datos (DC).

Los resultados numéricos obtenidos indican que al introducir el concentrador de datos (DC) dentro de la AMI, la red celular, operando bajo condiciones normales, presenta un desempeño superior frente a un esquema que no emplea DC para concentrar la información de diferentes redes de medidores inteligentes (MI) (Tabla III). Adicionalmente, al considerar los DC dentro del esquema AMI se logra mayor cobertura y menor número de accesos directos a la red celular (únicamente acceden a la red 5 DC con capacidad de atender 1.000 MI, sin sacrificar la calidad en los servicios prestados). Sin embargo, para escenarios con mayor números de usuarios simultáneos dentro de la microcelda, se pudo observar que los requerimientos de calidad de las aplicaciones de Internet y en tiempo real, especialmente de los servicios de video (*streaming*), se vieron afectados, lo que implicó reducir el número de MI atendidos por red local (de 1.000 a 275 MI), con el fin de garantizar la calidad de los servicios prestados.

Como trabajo futuro se propone realizar la validación rigurosa del módulo protocolo DLMS-/COSEM por medio de mediciones reales, haciendo uso de equipos de medición y concentración de datos reales.

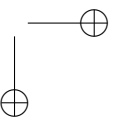
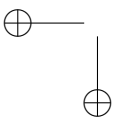
References

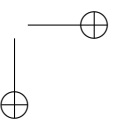
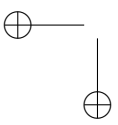
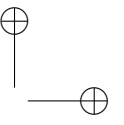
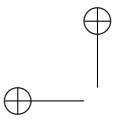
- [1] J. Wang and V. Leung, "A Survey of Technical Requirements and Consumer Application Standards for IP-based Smart Grid AMI Network," in 2011 *Int. Conf. Information Networking (ICOIN)*, pp. 114–119.
- [2] H. Sui, H. Wang, M. Lu, and W. Lee, "An AMI System for the Deregulated Electricity Markets," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 45, no. 6, pp. 2104–2108, December 2009.
- [3] A. Zaballos, "Survey and Performance Comparison of AMR over PLC Standards", *IEEE Transactions of Power Delivery*, vol. 24, No 2, pp. 604-613, April 2009.
- [4] A. M. Ruíz y H. G. Narváez, "Evaluación de desempeño de una red de medidores inteligentes, implementada sobre tecnología celular HSDPA," *Tesis de Magíster, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de los Andes, Bogotá*, pp. 1–154, 2011.
- [5] High-level Smart Meter Data Traffic Analysis, Engage Consulting, United Kingdom, May 2010. Available on: www.engage-consulting.co.uk
- [6] Electricity metering-data exchange for meter reading, tariff and load control: IEC-62056 Parts 47 and 53, IEC, 2006.
- [7] J. M. Aranda, "Evaluación del desempeño de una red AMI implementada sobre las tecnologías PLC y HSDPA," *Bogotá: Tesis Magíster, Universidad de los Andes*, 2012, pp. 1-148.
- [8] EURANE [Online]. Available on: <http://yotrew.blogspot.com/2014/01/patch-ns2-to-support-umts.html>
- [9] A. Alexiou, C. Bouras, and V. Igglesis (2007, March). Performance Evaluation of TCP over UMTS Transport Channels [Online]. Research Unit 6 (RU6) of Computer Technology Institute & Press "Diophantus", University of Patras. Available on: <http://ru6.cti.gr/ru6/publications/>
- [10] I. de BRUIN et al., "Performance Analysis of Hybrid-ARQ Characteristics in HSDPA," *Wireless Personal Communications, Springer*, 2007, pp. 337–353.
- [11] R. Shreevastav, C. McGoldrick, and M. Huggard, "Delivering Improved QoS and Cell Throughput in UMTS Based HSDPA Networks," in 2009 *IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks & Workshops*, pp. 1-9.
- [12] A. Brkanic, A. M. Hadzialic, M. and D. Borovina, "Effects of Choice of MAC Protocol on QoS Parameters in BPL Network," in 2008 *International Symposium ELMAR-2008, Croatia*, pp. 285-288.
- [13] US Department of Energy (October, 2010). Report: Communications Requirements for Smart Grid Technology [Online]. Available on: <http://energy.gov/sites/prod/files/gcprod/documents/>
- [14] 3GPP TS 22.105 Technical Specification, 3GPP, V8.4.0, June 2006.
- [15] ITU-T G.1050, Telecommunication Standardization Sector of ITU, November 2007.

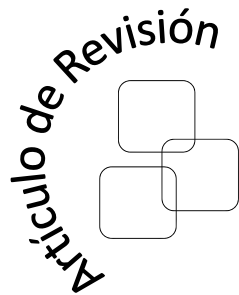


Juan Manuel Aranda L. K.

Nació en Ciudad del Este, Paraguay. Es Ingeniero Electrónico de la Universidad de los Andes, de Bogotá, Colombia. Obtuvo su título de Maestría en Ingeniería en la Universidad de los Andes, de Bogotá, Colombia. Actualmente se desempeña como docente investigador en el área de Telemática en la Universidad Sergio Arboleda de Bogotá, Colombia.
e-mail: juan.aranda@usa.edu.co







Optimización multiobjetivo en la gestión de cadenas de suministro de biocombustibles. Una revisión de la literatura

Multiobjective optimization in biofuel supply chain management. A review of the literature

Johan Alexander Aranda Pinilla
Universidad Católica de Colombia
jaaranda@ucatolica.edu.co

Javier Arturo Orjuela Castro
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
jorjuela@udistrital.edu.co



Resumen

La producción de biocombustibles ha tenido un crecimiento constante durante los últimos años y se espera que este comportamiento se mantenga en el mediano y largo plazo, impulsado principalmente, por las ventajas ambientales que podrían traer en comparación con el combustible fósil, tales como reducción en las emisiones de gases efecto invernadero, balance energético positivo y desarrollo económico para los países productores. Sin embargo, a pesar de sus beneficios, existen preocupaciones por los impactos ambientales y sociales que puede generar su producción y distribución. La teoría de decisión multi-criterio se ha utilizado en los últimos años como marco para integrar los diferentes objetivos en la toma de decisiones en las cadenas de suministro de biocombustibles.

El propósito de este artículo es presentar una revisión de los conceptos y métodos principales de la optimización multiobjetivo, así como la aplicación de éstos en el diseño y planificación de cadenas de suministro de biocombustibles. El estudio muestra que el costo es el objetivo económico más frecuente, las emisiones de efecto invernadero son el objetivo ambiental más utilizado y el número de empleos creados es el criterio social más considerado y se dejan de lado aspectos relevantes como la seguridad alimentaria.

Palabras claves: gestión de la cadena de suministro, biocombustibles, optimización multiobjetivo.

Abstract

Biofuel production has had constant growth in recent years and is expected it keeps growing in the medium and long term, mainly driven by the environmental benefits they could bring compared to fossil fuel, such as the reduction of greenhouse gas emissions, positive energy balance and economic development for producer countries. However, despite its benefits, there are concerns about the environmental and social impacts that its production and distribution may generate. The multi-objective or multi-criteria decision theory has been used in recent years as a framework for integrating the various objectives in decision-making on biofuel supply chains. This article aims to present a review of the main concepts and multi-objective optimization methods as well as their application in the design and planning of biofuel supply chains. The study shows that cost is the most frequent economic objective, greenhouse emissions are the most frequently used environmental objective and the number of created jobs is the most considered social criterion, leaving out important aspects such as food safety.

Key words: supply chain management, biofuels, multi-objective optimization.

Recibido: 11-11-2014
Modificado: 02-03-2015
Aceptado: 12-03-2015

1. Introducción

En la actualidad, los biocombustibles son considerados sustitutos parciales del combustible fósil y tienen una creciente proyección de consumo y producción a mediano y largo plazo [1]. Esta creciente proyección se debe principalmente a las ventajas ambientales que podrían presentar los biocombustibles en comparación al combustible fósil [2], al hecho de que se producen a partir de recursos renovables [3] y adicionalmente porque representan una nueva fuente de ingresos para la agricultura. Sin embargo, a pesar de sus beneficios, existen preocupaciones en cuanto a su producción y distribución [1].

Por un lado, los biocombustibles podrían brindar mayores ganancias económicas, desarrollo rural, reducción de la pobreza y menores emisiones de gases con efecto invernadero [1] [4]. En contraste, la producción de biocombustibles podría llevar a un aumento de la deforestación, contaminación del agua, incremento del uso de agroquímicos, problemas sobre la seguridad alimentaria, en lo que respecta a disponibilidad y acceso a los alimentos, y un empeoramiento de las condiciones laborales, entre otras preocupaciones [5]. En este contexto, la toma de decisiones en las cadenas de suministro de biocombustible debe dirigirse a aprovechar al máximo sus beneficios y a reducir los impactos negativos sobre el ambiente y la sociedad.

Las decisiones en las organizaciones se han basado principalmente en el aspecto económico [6] [7]. Sin embargo, la importancia de equilibrar los objetivos sociales, ambientales y económicos ha creado una conciencia cada vez mayor sobre el diseño y planificación óptima sostenible de las cadenas de suministro. En los últimos años, esfuerzos considerables en investigación se han realizado para ampliar los enfoques actuales y equilibrar los objetivos sociales, ambientales y económicos con el fin de garantizar la sostenibilidad a largo plazo [8] [9]. La teoría de la decisión multiobjetivo o multi-criterio (MCDM – *Multi-criteria decision making*) presenta un marco para integrar múltiples objetivos.

En la literatura se han presentado artículos de revisión sobre técnicas de decisión multi-criterio en cadenas de suministro particulares [9] [8] y genéricas [10]. Dentro de éstos, el artículo de revisión desarrollado más cercano a las cadenas de biocombustible es de el de Cambero y Sowlati [9] sobre la cadena de biomasa forestal, como posible fuente de biocombustible. Sin embargo, dicho artículo se centra en describir cómo se han considerado los aspectos técnico-económicos, ambientales y sociales en la cadena, siendo la mayoría de los modelos evaluados mono-objetivo.

En este trabajo se presentará una revisión de los conceptos y métodos principales de la optimización multiobjetivo y la aplicación de éstos en la gestión de cadenas de suministro de biocombustibles. La revisión incluye diferentes fuentes de materia prima, y el análisis se centra en tipos de modelos y técnicas de solución utilizadas. En la sección 2 se presenta la metodología utilizada para el desarrollo del artículo. La sección 3 presenta los conceptos básicos en la optimización multiobjetivo, se hace la clasificación de los métodos de optimización y se exponen los métodos principales. La sección 4 muestra la importancia que ha tenido en los últimos años la optimización multiobjetivo en el diseño y planificación de las cadenas de suministro. El estado del arte de la aplicación de la optimización multiobjetivo en la gestión de cadenas de suministro de biocombustibles se presenta en la sección 5. Finalmente, en la sección 6 se presenta la discusión y en la sección 7, las conclusiones.

2. Metodología

Para el desarrollo del artículo de revisión se realizaron tres búsquedas en las bases de datos Scopus, IEEE y ProQuest. La primera búsqueda tuvo como objetivo hacer una introducción a la optimización multiobjetivo y determinar cuáles son las técnicas más comunes para la solución de este tipo de modelos y su clasificación. Para identificar las técnicas más utilizadas y las tendencias en el uso de las diferentes técnicas, se cuantificó el número de artículos publicados por grupos de años en la base de datos Scopus.

La segunda búsqueda se hizo con el fin observar la importancia que ha tenido la toma de decisiones multi-criterio o multiobjetivo en las cadenas de suministro en general. Se consideraron artículos y ponencias con el criterio de búsqueda “*Supply Chain*” y posteriormente se limitó la búsqueda a los artículos que tuvieran alguna de las expresiones: “*multi-objective*”, “*multiobjective*” y “*multi-criteria*”. Esta búsqueda se realizó con el fin de analizar la importancia que ha tenido las decisiones multi-criterio o multiobjetivo en las cadenas de suministro en la última década.

Por último, la tercera búsqueda se realizó con el fin de presentar un estado del arte de modelos multiobjetivo en cadenas de suministro de biocombustibles. Para la realización del estado del arte se limitó la búsqueda anterior a los artículos con el criterio “*biofuel*” o “*biodiesel*” o “*bioetanol*” para así considerar las cadenas de suministro de biocombustibles. Posteriormente se hizo la revisión, clasificación y análisis de los artículos seleccionados, considerando tipo y número de objetivos considerados, tipos de modelos y técnicas de solución empleadas.

3. Optimización multiobjetivo

La programación multiobjetivo es una parte de la programación matemática que se encarga de problemas de decisión con múltiples funciones objetivo que deben ser optimizadas sobre un conjunto factible de soluciones [11]. El problema de optimización multiobjetivo general se plantea en la ecuación 1.

$$\begin{aligned} \text{Min} F(x) &= [F_1(x), F_2(x), \dots, F_k(x)] \\ \text{suje}to \text{ a } & x \in X \end{aligned} \quad (1)$$

Donde k es el número de funciones objetivo, x es el vector de variables de decisión y X el espacio de diseño factible, también llamado el espacio de decisión factible o delimitado por el conjunto de restricciones.

Según Marler y Arora [12], se llama optimización multiobjetivo (MOO) al proceso de optimizar de manera sistemática y simultánea una colección de funciones objetivo. En estos casos no hay una solución global única, sino que es necesario determinar un conjunto de puntos que correspondan a las mejores soluciones, conocido como conjunto de Pareto.

En un problema multiobjetivo no se tiene una única función a optimizar, sino un conjunto de n funciones. En estos casos no hay una solución global única, sino que es necesario determinar un conjunto de puntos que se ajusten a una definición predeterminedada de un óptimo. El concepto predominante en la definición de un punto óptimo es el de la optimalidad de Pareto, donde se define que un punto, $x^* \in X$, es un Óptimo de Pareto si y sólo si no existe otro punto, $x \in X$, tal que $F(x) \leq F(x^*)$, y $F_i(x) < F_i(x^*)$ para al menos una función [12].

3.1. Optimización de Pareto

El concepto del óptimo de Pareto se presenta gráficamente en la Figura 1. En la figura, la solución “a” pertenece a conjunto de soluciones óptimas (o soluciones no dominadas) dado que no puede encontrarse una solución “b” tal que mejore uno de los objetivos sin empeorar al menos uno de los otros. En este caso, la solución “c” es dominada por “a” y por “b”.

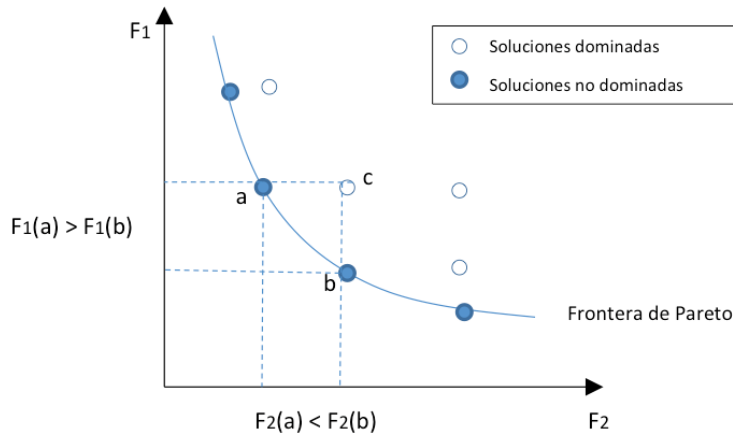


Figura 1. Frontera de Pareto de un problema de Minimización.
Fuente: adaptado de López [13].

El conjunto de Pareto se define entonces como el conjunto de puntos en el espacio de búsqueda que se corresponden con las mejores soluciones al problema de optimización; y la frontera de Pareto, como el conjunto de soluciones óptimas en el espacio objetivo. Este conjunto de soluciones se integra con aquellos puntos encontrados en el espacio objetivo que se corresponden con las soluciones no dominadas, de acuerdo con el criterio de dominancia de Pareto. El concepto de conjunto de Pareto y frontera de Pareto se representan en la Figura 2.

La frontera de Pareto obtenida puede ser lineal, cóncava, convexa, continua o discontinua dependiendo de las funciones objetivo integrantes del problema. Todas las soluciones pertenecientes a la frontera son igualmente buenas, y no se puede especificar si alguna de las soluciones es preferible a las otras, excepto en aquellos casos en que se haya definido una preferencia *a priori*.

En la optimización por métodos de Pareto, el desafío es encontrar la frontera de Pareto real, o lograr la mejor aproximación del mismo sujeta a las limitaciones de recursos (tiempo y memoria) existentes. Por esta razón, el proceso de búsqueda utilizado es decisivo.

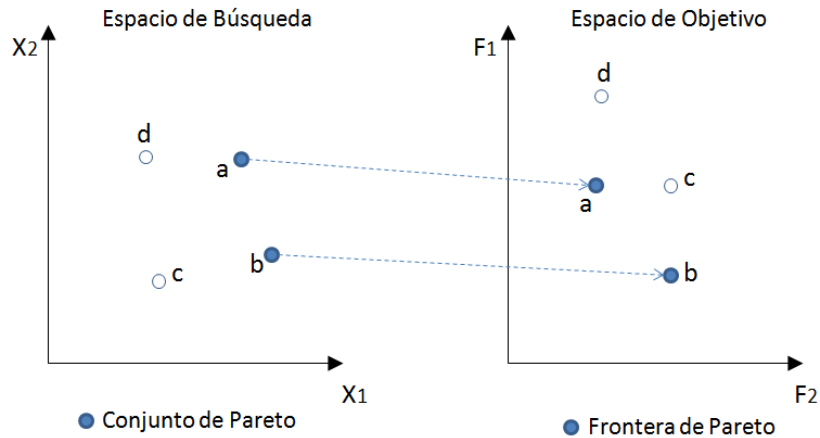


Figura 2. Espacio de búsqueda y espacio objetivo.
Fuente: adaptado de López [13].

3.2. Clasificación de los métodos de solución de modelos matemáticos multiobjetivo

La clasificación por tipo de técnica se hace en dos grupos: el primero es un conjunto de métodos para generar el conjunto de soluciones, basados en optimización de modelos de programación matemática, y el segundo grupo son algoritmos o heurísticas de aproximación al conjunto de Pareto [11]. A su vez, estos métodos, independientemente del tipo de técnica, pueden clasificarse según la manera en que se expresen las preferencias del tomador de decisiones [14] [12]. La clasificación de los métodos se resume en la Figura 3.

A continuación se exponen los diferentes grupos de métodos de optimización multiobjetivo y se nombran los métodos más comunes de cada grupo. Adicionalmente se presentan los principales métodos para la generación del conjunto de soluciones.

3.2.1. Generación de conjunto de soluciones

Existen dos enfoques para generar conjuntos de soluciones de programación multiobjetivo: los métodos de “escalarización” y los métodos de “no escalarización” [11]. Estas clasificaciones se exponen a continuación:

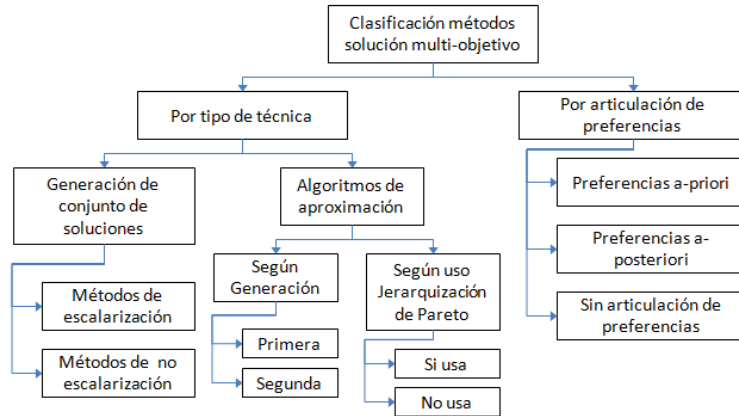


Figura 3. Clasificación de métodos de optimización multiobjetivo.

Métodos de escalarización

Los métodos de escalarización implican la formulación de un modelo mono-objetivo relacionado con el modelo multiobjetivo por medio de una función escalar, de ahí el término escalarización [12]. Ésta única función escalar está en términos de las funciones objetivo del modelo multiobjetivo, escalares auxiliares, un vector de variables o un vector de parámetros.

La Tabla 1 presenta métodos de escalarización más utilizados y el número de artículos encontrados en Scopus hasta el año 2013.

Tabla 1 Número de artículos por método de escalarización publicados en Scopus hasta el año 2013

Método	Nombre en inglés	Total artículos
Programación por metas	<i>Goal programming</i>	969
Suma ponderada	<i>Weighted sum</i>	696
Restricción épsilon	<i>ε-constraint</i>	399
Función logro	<i>Achievement scalarizing function</i>	22
Enfoque de Roy	<i>Roy approach</i>	13
Producto ponderado	<i>Weighted product</i>	13
Esquema de arbitraje de Nash	<i>Nash arbitration scheme</i>	9
Función compromiso	<i>Compromise function</i>	7
Media geométrica ponderada	<i>Weighted geometric mean approach</i>	5
Suma objetivo	<i>Objective sum</i>	4
Enfoque de Pascoletti-Serafini	<i>Pascoletti-Serafini approach</i>	4
Método de Benson	<i>Benson's method</i>	3
Norma ponderada	<i>Weighted norm</i>	3
Criterio global ponderado	<i>Weighted global criterion</i>	3
Restricción elástica	<i>Elastic constraint approach</i>	2
Exponencial ponderado	<i>Exponential weighted</i>	2
Producto objetivo	<i>Objective product</i>	2
Potencia media ponderada	<i>Weighted power mean</i>	2

Fuente: elaboración propia con base en datos de Scopus.

El método de escalarización para modelos con múltiples objetivos con mayor número de artículos es la programación por metas, seguido del método de suma ponderada y de la restricción épsilon (ε -constraint). La Figura 4 muestra los artículos encontrados por rangos de fechas de los cuatro métodos más utilizados. A continuación se presenta una explicación de los métodos de escalarización más utilizados.

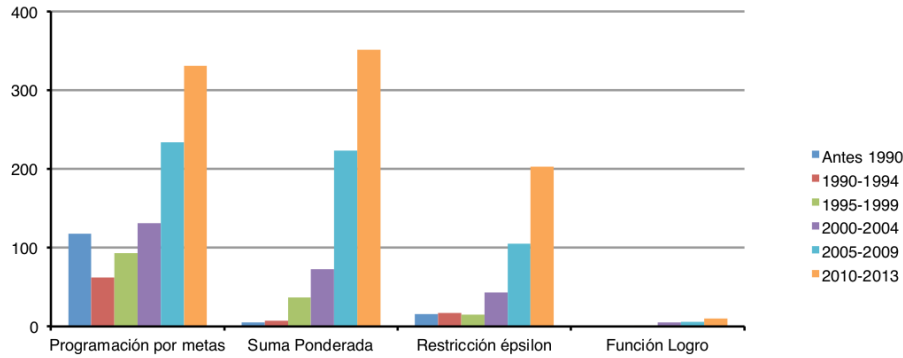


Figura 4. Número de artículos de métodos de escalarización por rangos de fechas

Fuente: elaboración propia con base en datos de Scopus.

En la programación por metas se especifican metas para cada función objetivo y la formulación básica se presenta en la Ecuación 2.

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad & D = \sum_{i=1}^k (d_i^+ + d_i^-) \\
 \text{sujeto a} \quad & F_i(x) - d_i^+ + d_i^- = b_i \quad i = 1 \dots, k \\
 & x \in X \\
 & d_i^+, d_i^- \geq 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

Donde D es la sumatoria total de las desviaciones, las variables d_i^+ y d_i^- son las desviaciones por encima y por debajo obtenidas para cada meta, b_i es la meta definida para cada objetivo, $F_i(x)$ es la i -ésima función objetivo y k es el número de objetivos. El modelo busca minimizar la desviación total de las metas [11].

La programación por metas ponderada (*weighted goal programming*) constituye una subclase del método de programación por metas, en la que se asignan pesos a la desviación de cada objetivo de su meta respectiva.

El segundo método de escalarización con mayor número de artículos es el de la suma ponderada (U). Este método escalariza el conjunto de objetivos en un solo objetivo multiplicando cada objetivo con un peso definido previamente (w_i). Un modelo multiobjetivo escalarizado con este método tiene la forma presentada en la Ecuación 3.

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & U = \sum_{i=1}^k w_i F_i(x) \\ \text{suje}to \quad & x \in X \end{aligned} \quad (3)$$

Si todos los pesos son positivos y la frontera de Pareto es convexa, la minimización de la función objetivo establece una condición suficiente para el óptimo de Pareto, es decir, el mínimo de la función siempre será un óptimo de Pareto [15]. Gráficamente, la escalarización y el punto óptimo obtenido se presentan en la Figura 5.

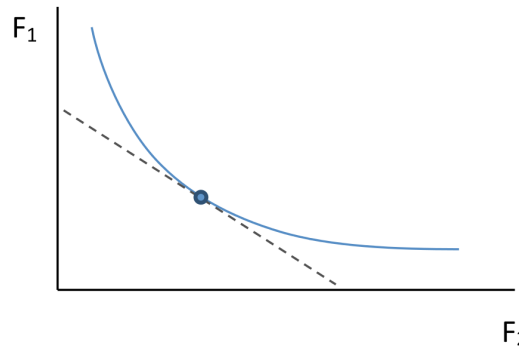


Figura 5. Representación gráfica del método de suma ponderada.

Fuente: elaboración propia con base en Alanazi, Abdullah y Larbani [16].

En la Figura 5 se representa la frontera de Pareto de un modelo con dos funciones objetivo. La pendiente de la función objetivo escalarizada (suma ponderada de las funciones objetivo individuales F_i) está determinada por el peso dado cada objetivo. Si se varían dichos pesos, se pueden obtener diferentes puntos de la frontera de Pareto.

El tercer método de escalarización con mayor número de artículos es el de la restricción épsilon (ϵ -constraint) propuesto por Haimes en 1971, que se basa en una escalarización donde una de las funciones objetivo se optimiza mientras que todas las otras funciones objetivo están limitadas por medio de restricciones adicionales [17]. La formulación tiene la forma de la Ecuación 4.

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & F_j(x) \\ \text{suje}to \quad & F_i(x) \leq \epsilon_i \quad i = 1 \dots, k; i \neq j \\ & x \in X \end{aligned} \quad (4)$$

Donde los ϵ_i representan los valores de las funciones objetivos y se van alterando para obtener el conjunto óptimo de Pareto en un rango deseado. Gráficamente se observa el procedimiento en la Figura 6.

La Figura 6 describe una frontera de Pareto de un modelo con dos funciones objetivos, donde se minimiza la primera (F_1) y se restringe la segunda (F_2). El valor ϵ_2 representa el valor al que se restringe F_2 y con cada nivel de ϵ_2 se obtiene un punto óptimo de Pareto.

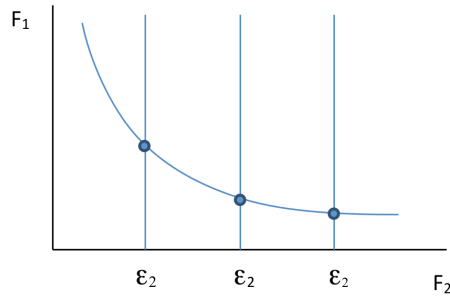


Figura 6. Representación gráfica del método ε -constraint.

Métodos de no escalarización

Los métodos de no escalarización, implican un breve tratamiento independiente de cada función objetivo [12]. En contraste con los métodos de escalarización, no utilizan explícitamente una función de escalarización sino que se basan en otros conceptos de optimalidad o conjuntos auxiliares y por lo general se vinculan con conceptos de eficiencia [11]. La Tabla 2 presenta los métodos de no escalarización más utilizados y el número de artículos encontrados en Scopus hasta el año 2013.

Tabla 2. Métodos de no escalarización publicados en Scopus hasta el año 2013

Método	Nombre en inglés	Total artículos
Lexicográfico	<i>Lexicographic method</i>	232
Programación física	<i>Physical programming</i>	83
Intersección de frontera normal	<i>Normal boundary intersection (NBI)</i>	71
Restricción normalizada	<i>Normal constraint (NC)</i>	30
Min-Max ponderado/Método Tchebycheff	<i>Weighted min-max / Wheighted Tchebycheff method</i>	21
Min-max/Enfoque max-ordenado	<i>Min-max method/Max-ordering method</i>	18
Conjunto de nivel	<i>Level set method</i>	5
Lexicográfico max-ordenado	<i>Lexicographic max-ordering</i>	3
Polak	<i>Modified Polak or Polak-based method</i>	2

Fuente: elaboración propia con base en datos de Scopus.

El método con mayor número de artículos publicados es el lexicográfico, seguido de la programación física, intersección de frontera normal (NBI) y restricción normalizada (NC). La Figura 7 muestra los artículos encontrados por rangos de fechas de los cuatro métodos más utilizados. A manera de ejemplo se expone a continuación la técnica de no escalarización más utilizada.

En el método lexicográfico, las funciones objetivo están dispuestas en orden de importancia. Así, posteriormente se resuelve el problema de optimización de un objetivo a la vez siguiendo el orden de importancia. La formulación matemática se presenta en la Ecuación 5.

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} && F_i(x) \\
 & \text{suje}to && a \quad F_j(x) \leq F_j^*(x) \quad j = 1, \dots, i - 1, i > 1, i = 1 \dots, k \\
 & && x \in X
 \end{aligned} \tag{5}$$

En este caso, i representa la posición de una función en el orden de preferencia, y $F_j^*(x)$ representa el óptimo de la función objetivo j -ésima, encontrada en la j -ésima iteración.

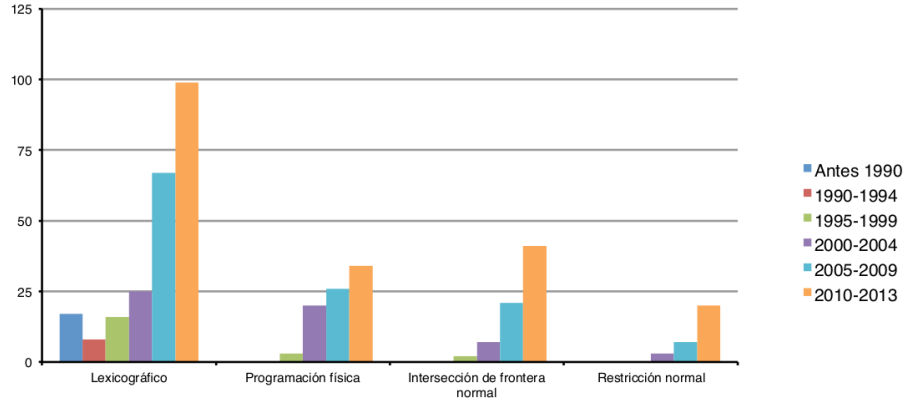


Figura 7. Número de artículos de métodos de no escalarización por rangos de fechas.

Fuente: elaboración propia con base en datos de Scopus.

3.2.2. Algoritmos de aproximación

En la mayoría de problemas multiobjetivo no es fácil obtener una descripción exacta del conjunto de Pareto debido a que puede abarcar un número muy grande o infinito de puntos. Aunque en teoría es posible encontrar estos puntos exactamente, es computacionalmente difícil y costoso. Considerando lo anterior, una descripción aproximada de este conjunto de Pareto obtenida mediante un algoritmo de aproximación puede resultar conveniente dado que requiere menos esfuerzo y muchas veces puede ser lo suficientemente precisa para desempeñar el papel del conjunto de soluciones y apoyar con eficacia la toma de decisiones [11].

Los enfoques de aproximación emplean un método iterativo para producir puntos que se aproximen el conjunto de Pareto. Algunos enfoques son exactos y se basan en algoritmos que aseguran la obtención de óptimos de Pareto, mientras que otros enfoques se basan en heurísticas que no necesariamente aseguran que los puntos encontrados sean óptimos de Pareto.

Existen varios tipos de heurísticas para la solución de problemas multiobjetivo dentro de los que se encuentran los algoritmos evolutivos (EA), recocido simulado (simulated annealing, SA), búsqueda tabú (tabu search, TS), colonia de hormigas (ant colony, AC), aprendizaje por refuerzo distribuido (distributed reinforcement learning, DRL), algoritmos meméticos (memetic algorithms, MA) y técnicas híbridas. Las técnicas más trabajadas en problemas multiobjetivo han sido los algoritmos evolutivos conocidos como MOEA (multi-objective evolutive algorithm) [18].

El potencial de los algoritmos evolutivos para resolver problemas de optimización multiobjetivo se remonta a finales de los sesenta en que la tesis doctoral de Rosenberg en 1967 indicó la posibilidad de usar algoritmos genéticos en este dominio. Sin embargo, el primer algoritmo evolutivo para problemas multiobjetivo es el algoritmo genético vector evaluado (VEGA) desarrollado por Schaffer en 1984 [18]. La Tabla 3 presenta los algoritmos evolutivos más utilizados y el número de artículos encontrados en Scopus hasta el año 2013.

Tabla 3. Algoritmos evolutivos multiobjetivo publicados en Scopus hasta el año 2013

Método	Nombre en inglés	Acronimo	Total Artículos
Algoritmo genético de clasificación no dominada II	<i>Nondominated sorting genetic algorithm II</i>	NSGA II	2567
Algoritmo genético multiobjetivo	<i>Multi-objective genetic algorithm</i>	MOGA	883
Algoritmo evolutivo de fuerza de Pareto	<i>Strength Pareto evolutionary algorithm</i>	SPEA	159
Algoritmo genético de clasificación no dominada	<i>Nondominated sorting genetic algorithm</i>	NSGA	146
Estrategia de evolución con archivo de Pareto	<i>Pareto archived evolution strategy</i>	PAES	96
Algoritmo evolutivo de fuerza de Pareto II	<i>Strength Pareto evolutionary algorithm II</i>	SPEA II	85
Algoritmo genético para el vector evaluado	<i>Vector evaluated genetic algorithm</i>	VEGA	41
Algoritmo genético de nicho de Pareto	<i>Niched-Pareto genetig algorithm</i>	NPGA	32
Algoritmo de selección por envolvente de Pareto II	<i>Pareto envelope-based selection algorithm II</i>	PESA II	16
Algoritmo inmune de vecino no-dominado	<i>Nondominated Neighbor Immune Algorithm</i>	NNIA	14
Algoritmo de selección por envolvente de Pareto	<i>Pareto envelope-based selection algorithm</i>	PESA	11
Algoritmo de selección clonal de memoria inmune de rango preferencia	<i>Preference rank immune memory clone selection algorithm</i>	PISA	9
Algoritmo genético desordenado multiobjetivo II	<i>Multi-objective messy genetic algorithm II</i>	MOMGA II	6
Algoritmo genético de nicho de Pareto II	<i>Niched-Pareto genetig algorithm II</i>	NPGA II	1
Algoritmo genético desordenado multiobjetivo	<i>Multi-objective messy genetic algorithm</i>	MOMGA	1

Fuente: elaboración propia con base en datos de Scopus.

Los cinco algoritmos evolutivos con mayor número de artículos son NSGA II, MOGA, SPEA, NSGA y PAES, que representan el 95 % de artículos encontrados. En la Figura 8 se presenta el total de artículos por rangos de fechas de estos métodos.

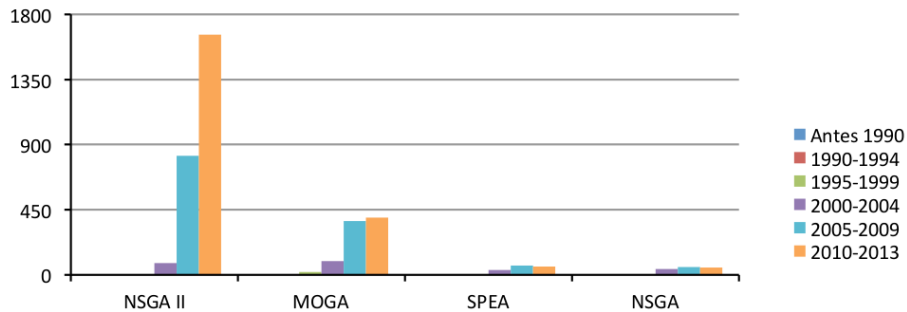


Figura 8. Número de artículos evolutivos por rangos de fechas

Fuente: elaboración propia con base en datos de Scopus.

En la Figura 5 se observa que el número de artículos publicados relacionados con el método NSGA II ha venido creciendo constantemente desde el año 2000. Los demás métodos (MOGA, SPEA y NSGA) han variado poco entre los rangos 2005-2009 y 2010-2013, lo que demuestra una estabilidad en el número de artículos publicados por año. De la investigación, los métodos NNIA, PESA y PISA, a pesar de que tienen pocas publicaciones, han tenido un número creciente de artículos en la última década.

Los MOEA se clasifican en dos tipos: 1) Los algoritmos que no incorporan el concepto de óptimo de Pareto en el mecanismo de selección del algoritmo evolutivo, y 2). Los algoritmos que jerarquizan la población de acuerdo a si un individuo es dominado o no dominado (usando el concepto de óptimo de Pareto).

Adicionalmente, también se puede considerar que ha habido dos generaciones de algoritmos evolutivos multiobjetivo. La primera generación se caracteriza por el uso de jerarquización de Pareto y nichos, y por ser algoritmos relativamente simples [18]. La segunda generación se centra en la eficiencia computacional y se introduce el concepto de elitismo, donde se usan poblaciones secundarias (o externas) para generar soluciones que sean no dominadas y

uniformemente distribuidas [19]. En la Tabla 4 se presenta un clasificación de los MOEA por generación y por si usan la jerarquización de Pareto.

Tabla 4. Clasificación de los algoritmos evolutivos multiobjetivo

Método	Generación		Jerarquización de Pareto	
	1 ^a	2 ^a	Sí	No
VEGA	X			X
MOGA	X		X	
NSGA	X		X	
NPGA	X		X	
NPGA II	X		X	
SPEA		X	X	
SPEA II		X	X	
NSGA II		X	X	
MOMGA		X	X	
MOMGA II		X	X	
PAES		X	X	
PESA		X	X	
PESA II		X	X	
NNIA		X	X	
PISA		X	X	

Fuente: elaboración propia con base en datos de en Coello Coello [18] y Túpac [19].

3.2.3. Clasificación según la articulación de preferencias

Según De Weck [14], los métodos de optimización multiobjetivo pueden descomponerse en dos categorías: métodos con expresión de preferencias *a priori* y métodos con expresión de preferencias *a posteriori*. La diferencia fundamental entre estas categorías es si la información de preferencias de los objetivos es definida antes del proceso de optimización o se realiza después de generar y evaluar el conjunto de soluciones que hacen parte de la frontera de Pareto.

Los métodos con preferencias *a priori* permiten especificar previamente las preferencias, que pueden ser articuladas en términos de objetivos o de importancia relativa de los diferentes objetivos (pesos). La mayoría de estos métodos incorporan parámetros, que son los coeficientes, exponentes y límites de restricción que pueden estar ajustados para reflejar las preferencias del tomador de decisiones, o ser alterados de forma continua para representar el conjunto óptimo de Pareto completo [12]. Dentro de los métodos con preferencias *a priori* más conocidos se encuentran los métodos: suma ponderada (*weighted sum*), ϵ -constraint, programación por metas (*goal programming*), método lexicográfico y min-max ponderado.

En otros casos, puede resultar difícil para el tomador de decisiones expresar una aproximación explícita de la función de preferencia. Por lo tanto, resulta conveniente tener un conjunto de soluciones de donde el tomador de decisiones pueda escoger. Para este fin, se utiliza un algoritmo para determinar una representación del conjunto óptimo de Pareto. Estos métodos incorporan una articulación *a posteriori* de las preferencias, donde se generan primero soluciones y después se elige después la que se considere la mejor decisión [20]. Los métodos con preferencias *a posteriori* más utilizados son intersección de frontera normal (NBI) y restricción normal normalizada (NC).

Marler y Arora [12] sostienen que existe una tercera categoría que son los métodos que no tienen articulación de preferencias. Estos métodos se aplican cuando en la toma de decisiones no pueden definirse concretamente las preferencias del tomador de decisiones. La mayoría de estos métodos son simplificaciones de los métodos de preferencias *a priori* con la exclusión de los parámetros del método. En esta categoría se encuentra el método min-max y el método de la función logro (*achievement function*), entre otros menos difundidos, como producto objetivo y suma objetivo.

4. Modelos de optimización multiobjetivo de la cadena de suministros

En las últimas décadas, se ha prestado atención a la minimización del impacto ambiental en las operaciones industriales a causa de regulaciones ambientales. Como resultado, la gestión de la cadena de suministro (SCM) ha venido pasando de un enfoque específico, centrado en los costos, a un enfoque más amplio que busca la sostenibilidad de la cadena.

La importancia de equilibrar los objetivos sociales, ambientales y económicos en el desarrollo de las empresas ha creado una conciencia cada vez mayor sobre el diseño y planificación sostenible de las cadenas de suministro. En los últimos años, la investigación ha buscado ampliar los enfoques actuales en SCM para capturar estos objetivos con el fin de garantizar la sostenibilidad a largo plazo. La combinación de la gestión ambiental y SCM en un marco único ha dado lugar recientemente a una nueva disciplina conocida como GSCM [8].

Para observar la importancia que ha tenido la inclusión de múltiples objetivos en las cadenas de suministro, se realizó una búsqueda de artículos y conferencias publicados sobre el tema y se comparó con las publicaciones sobre cadenas de suministro en general. La búsqueda se hizo en las bases de datos Scopus, IEEE y ProQuest utilizando la palabra de búsqueda “*Supply Chain*”. Posteriormente, se limitó la búsqueda a los artículos que tuvieran alguna de las siguientes expresiones: “*multi-objective*”, “*multiobjective*”, “*multi-criteria*” y “*multi-criteria*”. La Figura 9a muestra el número de artículos publicados por año sobre cadenas de suministro en general, mientras las Figura 9b muestra los artículos que tratan de múltiples objetivos en las cadenas.

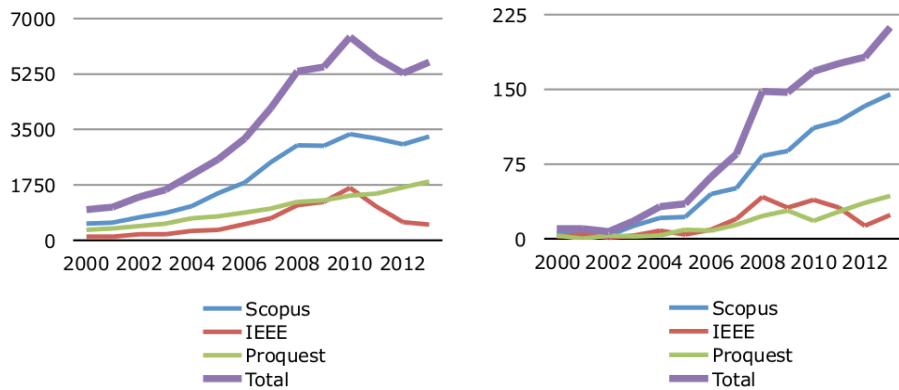


Figura 9. Número de artículos multiobjetivo en SCM y MO-SCM entre 2000 y 2013.

Fuente. elaboración propia con base en datos de Scopus, IEEE y ProQuest.

Las publicaciones sobre cadenas de suministro tuvieron un crecimiento constante desde finales de los años setenta, principalmente a partir del año 2000, hasta el año 2008, lo que evidencia la relevancia del tema en esta época. Sin embargo, después de este año el número de publicaciones se ha estabilizado, con decrecimiento en algunos años.

Por su parte, las publicaciones de cadenas de suministro con múltiples objetivos han venido creciendo constantemente desde el año 2003. Desde el año 2000 hasta final del año 2013 se han publicado un total 1.292 de estos artículos en las bases de datos consideradas, donde el 80 % pertenece a los últimos 6 años, lo que muestra la importancia que el tema ha tenido en la última década.

Hasta hace 10 años, el porcentaje de artículos que trataban múltiples objetivos no superaba el 1 % sobre el total de artículos de cadenas de suministro. En el año 2013, este porcentaje es cercano al 4 % y tiene una tendencia creciente, por lo que se espera que cada vez más se utilicen técnicas multi-criterio en la toma de decisiones en SCM.

5. Modelos multiobjetivo en cadenas de suministro de biocombustibles

La búsqueda de artículos y artículos de conferencias se realizó en las bases de datos Scopus, IEEE y ProQuest utilizando las palabras de búsqueda “*Supply chain*”, “*Biofuel*” y alguno de los siguientes criterios: “*multi-objective*”, “*multiobjective*”, “*multi-criteria*” y “*multicriteria*”. La búsqueda, que no se limitó en un periodo de tiempo determinado, arrojó un total de 27 artículos. El número de artículos por año se presenta en la Figura 10.

El primer artículo sobre cadenas de suministro de biocombustibles con múltiples objetivos que aparece en las bases de datos se publicó en el año 2008, y la mayoría de artículos (93 %) se publicó a partir del año 2011, lo que muestra la reciente importancia que ha tenido el tema.

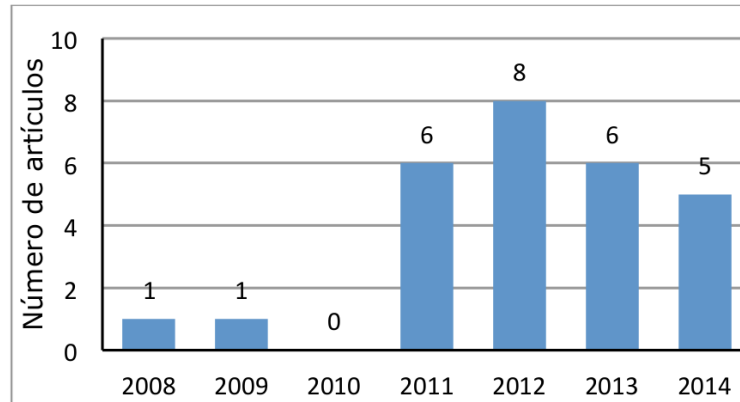


Figura 10. Número de artículos multiobjetivo en cadenas de suministro de biocombustibles por año.

Los artículos presentan objetivos principalmente en cuatro ámbitos (o categorías): técnicos, ambientales, sociales y económicos (en esta última categoría se consideran también los objetivos financieros). En la Figura 11 se presenta cada aspecto como un círculo y el número en paréntesis corresponde al número de artículos que se encontraron en cada categoría o grupos de categorías.

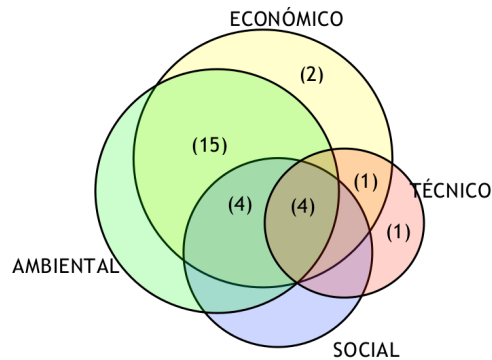


Figura 11. Clasificación de los artículos sobre optimización multiobjetivo en la cadena de suministros de biocombustibles.

La mayoría de artículos sobre optimización multiobjetivo encontrados en SCM de biocombustibles tienen objetivos en dos categorías que son la económica y la ambiental. Esta combinación de objetivos ocupa el primer lugar con un total de 15 artículos, representando un 55,6% del total de artículos. En segundo y tercer lugar se encuentran los artículos que abarcan los campos económico, ambiental y social (con 4 artículos, correspondiente al 14,8%) o los 4 campos simultáneamente (también con el 14,8%). Posteriormente se encuentran los 2 artículos con múltiples objetivos económicos (7,4%) y finalmente se encuentra un solo artículo con múltiples objetivos técnicos y otro con objetivos técnicos y económicos. Cada uno de estos últimos grupos representa un 3,7% sobre el total de artículos.

En cada uno de los cuatro campos se pueden considerar más de un objetivo, por ejemplo con 2 o más objetivos económico-financieros, como la minimización del costo y del riesgo financiero. El número de objetivos encontrados en los artículos se presentan en la Figura 12.

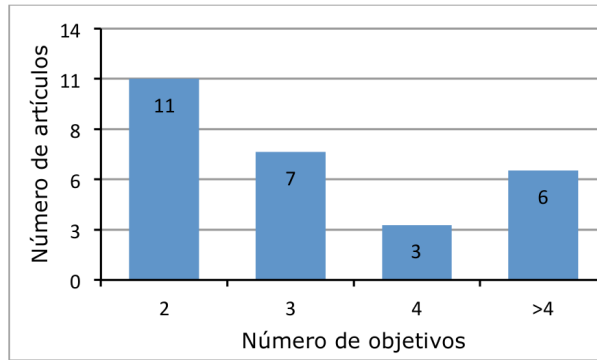


Figura 12. Número de objetivos considerados en los artículos.

La mayoría de artículos son bi-objetivo (41 %), seguido de los artículos con tres objetivos (26 %). Los artículos con 3 objetivos representan el 11 % del total y el porcentaje restante (22 %) corresponde a artículos que manejan más de 4 objetivos.

En cuanto a los modelos matemáticos utilizados en los artículos, 27 artículos de los 22 utilizan modelos de programación matemática, en los que se encuentran, principalmente, los modelos de programación lineal entera mixta (MILP), programación lineal entera mixta estocástica (SMILP), programación no lineal entera mixta (MINLP) y programación fraccional lineal entera mixta (MILFP). El número de artículos que utilizaron cada tipo de modelo se presenta en la Figura 13.

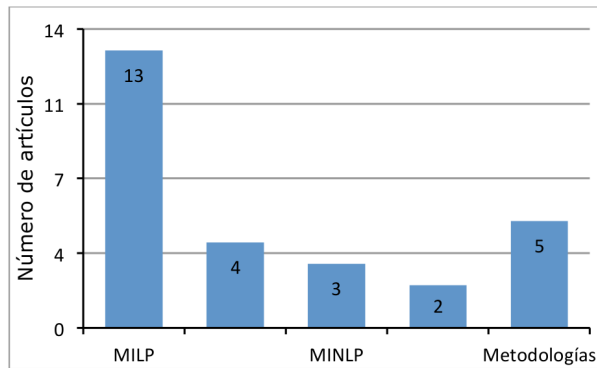


Figura 13. Número de artículos por tipo de modelo matemático.

Los artículos que contemplan más de 4 objetivos no utilizan modelos de programación matemática, sino metodologías propias del análisis de decisión multi-criterio, como el método TOPSIS (técnica para orden de preferencia por similitud con solución ideal).

Por otro lado, las técnicas que se utilizaron para solucionar los 22 modelos de programación matemática, ya fuera hallando la frontera de Pareto o un solo punto de solución, son mostradas en la Tabla 5.

Tabla 5. Número de artículos por técnica de solución

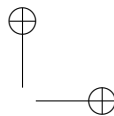
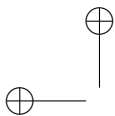
Técnica de solución	Nº artículos
Restricción épsilon	12
Función compromiso	1
Programación por metas	1
No definido	8

La técnica más utilizada es el método de restricción épsilon, con un total de 54,5 % de los artículos, para solucionar modelos MILP, MINLP y MILFP. La función compromiso se aplicó para solucionar un modelo estocásticos SMILP y la programación por metas, para solucionar un modelo MINLP. Ocho artículos no definieron el método que utilizaron para encontrar la solución de los modelos.

En la Tabla 6 se presentan los datos principales de los artículos revisados, agrupados por los campos, iniciando con los que tienen múltiples objetivos en un solo campo y terminando con los que tienen objetivos en los 4 campos.

Tabla 6. Clasificación de artículos multiobjetivo en cadenas de suministro de biocombustibles

Nº	Aspectos	Autor(es)	Ref.	Modelo	Técnica Solución	Metodología	Nº objetivos
1	Económicos	Kostin <i>et al.</i>	[21]	MILP	ε -constraint	-	2
2		Gebreslassie, Yao y You	[22]	SMILP	ε -constraint	-	2
3	Técnicos	Huang y Pang.	[23]	SMILP	-	-	4
4	Técnicos y económico	El-Halwagi <i>et al.</i>	[24]	MINLP	ε -constraint	-	2
5	Económicos y ambientales	Zamboni <i>et al.</i>	[25]	MILP	-	-	2
6		Liu <i>et al.</i>	[26]	MINLP	-	-	2
7		Giarola <i>et al.</i>	[27]	MILP	-	-	2
8		Marvin <i>et al.</i>	[28]	MILP	-	-	2
9		Akgul <i>et al.</i>	[29]	MILP	ε -constraint	-	2
10		Čuček <i>et al.</i>	[30]	MILP	ε -constraint	-	7
11		Kostin <i>et al.</i>	[31]	MILP	-	-	6
12		Ubando <i>et al.</i>	[32]	-	-	Enfoque Difuso	4
13		Bernardi <i>et al.</i>	[33]	MILP	-	-	3
14		Ortiz <i>et al.</i>	[34]	MILP	ε -constraint	-	2
15		Yue <i>et al.</i>	[35]	MILFP	ε -constraint	-	2
16		Xie y Huang.	[36]	SMILP	CM	-	2
17		Liu <i>et al.</i>	[37]	MILFP	ε -constraint	-	3
18		Nixon <i>et al.</i>	[38]	MINLP	GP	-	4
19	Liu <i>et al.</i>	[39]	MILP	ε -constraint	-	3	
20	Económicos, ambientales y sociales	Capón <i>et al.</i>	[40]	MILP	ε -constraint	-	3
21		You y Wang.	[41]	SMILP	ε -constraint	-	3
22		You <i>et al.</i>	[42]	MILP	ε -constraint	-	3
23		Santibañez-Aguilar <i>et al.</i>	[43]	MILP	-	-	3
24	Económicos, ambientales, sociales y técnicos	Turksin <i>et al.</i>	[44]	-	-	MAMCA	n
25		Halog yManik.	[45]	-	-	Metodología propuesta	n
26		Zhou <i>et al.</i>	[46]	-	-	Fuzzy TOPSIS	9
27		Madugu yCollu.	[47]	-	-	TOPSIS	n



MILP: programación lineal entera mixta; SMILP: programación lineal entera mixta estocástica; MINLP: programación no lineal entera mixta; MILFP: programación fraccional lineal entera mixta; CM: Función compromiso; GP: programación por metas.

A continuación se exponen los objetivos de cada modelo siguiendo el orden de agrupación de la Tabla 6.

5.1. Modelos con múltiples objetivos en un solo campo

Kostin *et al.* [21] plantean un modelo matemático para la cadena de bioetanol de caña de azúcar en la Argentina, donde se busca determinar un plan de ampliación de capacidad, de producción y de inventario considerando dos objetivos en la categoría económica y financiera: maximizar el valor presente neto (VPN) y mitigar riesgos financieros. Gebressie *et al.* [22] también proponen un modelo con dos objetivos en esta categoría: minimizar el costo anualizado y el riesgo financiero. En este caso, el modelo tiene un enfoque estocástico en dos etapas, donde son comparados los resultados de un modelo determinístico con los de un modelo estocástico. El modelo desarrollado busca determinar el diseño óptimo de la red, la selección de la tecnología, la inversión de capital, las operaciones de producción y las decisiones de gestión de la logística. La estructura del modelo propuesto y el algoritmo de solución se aplican en cuatro casos de cadenas de hidrocarburos en el estado de Illinois, en Estados Unidos.

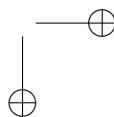
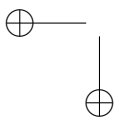
Finalmente, Huang y Pang [23] presentan un modelo matemático para la producción de etanol a partir de residuos de biomasa en California. El modelo busca establecer la infraestructura de sistema de biocombustibles que sea eficaz y resistente contra riesgos potenciales a través de la integración de cuatro objetivos de la capacidad de resiliencia o recuperación: la robustez, la rapidez, la redundancia, y la inventiva.

5.2. Modelos matemáticos con objetivos económicos y técnicos

El único artículo revisado en el grupo de modelos que incluyen objetivos económicos y técnicos es de El-Halwagi *et al.* [24], el cual pretende minimizar el costo de la cadena y a su vez el riesgo acumulado asociado a las etapas clave del ciclo de vida de una biorrefinería, incluyendo el almacenamiento, transporte de biomasa, conversión y almacenamiento de productos. El modelo es no lineal y tiene el propósito de establecer las relaciones entre el costo y los problemas de seguridad en la selección, ubicación y dimensionamiento de una biorrefinería.

5.3. Modelos matemáticos con objetivos económicos y ambientales

El grupo con más artículos es el de modelos con objetivos económicos y ambientales. Cuatro artículos fueron escritos por un mismo grupo de autores, que son Zamboni, Bernardi, Girola, Bezzo y Ortiz, quienes trabajaron la cadena de bioetanol en el norte de Italia. Zamboni



et al. [25] presentaron el primer modelo MILP para la localización de cultivos de biomasa, producción de etanol, asignación de capacidad, así como la optimización del sistema de transporte, buscando la optimización del desempeño económico y ambiental en términos de emisión de gases efecto invernadero (GHG).

Posteriormente, Giarola *et al.* [27] presentan un modelo MILP donde se optimiza el valor presente neto (VPN) y las emisiones de GHG, considerando en este caso dos materias primas, el grano y el rastrojo de maíz. El modelo permite determinar la mezcla de materia prima, el plan de capacidades y la selección de tecnología de conversión. Así mismo, el modelo considera variables de diseño de la cadena, como la localización de instalaciones, y se enfatiza en el análisis de las relaciones de entre los objetivos de costo y emisiones, así como su relación con las distintas tecnologías y materias primas disponibles.

En compañía de los autores anteriores, Bernardi [33] presenta un artículo en el cual propone un modelo matemático MILP similar al presentado por Giarola *et al.* [27]. La diferencia de este modelo es que contempla tres objetivos que son la sostenibilidad económica, la reducción de la huella de carbono y la huella hídrica. Este mismo año, Ortiz *et al.* [34] presentan también un modelo que complementa el de Giarola *et al.* [27]. En este caso se considera el valor económico de las emisiones globales de GHG, generado por la introducción del sistema de comercio de emisiones.

Liu *et al.* [26] en 2011 proponen una estructura genérica de un modelo de optimización bajo incertidumbre y la evaluación del ciclo de vida (LCA). Marvin *et al.* [28], el mismo año, exponen un modelo matemático MILP con los objetivos de minimizar el VPN y las emisiones de GHG. El modelo matemático tiene como propósito definir un plan de producción que permita cumplir la Norma de Combustibles Renovables (RFS) en Estados Unidos hasta el 2022. El Medio Oeste es elegido como la región de estudio, considerando residuos agrícolas y forestales como fuentes de biomasa.

En 2012, Akgul *et al.* [29] proponen un modelo para el diseño de la cadena (localización y tamaño de cultivos y plantas) y decisiones logísticas (tasas de cultivo y producción, flujos, medios de transporte) buscando minimizar el costo total diario y el impacto ambiental en términos de emisiones de GHG. El modelo se aplica al caso de producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica en Reino Unido. Kostin *et al.* [31], quienes ya habían presentado un modelo con objetivos económicos y financieros para el diseño de la cadena de bioetanol de caña en Argentina, presenta también un modelo matemático para el diseño de la misma cadena, pero esta vez considerando la optimización del valor presente neto y cinco objetivos ambientales. La medición de los aspectos ambientales evaluados se basa en métricas del análisis del ciclo de vida (LCA, por sus siglas en inglés).

Este mismo año, Čuček *et al.* [30] presentan un modelo para el diseño de cadenas de suministro de biomasa para la conversión de biomasa en energía, buscando la maximización del desempeño económico y la minimización de las huellas ambientales y sociales. Dentro de los aspectos ambientales considerados se encuentran el consumo de energía, el consumo de agua (huella hídrica), las emisiones de CO_2 , la huella de tierra y la contaminación del agua. Como aspecto social se considera el impacto a la disponibilidad de alimento por el uso de cultivos agrícolas para la producción de energía.

En 2013, Ubando *et al.* [32] presentan un modelo difuso (fuzzy) que busca maximizar la ganancia manteniendo unos niveles aceptables de huellas de carbono, hídrica y de tierra, mientras Xie y Huang [36] exponen un modelo SMILP para evaluar el impacto económico y ambiental (en términos de emisión de GHG) al establecer una cadena de suministro de etanol celulósico a base de residuos biológicos (como el rastrojo de maíz y residuos forestales) en California como un estudio de caso. También en 2013, Yue *et al.* [35] proponen un modelo fraccional MILFP para la minimización del costo y la huella de carbono en el diseño sostenible de una cadena de suministro de biocombustible en Illinois, Estados Unidos.

En 2014, Liu *et al.* [37] [39] presentan dos artículos donde se consideran tres objetivos: el objetivo económico mide la ganancia anual total, el objetivo ambiental medido por emisiones de GHG y el objetivo energético medido en megajulios (MJ) promedio de energía fósil por MJ de biocombustible. Los modelos buscan determinar la localización de las plantas y mercados, la capacidad, tecnología, tasas de producción de materias primas, productos y flujos de éstos en la cadena de biocombustibles en China. El primer artículo es un modelo MILP aplicado a la producción de bioetanol y biodiésel, mientras el segundo es un modelo MILFP que incluye también la producción de biometanol.

Finalmente, el último artículo en este grupo es el de Nixon *et al.* [38], en el cual se consideran tres metas económicas: costo de capital, la recuperación de la inversión y los costos de producción de bio-aceite y electricidad; como meta ambiental se evalúa la utilización de materia prima (quema de materia prima). El modelo busca determinar la ubicación, tamaño y número de plantas, aplicaciones de energía y cantidades de materias primas procesadas. Es aplicado a pequeña y gran escala en Punjab, India, donde hay una cantidad abundante de residuos de paja. A continuación se describen los modelos que contemplan objetivos económicos, ambientales y sociales.

5.4. Modelos con objetivos económicos, ambientales y sociales

El primer artículo publicado que considera el aspecto social en la cadena de suministro de biocombustibles es el de Capón *et al.* [40], del año 2008. En este artículo se presenta la estructura matemática de un modelo MILP que busca simultáneamente la minimización de los costos, los impactos ambientales y sociales. El modelo diseña una cadena de suministro que satisfaga la demanda de biodiésel en España, y la frontera de Pareto se obtiene mediante la aplicación de la técnica ε -constraint.

En 2011, You y Wang [41] proponen un modelo matemático SMILP con el objetivo económico de minimizar el costo neto anualizado, el objetivo ambiental de minimizar las emisiones de GHG y adicionalmente un objetivo social de maximizar el número de puestos de trabajo locales acumulados. El modelo se aplica para el diseño, selección de tecnología y decisiones logísticas en la cadena de biocombustible en el estado de Illinois, Estados Unidos, considerando tres tipos de biomasa: residuos de cultivos, cultivos energéticos y residuos de madera. Para la solución del modelo se aplica un algoritmo de descomposición, basado en las técnicas de aproximación de promedio muestral (*sample average approximation*) y multi-corte en forma de L (*Multi-cut L-shaped*), y posteriormente el método ε -constraint. En 2012, You *et al.* [42] vuelven a proponer un modelo aplicado a la misma cadena de biocombustibles, pero

en este caso el modelo es MILP (sin considerar demandas inciertas) y es aplicado a dos casos de estudio en la misma zona.

El último artículo en esta categoría es el de Santibañez-Aguilar *et al.* [43] en el cual presentan un modelo MILP que considera simultáneamente la maximización de las ganancias, la minimización del impacto ambiental, así como la maximización del beneficio del impacto social a través de la generación de empleo en las zonas rurales. El modelo se aplica a un caso de estudio para la planificación de la producción de una biorrefinería en México.

5.5. Modelos con objetivos en los cuatro campos

El último grupo de artículos consideran más de cuatro objetivos, dentro de los cuales se encuentran objetivos económicos, ambientales, sociales y técnicos. Sin embargo, a diferencia de los demás artículos, éstos no presentan modelos de programación matemática, sino metodologías y otras técnicas propias de MCDM. En el caso de Turcksin *et al.* [44], utilizan la metodología MAMCA (*multi-actor multi-criteria analysis*) para la evaluación de varias alternativas que puedan contribuir a lograr un 10 % de combustibles renovables en el transporte para 2020, como objetivo planteado por la Dirección de Energía Renovable de Bélgica.

El mismo año, Halog y Manik [45] utilizan una metodología integral con un enfoque holístico en evaluación de la sostenibilidad y formulación de políticas para las cadenas de suministro de biocombustibles. La metodología integra diferentes técnicas como el marco de análisis del ciclo de vida (LCA), el análisis de las partes interesadas con el apoyo de análisis de decisión multi-criterio (MCDA), dinámica de sistemas, análisis de la envolvente de datos (DEA) y la teoría de redes de sostenibilidad (SNT).

Posteriormente, Zhou *et al.* [46] presentan un artículo donde desarrollan una metodología de toma de decisiones para la planificación de las ubicaciones de las biorrefinerías en un entorno difuso basado en el método TOPSIS. La metodología abarca 9 criterios y 32 subcriterios, donde incluye aspectos ambientales, sociales, técnicos y económicos. Finalmente, en 2014, Madugu y Collu [47] desarrollan un modelo de análisis donde se utiliza la técnica TOPSIS para identificar la alternativa más aceptable entre las múltiples rutas y decisiones logísticas relacionadas con toda la cadena de producción de biocombustibles derivados de algas.

5.6. Análisis

La Tabla 7 presenta el resumen de los objetivos considerados en cada artículo. Las equis representan los objetivos considerados en cada artículo y los guiones representan que no se especificó el objetivo considerado. Por ejemplo, en el modelo de Zamboni *et al.* [25] se considera un objetivo económico, pero no se especifica si es costo, ganancia, valor presente neto o riesgo financiero.

Tabla 7. Objetivos considerados por artículo

N°	Aspectos	Autor(es)	Económico				Ambiental							Social				
			C	G	VPN	RF	GHG	CO ₂	W	E	LF	IA	WPF	RN	GE	AF		
1	Económicos	Kostin <i>et al.</i>			X	X												
2		Gebreslassie, Yao y You	X			X												
3	Técnicos	Huang y Pang.																
4	Técnicos y económicos	El-Halwagi <i>et al.</i>	X															
5	Económicos y ambientales	Zamboni <i>et al.</i>	-	-	-	-	X											
6		Liu <i>et al.</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7		Giarola <i>et al.</i>			X		X											
8		Marvin <i>et al.</i>			X		X											
9		Akgul <i>et al.</i>	X				X											
10		Čuček <i>et al.</i>		X				X	X	X	X		X					X
11		Kostin <i>et al.</i>																
12		Ubando <i>et al.</i>		X				X	X		X							
13		Bernardi <i>et al.</i>	-	-	-	-		X	X									
14		Ortíz <i>et al.</i>			X		X											
15		Yue <i>et al.</i>	-	-	-	-		X										
16		Xie y Huang.	X				X											
17		Liu <i>et al.</i>		X			X			X								
18	Nixon <i>et al.</i>	X												X				
19	Liu <i>et al.</i>		X			X			X									
20	Económicos, ambientales y sociales	Capón <i>et al.</i>	X				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
21		You y Wang.	X				X									X		
22		You <i>et al.</i>	X				X									X		
23		Santibañez-Aguilar <i>et al.</i>		X								X				X		
24	Económicos, ambientales, sociales y técnicos	Turcksin <i>et al.</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
25		Halog yManik.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
26		Zhou <i>et al.</i>		X					X	X								
27		Madugu yCollu.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Frecuencia			8	6	4	2	10	4	4	3	3	1	1	1	3	1		

C: Costo; G: Ganancia; VPN: Valor presente neto; RF: Riesgo financiero; GHG: Gases efecto invernadero; CO₂: Huella de carbono; HH: Huella hídrica; E: Energía; HT: Huella de tierra (Land Footprint); IA: Impacto ambiental; RN: Consumo de recursos naturales; GE: Generación de empleo; AF: Huella de tierra agrícola (agricultural land footprint).

La revisión de los artículos muestra que el objetivo económico más frecuente en la optimización de cadenas de suministro es la minimización del costo, principalmente en términos de costo anualizado. Por otra parte, el objetivo ambiental más utilizado es la minimización de emisiones de GHG, cuyo cálculo se basa en la metodología LCA, y en segunda instancia la emisión de CO₂ (la cual se encuentra incluida en los GHG). El objetivo social más utilizado es la generación de empleo. Los objetivos técnicos no se incluyen dado que son muy variados y dependen de la cadena de suministro en particular considerada.

6. Discusión

En la actualidad, los biocombustibles son considerados sustitutos parciales del combustible fósil y tienen una creciente proyección de consumo y producción a mediano y largo plazo [1]. Esta creciente proyección se debe principalmente a las ventajas ambientales que podrían presentar los biocombustibles en comparación al combustible fósil [48] [2]. Sin embargo, a pesar de sus beneficios, también existen preocupaciones por los impactos ambientales y sociales asociados que pueden causar su producción y distribución [1].

Los biocombustibles se producen a partir de recursos renovables y representan una nueva fuente de ingresos para la agricultura [3], tienen un balance energético positivo y generan menores emisiones GHG que el combustible fósil [1] [4]. En contraposición, la producción de biocombustibles podría llevar a un aumento de la deforestación, pérdida de la biodiversidad, contaminación del agua, incremento del uso de agroquímicos, problemas sobre la seguridad alimentaria, y un empeoramiento de las condiciones laborales, migración, entre otras preocupaciones [1] [5].

La inclusión de los aspectos ambientales y sociales en SCM ha venido ganando mayor relevancia, principalmente en la última década, al aparecer el enfoque GSCM. Por su parte, la optimización con múltiples objetivos ha servido como marco para operacionalizar la inclusión de objetivos ambientales y sociales en GSCM. Esta tendencia no es ajena a la cadena de suministro de biocombustibles, considerando que más del 90 % de artículos con múltiples objetivos se han escrito en los últimos 4 años.

Sin embargo, a pesar de los múltiples aspectos ambientales y sociales asociados a la cadena de suministro de biocombustibles, los modelos de optimización multiobjetivo incluyen en su mayoría uno o dos objetivos ambientales (principalmente emisiones GHG y emisiones CO_2) y a lo sumo un objetivo social (empleos generados) sin que éstos sean necesariamente los más significativos en este tipo de cadenas. Un mayor número de objetivos han sido considerados con otras técnicas de MCDM, aplicadas a la selección de estrategias entre un número limitado de opciones.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO, por sus siglas en inglés) [49], uno de los aspectos sociales más importantes en las cadenas de biocombustibles es el impacto que puede ocasionar en la seguridad alimentaria. En cuanto al aspecto ambiental, un estudio realizado por el Consorcio CUE [50], para el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y el Ministerio Minas y Energía en Colombia, resalta la importancia de considerar el impacto asociado al cambio directo e indirecto del uso del suelo. Estos dos aspectos fueron contemplados solamente en el modelo presentado por Čuček *et al.* [30]. Adicionalmente, otros aspectos importantes como migración y pérdida de biodiversidad, no han sido considerados en los modelos de optimización multiobjetivo encontrados en la revisión del estado del arte, posiblemente debido a su dificultad para cuantificarlos. Por lo tanto, las investigaciones futuras deberían orientarse a definir la forma de cuantificar e incluir estos impactos en los modelos matemáticos, de manera que se facilite su consideración en la toma de decisiones para las cadenas de suministro de biocombustibles.

A pesar de que en la actualidad existen algoritmos como los MOEA, que permiten hallar el conjunto de soluciones óptimas de manera más eficiente, solamente un artículo utilizó un algoritmo de aproximación para generar la frontera de Pareto. En su lugar, la técnica utilizada con mayor frecuencia para hallar el conjunto de soluciones óptimas es el método de la restricción ϵ (ϵ -*constraint*). La utilización de técnicas de aproximación (como MOGA, NSGA II, SPEA II) en trabajos futuros permitiría encontrar secciones más grandes y completas de las fronteras de Pareto, así como la inclusión de un mayor número de objetivos y desarrollo de modelos más grandes y complejos para SCM de biocombustibles.

7. Conclusiones

En la última década, la optimización multiobjetivo ha ganado relevancia en SCM dado que permite integrar objetivos sociales, ambientales y económicos en sus decisiones. En este artículo se presentó una revisión de la literatura sobre los tipos de modelos matemáticos, técnicas de solución y su aplicación en cadenas de suministro de biocombustibles. Adicionalmente se realizó un análisis de los tipos de objetivos frecuentemente utilizados en la optimización multiobjetivo de este tipo de cadenas.

Hasta el momento, todos los artículos con modelos de optimización multiobjetivo en cadenas de suministro de biocombustibles han tenido una inclusión parcial de los aspectos ambientales y sociales. Los aspectos económicos, ambientales y sociales más utilizados en el diseño y gestión de cadenas de suministro son la minimización del costo anualizado, la minimización de emisiones de GHG y la generación de empleo. Existe la necesidad de evaluar las técnicas existentes o desarrollar nuevas técnicas que permitan cuantificar los impactos ambientales y sociales más significativos en la cadena de suministro de biocombustibles aún no considerados, así como el desarrollo de modelos matemáticos que permitan optimizarlos.

La inclusión de varios objetivos en las cadenas de suministro de biocombustibles se hace en su mayoría por medio de modelos matemáticos de programación lineal entera mixta (MILP). Hasta el momento, las técnicas más utilizadas para solucionar los modelos matemáticos son las básicas como el ϵ -*constraint*. Cuando se considera un mayor número de objetivos, se utilizan diferentes metodologías pertenecientes a la teoría de decisiones multi-criterio (MCDM) en lugar de modelos de programación matemática. La utilización de técnicas de aproximación más recientes permitirá obtener fronteras de solución de manera más eficiente, que a su vez faciliten el análisis de resultados en modelos con un mayor número de objetivos.

Referencias

- [1] A. Dufey, Producción y comercio de agrocombustibles y desarrollo sustentable: los grandes temas. Londres, Instituto Internacional para el Medio Ambiente y Desarrollo, 2006.
- [2] A. Demirbas, "Progress and recent trends in biodiesel fuels," *Energy Conversion and Management*, 50, pp. 14-34, 2009.
- [3] NACEPT, *Strategic framework for biofuels efforts*. Estados Unidos, National Advisory Council for Environmental Policy and Technology, 2007.

- [4] A. Ajanovic and R. Haas, "Economic challenges for the future relevance of biofuels in transport in EU countries," *Energy*, 35, pp. 3340 - 3348, 2010.
- [5] J. P. Aristegui, "Los agrocombustibles desde la perspectiva del comercio internacional y del derecho de la organización mundial del comercio," *Revista de Derecho (Austral)*, 22 (1), pp. 113-134, 2009.
- [6] S. Mathur and A. Kenyon, "Creating value: shaping tomorrow's business," *Butterworth-Heinemann*, 1997.
- [7] G. Svensson, "Gestión de la cadena de suministro frente a gestión de la cadena sostenible," *EsicMarket*, 129, pp. 239-258, 2007.
- [8] A. Nikolopoulou and M. G. Ierapetritou, "Optimal design of sustainable chemical processes and supply chains: A review," *Computers and Chemical Engineering*, 44, pp. 94 - 103, 2012.
- [9] C. Cambero and T. Sowlati, "Assessment and optimization of forest biomass supply chains from economic, social and environmental perspectives - A review of literature," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 62-73, 2014.
- [10] S. Liu, M. Leat and M. H. Smith, "State-of-the-art sustainability analysis methodologies for efficient decision support in green production operations," *International Journal of Sustainable Engineering*, pp. 236-250, 2011.
- [11] M. Ehrgott and M. M. Wiecek, "Multiobjective programming," en *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*, Estados Unidos, Springer, 2005, pp. 667-722.
- [12] R. Marler and J. Arora, "Survey of multi-objective optimization methods for engineering," *Struct Multidisc Optim.*, 26, pp. 369-395, 2004.
- [13] J. Lopez, Optimización multiobjetivo: aplicaciones a problemas del mundo real. Buenos Aires, Argentina, Universidad Nacional de la Plata, 2013.
- [14] O. L. De Weck, "Multiobjective optimization: History and promise," en *Third China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems*, Kanazawa, Japan, 2004.
- [15] T. Marler and J. S. Arora, "The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights," *Struct. Multidisc. Optim.*, 41, pp. 853-862, 2010.
- [16] H. O. Alanazi, A. H. Abdullah and M. Larbani, "Dynamic weighted sum multi-criteria decision making: Mathematical Model," *International Journal of Mathematics and Statistics Invention*, pp. 16-18, 2013.
- [17] M. Ehrgott and S. Ruzika, "Improved ϵ -constraint Method for Multiobjective Programming," *Journal Optim. Theory Appl.*, 138, pp. 375-396, 2008.
- [18] C. A. Coello, "Networking and emerging optimization" septiembre 2002. [Online]. Available: <http://neo.lcc.uma.es/pdf-charlas/MOEA.pdf>.
- [19] Y. J. Túpac, "Universidad Católica San Pablo," 23 de noviembre 2011. [Online]. Available: <http://www.ucsp.edu.pe/~ytupac/speaks/2011/UNJBG.CIIS.MOGA.pdf>.
- [20] A. Messac and C. A. Mattson, "Generating well-distributed sets of Pareto points for engineering using physical programming," *Optimization and Engineering*, 3, pp. 431-450, 2002.
- [21] A. Kostin, G. Guillén-Gosálbez, F. Mele, M. Bagajewicz y L. Jiménez, "Design and planning of infrastructures for bioethanol and sugar production under demand uncertainty," *Chemical Engineering Research and Design*, 90, pp. 359-376, 2012.
- [22] B. Gebreslassie, Y. Yao y F. You, "Design under uncertainty of hydrocarbon biorefinery supply chains: multiobjective stochastic programming models, decomposition algorithm, and a comparison between CVaR and downside risk," *AIChE Journal*, 58 (7), pp. 2155-2179, 2012.
- [23] Y. Huang y W. Pang, "Optimization of resilient biofuel infrastructure systems under natural hazards," *J. Energy Eng.*, 140 (2), 2014.
- [24] El-Halwagi, Rosas y Ponce-Ortega, "Multiobjective optimization of biorefineries with economic and safety objectives," *AIChE Journal*, 59 (7), pp. 2427-2434, 2013.
- [25] A. Zamboni, N. Shah y F. Bezzo, "Spatially explicit static model for the strategic design of future bioethanol production systems" *Energy Fuels*, 23 (10), pp. 5134-5143, 2009.
- [26] P. Liu, M. Georgiadis y E. Pistikopoulos, "Advances in energy systems engineering" *Ind. Eng. Chem. Res.*, 50 (9), pp. 4915-4926, 2011.
- [27] S. Giarola, A. Zamboni y F. Bezzo, "Spatially explicit multi-objective optimisation for design and planning of hybrid first and second generation biorefineries," *Computers and Chemical Engineering*, 35, pp. 1782- 1797, 2011.

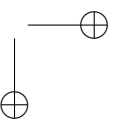
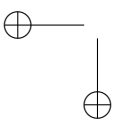
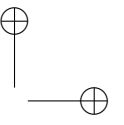
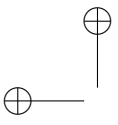
- [28] W. Marvin, L. Schmidt, S. Benjaafar y P. Daoutidis, "Economic and environmental optimization of the biomass-to-biofuel supply chain in the midwest," *IIAChE Annual Meeting, Conference Proceedings*, 2011.
- [29] O. Akgul, N. Shah y L. Papageorgiou, "An optimisation framework for a hybrid first/second generation bioethanol supply chain," *Computers and Chemical Engineering*, 42, pp. 101–114, 2012.
- [30] Čuček, Sabev, Jaromír y Kravanja, "Total footprints-based multi-criteria optimisation of regional biomass energy supply chains," *Energy*, 44 (1), pp. 135–145, 2012.
- [31] Kostin, Guillén-Gosálbez, Mele y Jiménez, "Identifying key life cycle assessment metrics in the multiobjective design of bioethanol," *I&ECR*, 51(14), pp. 5282-5291, 2012.
- [32] A. Ubando, A. Culaba, K. Aviso, D. Ng y R. Tan, "Fuzzy multi-objective approach for designing of biomass supply chain for polygeneration with triple footprint constraints," *ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 12, 2013.
- [33] A. Bernardi, S. Giarola y F. Bezzo, "Spatially explicit multiobjective optimization for the strategic design of first and second generation biorefineries Including carbon and water Footprints," *Ind. Eng. Chem. Res.*, 52 (22), pp. 7170–7180, 2013.
- [34] R. Ortiz, S. Giarola y F. Bezzo, "Optimal design of ethanol supply chains considering carbon trading effects and multiple technologies for side-product exploitation," *Environmental Technology*, 34, pp. 2189–2199, 2013.
- [35] D. Yue, M. Kim y F. You, "Design of sustainable product systems and supply chains with life cycle optimization based on functional unit: general modeling framework, mixed-integer nonlinear programming algorithms and case study on hydrocarbon biofuels," *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 1 (8), pp. 1003–1014, 2013.
- [36] F. Xie y Y. Huang, "Sustainable biofuel supply chain planning and management under uncertainty," *Journal of the Transportation Research Board*, pp. 19-27, 2013.
- [37] Z. Liu, T. Qiu y B. Chen, "A study of the LCA based biofuel supply chain multi-objective optimization model with multi-conversion paths in China," *Applied Energy*, 126, pp. 221–234, 2014b.
- [38] J. Nixon, P. Dey, P. Davies, S. Sagi y R. Berry, "Supply chain optimisation of pyrolysis plant deployment using goal programming," *Energy*, 68, pp. 262-271, 2014.
- [39] Z. Liu, T. Qiu y B. Chen, "A LCA Based Biofuel Supply Chain Analysis Framework," *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 22 (6), pp. 669—681, 2014a.
- [40] E. Capón, G. Guillén-Gosálbez, L. Jiménez-Esteller y A. Espuña, "Designing the optimal supply chain for biodiesel production in Spain," *AICHE 100 Annual Meeting, Conference Proceedings*, 2008.
- [41] F. You y B. Wang, "Optimal design and operations of cellulosic biofuel supply chains under uncertainty," *IIAChE Annual Meeting, Conference Proceedings*, 2011.
- [42] F. You, L. Tao, D. Graziano y S. Snyder, "Optimal design of sustainable cellulosic biofuel supply chains: multiobjective optimization coupled with life cycle assessment and input–output analysis," *AICHE Journal*, 58 (4), pp. 1157-1180, 2012.
- [43] J. Santibañez-Aguilar, J. González-Campos, J. Ponce-Ortega, M. Serna-González y M. El-Halwagi, "Optimal multi-objective planning of distributed biorefinery systems involving economic, environmental and social aspects," *Computer Aided Chemical Engineering*, 31, pp. 470–474, 2012.
- [44] L. Turcksin, C. Macharis, K. Lebeau, L. Gorissen y P. L. , "A multi-actor multi-criteria framework to assess the stakeholder support for different biofuel options: The case of Belgium," *Energy Policy*, 39, pp. 200–214, 2011.
- [45] A. Halog y Y. Manik, "Advancing integrated systems modelling framework for life cycle sustainability assessment," *Sustainability*, 3, pp. 469-499, 2011.
- [46] S. Zhou, Y. Zhang y X. Bao, "Methodology of location selection for biofuel refinery based on fuzzy TOPSIS," *International Conference on Automation and Logistics - Zhengzhou, China*, 2012.
- [47] F. Madugu y M. Collu, "Techno-economic modelling analysis of microalgae cultivation for biofuels and co-products," *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 190, pp. 1091-1102, 2014.
- [48] M. Barón, I. Huertas and J. Orjuela, "Gestión de la cadena de abastecimiento del biodiésel: una revisión de la literatura," *Ingeniería*, 18 (1), pp. 84-117, 2013.
- [49] FAO, The state of food security in the world 2008. *High food prices and food security: Threats and opportunities*, Roma: FAO, 2008.
- [50] C. CUE, Evaluación del ciclo de vida de la cadena de producción de biocombustibles en Colombia, Medellín, Colombia, *Ministerio de Minas y Energía*, 2012.

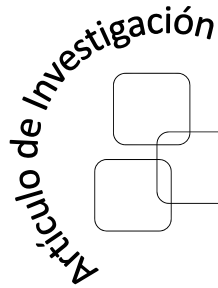
Johan Alexander Aranda Pinilla

Nació en Bogotá, Colombia. Es Ingeniero Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, de Bogotá, Colombia. Obtuvo su título de Maestría en Ingeniería Industrial en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, en Bogotá, Colombia. Actualmente se desempeña como profesor en las áreas de Logística e Investigación de Operaciones, en la Universidad Católica de Colombia y de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Integrante del Grupo de investigación GICALyT.
e-mail: jaaranda@ucatolica.edu.co

Javier Arturo Orjuela Castro

Nació en Bogotá, Colombia. Es Ingeniero de Alimentos, Ingeniero Industrial, Especialista en Ingeniería de producción de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Obtuvo su título de Maestría en Investigación y Estadística en la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Actualmente estudia el Doctorado en Ingeniería, Industrial y Organizaciones en la Universidad Nacional de Colombia. Se desempeña como profesor e investigador en las áreas de Logística en Distrital Francisco José de Caldas, líder del Grupo de investigación GICALyT.
e-mail: jorjuela@udistrital.edu.co





Segmentación y conteo de las líneas de la nariz del feto en imágenes ecográficas de las 11-13⁺⁶ semanas de gestación

Segmentation and nasal line counting in ultrasound fetal images at the 11-13⁺⁶ weeks of gestation

Ange Paola Ballesteros Maldonado
Bogotá – Colombia
apballesterosm@correo.udistrital.edu.co

Laura Catalina López Alza
Bogotá – Colombia
lclopeza@correo.udistrital.edu.co

Rodrigo Javier Herrera García
Bogotá – Colombia
rherrera@udistrital.edu.co



Resumen

Este documento presenta un método para la segmentación de la nariz y el posterior conteo de las líneas correspondientes a la piel, el hueso nasal y la punta de la nariz en imágenes de ultrasonido fetales 2D del primer trimestre de gestación, de 11 a 13 semanas y 6 días (11-13⁺⁶ semanas). La presencia de las tres líneas del área nasal es una de las características que debe cumplir el feto en la ecografía para garantizar la confiabilidad de la medición del grosor translucencia nuchal. Dicha medición se emplea para identificar la posible existencia de síndromes o anomalías cromosómicas. El método se aplica a la región correspondiente al corte sagital medio de la cabeza donde se han resaltado las regiones con mayor intensidad. La segmentación es jerárquica: primero, se identifica la región de la nariz a través de máximos regionales y alta excentricidad; posteriormente las líneas ya mencionadas son extraídas con agrupamiento basado en *K*-medias y morfología matemática.

Dada la incertidumbre entre las imágenes con respecto a posición fetal, resolución, nivel de ruido y rango dinámico, los resultados obtenidos van desde casos en los que no se encuentra la región de interés, hasta otros en los que son claramente identificables las líneas.

Palabras claves: filtro homomórfico, transformada *H*-máxima, reconstrucción morfológica, dilatación geodésica, excentricidad y agrupamiento.

Abstract

This document introduces a method for nasal segmentation and the subsequent counting of lines corresponding to the skin, nasal bone and the tip of the nose in 2D fetal ultrasound images of the first gestational trimester from 11 to 13 weeks and 6 days (11-13⁺⁶ weeks). Presence of the three lines in the nasal region is one of the features that should have the fetus on ultrasound image to ensure the reliability of the measurement of fetal nuchal translucency thickness; this measurement is used to identify the possible existence of syndromes or chromosomal abnormalities. The method is applied to the mid-sagittal head plane where the hyperintense regions have been identified. The segmentation is hierarchical: first, the nose is identified by the combination of a regional maxima and high eccentricity detection algorithms; then the aforementioned lines are identified using *K*-means clustering and mathematical morphology.

Because of uncertainty between images with respect to fetal position, resolution, noise and dynamic range, the results ranging from cases in which the region of interest is not found, to those where the lines are clearly identifiable.

Key words: Homomorphic filtering, *H*-maxima transform, morphological reconstruction, geodesic dilation, eccentricity and clustering.

Recibido: 19-06-2014
Modificado: 03-03-2015
Aceptado: 07-04-2015

1. Introducción

En 1866, Langdon Down determinó como características comunes en las personas con trisomía 21 la hipotonía muscular, cara achatada y nariz pequeña [1]. Hacia los años noventa se determinó que la hipotonía muscular podría observarse en las ecografías del tercer mes de gestación como un incremento en el ancho de la translucencia nucal, que es una acumulación de líquido subcutáneo en la parte posterior del cuello del feto. Esta acumulación de líquido está relacionada además con otras anomalías cromosómicas, como la trisomía 13 y la 18, y se asocia también con anomalías mayores en el corazón y los grandes vasos. La valoración de imágenes ecográficas fetales es un procedimiento común en la práctica clínica, dado que el seguimiento del estado del feto en la gestación es fundamental para garantizar la salud de la madre y su hijo durante y después del embarazo.

La confiabilidad de una correcta medición de la translucencia nucal en la ecografía depende de ciertas características que debe cumplir el feto en la imagen de ultrasonido. En consecuencia, se deben evaluar las imágenes tomadas por los especialistas. La presencia de tres líneas en la región nasal del feto es un parámetro utilizado en el proceso de auditoría de imágenes ecográficas de las 11-13⁺⁶ semanas de gestación correspondientes al primer trimestre, ya que determina un correcto plano sagital medio del perfil fetal. La línea superior representa la piel y la inferior, que es más gruesa y de mayor ecogenicidad, corresponde al hueso nasal. La tercera línea, casi en continuidad con la piel pero en un nivel más alto, es la punta de la nariz [1] (Figura 1).

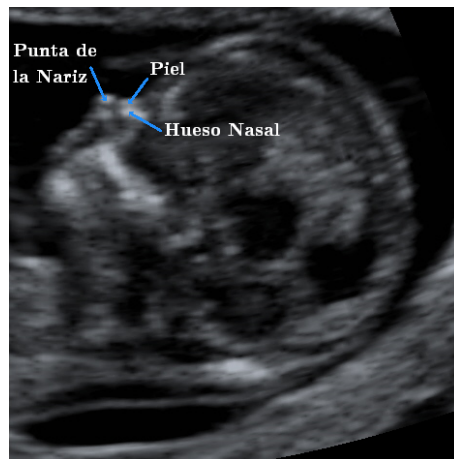


Figura 1. Identificación de líneas en la región nasal, según la FMF, en imagen ecográfica de las 11-13⁺⁶ semanas de gestación.

En la parte anterior de la cabeza del feto, la nariz contiene píxeles de alta intensidad. Aun así, el ruido moteado de tipo multiplicativo (*speckle*) y manchas no comunes (como por ejemplo la presencia de la mano del feto, parte del útero de la madre o distorsiones de la imagen por movimiento del feto o densidad del tejido adiposo de la madre) consecuentes al proceso de adquisición de las imágenes son factores que generan errores en la identificación correcta del área nasal y en consecuencia en el conteo de las tres líneas mencionadas [2].

En el 2011, Anjit y Rishidas propusieron un método para la identificación del hueso nasal, con el que obtuvieron una tasa de detección del 88 % y en el que usaron una definición preliminar de la región de interés, transformada *watershed* para la segmentación, transformada discreta de coseno para obtener los datos y redes neuronales [2]. Sin embargo, se requiere la selección de la región de interés por parte del experto, que aunque se respalda con su experiencia no deja de tener un elemento subjetivo. A diferencia del anterior, el método propuesto en este documento es completamente automático, lo que podría llegar a disminuir el tiempo de análisis y el componente de subjetividad que se presenta en la evaluación de las imágenes. Por consiguiente, es posible reducir las probabilidades de hacer mediciones incorrectas al tener certeza de que se cuenta con imágenes que cumplen con los criterios establecidos por la Fundación de Medicina Fetal (FMF) [1]. Además es aplicable a imágenes ecográficas con una alta incertidumbre entre ellas (posición fetal, resolución, nivel de ruido y rango dinámico). El método presentado no se plantea como una técnica de diagnóstico, sino como una herramienta que pueda emplear el especialista en la auditoría de las imágenes ecográficas.

La imagen de la cual parte el método propuesto corresponde a una segmentación previa de la región anterior de la cabeza del feto, y la extracción de la región de interés se basa en el empleo de máximos regionales y agrupamiento no supervisado.

El documento se encuentra organizado de la siguiente forma: La sección 2 describe el método utilizado. La sección 3 muestra resultados experimentales en 299 imágenes ecográficas. La sección 4 presenta la discusión de los resultados obtenidos en la sección 3. Finalmente las conclusiones son mostradas en la sección 5.

2. Metodología

Se propone un método para la detección de la región nasal y el conteo de las líneas que la componen. El método propuesto parte de una presegmentación de la cabeza del feto (Figura 4a). Puesto que el ruido y otras regiones que aparecen como resultado de la adquisición de la imagen son factores que introducen error en la identificación correcta del área nasal, se aplica un filtrado que atenúa el ruido y realza regiones hiperintensas (alta ecogenicidad) antes de la segmentación de esta región. El algoritmo de segmentación se basa en el empleo de máximos regionales y la evaluación de las características de dichos máximos (Figura 2).

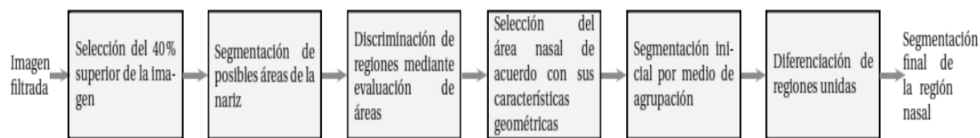


Figura 2. Diagrama de procesos para la segmentación de la región nasal.

2.1. Filtro Homomórfico

Debido a la adquisición de las imágenes, las regiones que deberían ser uniformes resultan ser más brillantes en algunas áreas y más oscuras en otras dependiendo de las condiciones de

la paciente y el feto durante el examen con el ginecologista. Pueden encontrarse imágenes con estructuras de fácil diferenciación u otras con alto ruido como consecuencia de la cantidad de tejido adiposo de la madre o movimientos continuos del feto. Esta situación puede ser la causa de una clasificación errónea y en consecuencia de una inadecuada segmentación [3].

El filtro homomórfico puede ser usado para mejorar la apariencia de una imagen a través de la compresión simultánea del rango de intensidades y el aumento de contraste [4]. Para un filtro homomórfico, una imagen f se define teóricamente como:

$$f(x, y) = i(x, y) r(x, y) \quad (1)$$

Donde $i(x, y)$ es el componente de iluminación, principal responsable del rango dinámico, y $r(x, y)$ es la reflectancia, principal responsable del contraste local [5].

Se calcula el logaritmo de la función:

$$z(x, y) = \ln(i(x, y)) + \ln(r(x, y)) \quad (2)$$

Posteriormente se halla la transformada de Fourier para operar en el dominio de la frecuencia:

$$Z(u, v) = I(u, v) + R(u, v) \quad (3)$$

La función de filtrado homomórfico puede ser construida usando un filtro de alto impulso (pasa alto) Butterworth de primer orden:

$$H_{u,v} = \gamma_L + \frac{\gamma_H}{1 + (D_0/D_{u,v})^2} \quad (4)$$

Donde D_0 , γ_L , γ_H son constantes positivas y $D_{u,v}$ es la distancia entre un punto (u, v) en el dominio de la frecuencia y el centro del rectángulo de frecuencias:

$$D_{u,v} = \sqrt{\left(u - \frac{P}{2}\right)^2 + \left(v - \frac{Q}{2}\right)^2} \quad (5)$$

Entonces es posible filtrar $Z(u, v)$ con $H_{u,v}$

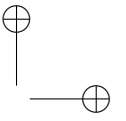
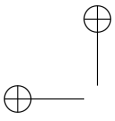
$$S(u, v) = H(u, v) I(u, v) + H(u, v) R(u, v) \quad (6)$$

Que en el dominio del espacio estaría dado por:

$$\begin{aligned} S(x, y) &= F^{-1}\{S(u, v)\} \\ &= i'(x, y) + r'(x, y) \end{aligned} \quad (7)$$

Dado que aplicamos logaritmo natural en un principio, debemos al resultado final hallar su exponencial:

$$\begin{aligned} g(x, y) &= e^{\delta(x, y)} \\ &= i_o(x, y) + r_o(x, y) \end{aligned} \quad (8)$$



Estos son los componentes que contienen la información del nivel de gris promedio y las variaciones abruptas presentes en bordes y fronteras entre objetos, respectivamente [6]. Las bajas frecuencias de la transformada de Fourier del logaritmo de una imagen se relacionan con el rango dinámico, y las altas frecuencias se relacionan con el contraste local.

Las zonas homogéneas en la imagen dan lugar a que la energía del espectro esté concentrada mayoritariamente en las bajas frecuencias [4]. En las ecografías, las regiones de interés son homogéneas por tal motivo si $\gamma_H < 1$ y $\gamma_L > 1$, el filtro tiende a resaltarlas.

Para la segmentación y partiendo del hecho de que se han resaltado las regiones de interés, se emplea la transformada máxima extendida, que permite identificar grupos de píxeles que tienen un valor de intensidad significativamente más alto que el de sus vecinos.

2.2. Transformada máxima extendida

La región nasal es un objeto que se distingue fácilmente del resto de la imagen puesto que es hiperintensa, por tanto, la imagen máxima es una importante característica morfológica porque permite usar esta singularidad para seleccionar objetos relevantes en las imágenes.

La transformada máxima extendida es una transformación del grupo de transformadas geodésicas, compuesta a su vez por la transformada H-máxima, que emplea el concepto de reconstrucción morfológica a partir de la transformada básica de dilatación geodésica.

2.2.1. Dilatación geodésica

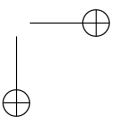
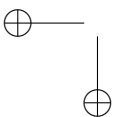
En la dilatación geodésica se trabaja con 2 imágenes: una imagen marcador f y una imagen máscara g . Ambas imágenes tienen el mismo dominio ($D_f = D_g$) y la imagen máscara debe ser mayor o igual que la imagen marcador desde el punto de vista de sus niveles de gris ($f \leq g$). La imagen marcador es dilatada por un elemento estructurante isotrópico, y posteriormente es forzada a permanecer por debajo de la imagen máscara. La imagen máscara actúa como un límite a la dilatación de la imagen marcador.

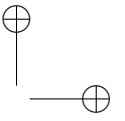
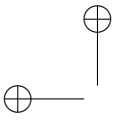
En otras palabras, la dilatación geodésica de tamaño 1 está definida como el punto mínimo entre la imagen máscara y la dilatación elemental $\delta_g^{(1)}$ de la imagen marcador [7]:

$$\delta_g^{(1)}(f) = \delta_g^{(1)}(f) \wedge g \quad (9)$$

La dilatación geodésica de tamaño n puede ser obtenida por n iteraciones de dilataciones geodésicas elementales [8]:

$$\delta_g^{(n)}(f) = \delta_g^{(1)}(f) \circ \delta_g^{(1)}(f) \circ \dots \circ \delta_g^{(1)}(f) \quad (10)$$





2.2.2. Reconstrucción morfológica

La reconstrucción morfológica de una imagen máscara g a partir de una imagen marcador f se basa en la convergencia de las transformaciones geodésicas de imágenes delimitadas después de un número finito de iteraciones, y está definida como la dilatación geodésica de f con respecto a g iterativa hasta la estabilidad. Se denota por $R_g^\delta(f)$:

$$R_g^\delta(f) = \delta_g^{(i)}(f) \quad (11)$$

Donde i es tal que $\delta_g^{(i)}(f) = \delta_g^{(i+1)}(f)$. Es decir, i es tal que las transformaciones geodésicas convergen.

2.2.3. Transformada H-Máxima

La transformada H-máxima suprime todos los máximos cuya altura es menor o igual al del valor de umbral h dado. Esto se consigue realizando la reconstrucción por dilatación de f desde $f - h$:

$$HMAX_h(f) = R_f^\delta(f - h) \quad (12)$$

Donde $R_f(f - h)$ es la reconstrucción morfológica por dilatación de la imagen desde $(f - h)$ [7].

2.2.4. Transformada máxima extendida

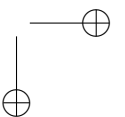
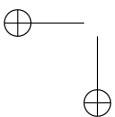
Un máximo regional M de una imagen f es un componente de píxeles conectados con una intensidad t donde el borde externo tiene un valor estrictamente menor que t [7]. Todos los píxeles pertenecientes a un máximo regional son un máximo local, pero no de forma opuesta [8].

La transformada H-máxima ($HMAX$) filtra los máximos regionales empleando un criterio de contraste. La transformada máxima es extendida si un máximo original, es decir un máximo regional de la imagen no reconstruida, todavía pertenece a un máximo regional de la imagen reconstruida.

La transformada máxima extendida ($EMAX$) está definida como la máxima regional de la correspondiente transformación ($HMAX$):

$$EMAX_h = RMAX[HMAX_h(f)] \quad (13)$$

La máxima regional para una señal de una dimensión y $h = 1$ se observa en la Figura 3 [8].



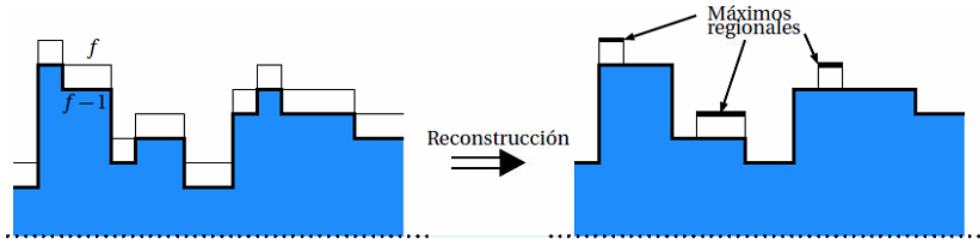


Figura 3. Extracción de la máxima regional por reconstrucción de f partiendo de $f - 1$.

En la Figura 4b se presenta el resultado al aplicar transformada máxima extendida en el 40 % de las imágenes ecográficas.

Dada la incertidumbre entre las imágenes y el ruido *speckle* presente en ellas, la transformada máxima extendida selecciona, en algunos casos, regiones con áreas significativas, debido a la dificultad para diferenciar los máximos regionales. Por tanto, se realizó un estimativo del área de la región de la nariz respecto a la cabeza del feto, resultando en la mayoría de casos inferior a 1,5 %. Cuando la región tiene un valor superior, se aplica a ella la transformada máxima extendida con el fin de dividirla en secciones más pequeñas que tienen mayor probabilidad de corresponder a la región de la nariz. En los demás casos, aquellos en los que se selecciona regiones con áreas no significativas (inferiores a 1,5 %), se toman estas como probables regiones de la nariz.

Las aproximaciones de las regiones a elipses permiten la obtención de medidas de las mismas, que pueden emplearse como patrones de selección. La excentricidad, por ejemplo, permite diferenciar elementos alargados de circulares. Aplicado a imágenes ecográficas, la región de la nariz puede entonces aproximarse a una elipse con alta excentricidad, como se observa en la Figura 4c. Sin embargo, deben excluirse los casos en los que el eje principal de la elipse es superior al 25 % de la media de las dimensiones de la imagen, dado que pueden confundirse con otras zonas de mayor tamaño y con formas similares, tal como el maxilar superior, como se observa en la Figura 4d.

2.3. Agrupamiento por K-medias

El agrupamiento K-medias es la representación de grupos a través de la media (o media ponderada) de sus puntos asignando a cada dato un centroide o pertenencia binaria [9], [10]. El uso de este método permite la segmentación de las líneas de la nariz representadas como pequeños grupos de píxeles en la región nasal.

El algoritmo requiere la especificación del número de grupos que se desean, encontrando una división óptima tal que la suma de las distancias euclidianas cuadradas entre un punto y su centroide se reduce al mínimo a nivel local; en ese contexto, la segmentación de imágenes puede modelarse como la identificación de grupos de píxeles [11], [12].

El algoritmo minimiza la suma de las varianzas de cada grupo, definida como la suma de los cuadrados de las diferencias entre los puntos y sus respectivos centroides, como se presenta en la Ecuación 14.

$$Q = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^n \|v_i^j - \mu_j\|^2 \quad (14)$$

Donde v_i^j es la i -ésima muestra de la j -ésima clase K_j y μ_j el centro del j -ésimo grupo definido como la media de $v_i \in K_j$ y $\|v_i^j - \mu_j\|$ es la norma de $v_i^j - \mu_j$ [11].

El resultado del agrupamiento K -medias depende de la inicialización de los centroides, así que se recomienda seleccionarlos aleatoriamente y lo más lejos posible el uno del otro con el fin de que el algoritmo obtenga el mínimo local óptimo de la Ecuación 14 [13], [14].

Para la segmentación de las líneas de la nariz se definen dos grupos los cuales corresponden a tejido óseo (mayor ecogenicidad) y a tejidos blandos de la región. La identificación del tejido óseo corresponde a la región a evaluar posteriormente. El resultado de aplicar K -medias a la región nasal se observa en la Figura 4e. Finalmente se emplea erosión para realizar su diferenciación (para detalles de la erosión ver [4]). El resultado final se observa en la Figura 4f.

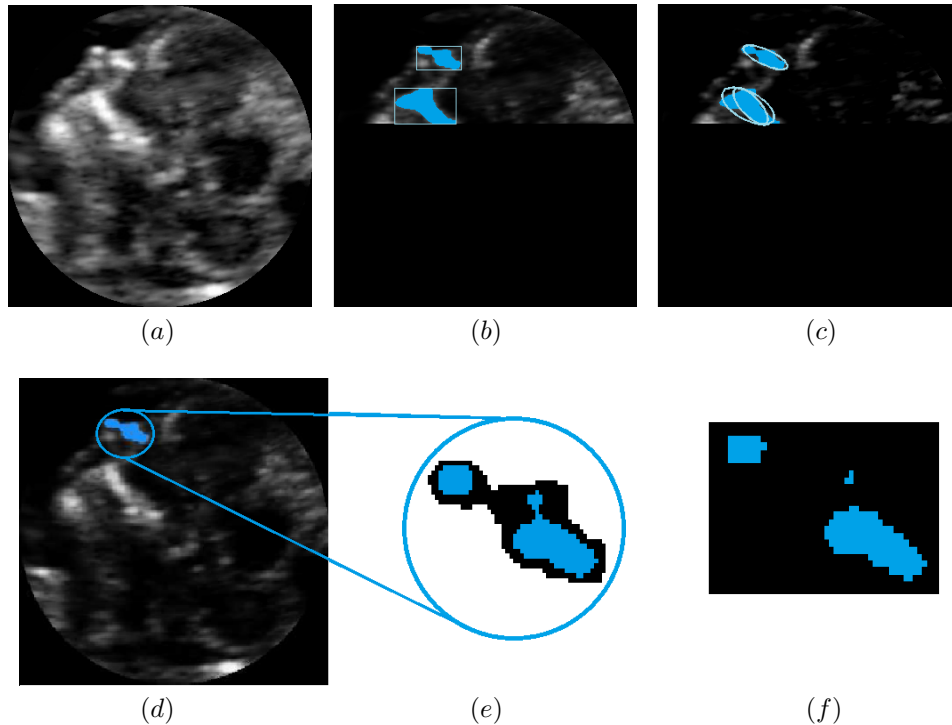
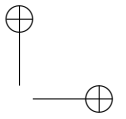
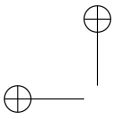


Figura 4. Descripción del método. (a) Imagen de corte sagital medio de la cabeza, (b) Transformada máxima extendida para el 40 % superior del corte sagital medio de la cabeza con filtrado homomórfico, (c) Aproximación a elipses de posibles regiones nasales obtenidas con la aplicación de transformada máxima extendida, (d) Segmentación final de la región nasal (e) Aplicación de K -medias sobre la región nasal previamente segmentada, (f) Segmentación final de las líneas de la nariz después de aplicar erosión.



2.4. Etiquetado por componentes conexos

Para el análisis de los objetos en las imágenes binarias, estos generalmente son extraídos empleando la operación de etiquetado por componentes conectados, que consiste en la asignación de una etiqueta única a cada componente [15]. Generalmente dichas etiquetas son enteros positivos.

Dos píxeles P y Q están conectados si existe un camino de píxeles (p_0, p_1, \dots, p_n) tal que $p_0 = P$, $p_n = Q$ y $\forall 1 \leq i \leq n$, p_{i-1} y p_i son vecinos adyacentes. Por lo tanto, la definición de componentes conectados se basa en el vecindario del píxel. Si tiene 4-vecinos, C es un componente con conectividad 4, por otro lado si tiene 8 vecinos, C tiene conectividad 8.

Por medio de este etiquetado y usando conectividad 8 se realiza entonces el conteo de las líneas nasales previamente segmentadas.

2.5. Validación

En la evaluación de la segmentación de la región nasal se mide la tasa de detección, la cual se define como la relación entre casos detectados y el total de casos analizados. Por otro lado, puesto que el número de líneas de la nariz es una variable categórica, es decir que indica categorías o es etiquetada numéricamente (1, 2 o 3 líneas), y no existe un ordenamiento intrínseco de sus niveles [16], no es adecuado hallar medidas como el promedio; son más convenientes otras como el valor predictivo positivo.

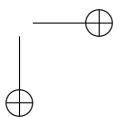
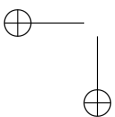
El valor predictivo positivo (VPP) es una medida porcentual que indica cuántos resultados positivos son realmente positivos, y que se respalda con la región identificada por el experto, la cual asumimos como el “*gold standard*” o patrón de referencia. Si el valor es alto (cercano a 100%), advierte que el algoritmo propuesto entrega resultados acertados [17].

En términos de la detección correcta de las líneas de la nariz, se calcula como la relación de la cantidad de líneas encontradas y que corresponden al patrón de referencia (verdaderos positivos), y el total de las líneas halladas (verdaderos positivos (VP) más falsos positivos (FP)) (Ecuación 15):

$$VPP = \frac{VP}{VP + FP} \quad (15)$$

Adicionalmente se mide el porcentaje de error del número de líneas total por categoría, como se muestra en la Ecuación 16.

$$\%error = \frac{|\# \text{ líneas esperadas} - \# \text{ líneas halladas}|}{\# \text{ líneas esperadas}} \times 100\% \quad (16)$$



3. Resultados

La base de datos usada en la validación de este método está compuesta por un conjunto de 299 imágenes ecográficas de diferentes pacientes. La adquisición de las imágenes fue realizada a través del ecógrafo Voluson E6 con una resolución de 800×600 píxeles en espacio RGB. Las Figuras 5a y 6b muestran el ejemplo de una correcta segmentación; en la Figura 5c se aprecia el ejemplo de la confusión de líneas debido a la cercanía de la piel y la punta de la nariz. Finalmente, la Figura 5d muestra un ejemplo de cuando alguna línea no es hallada.

Con respecto a la región de la nariz para las 299 imágenes se identificó correctamente la región nasal en 187, es decir en 62,54 % de las imágenes.

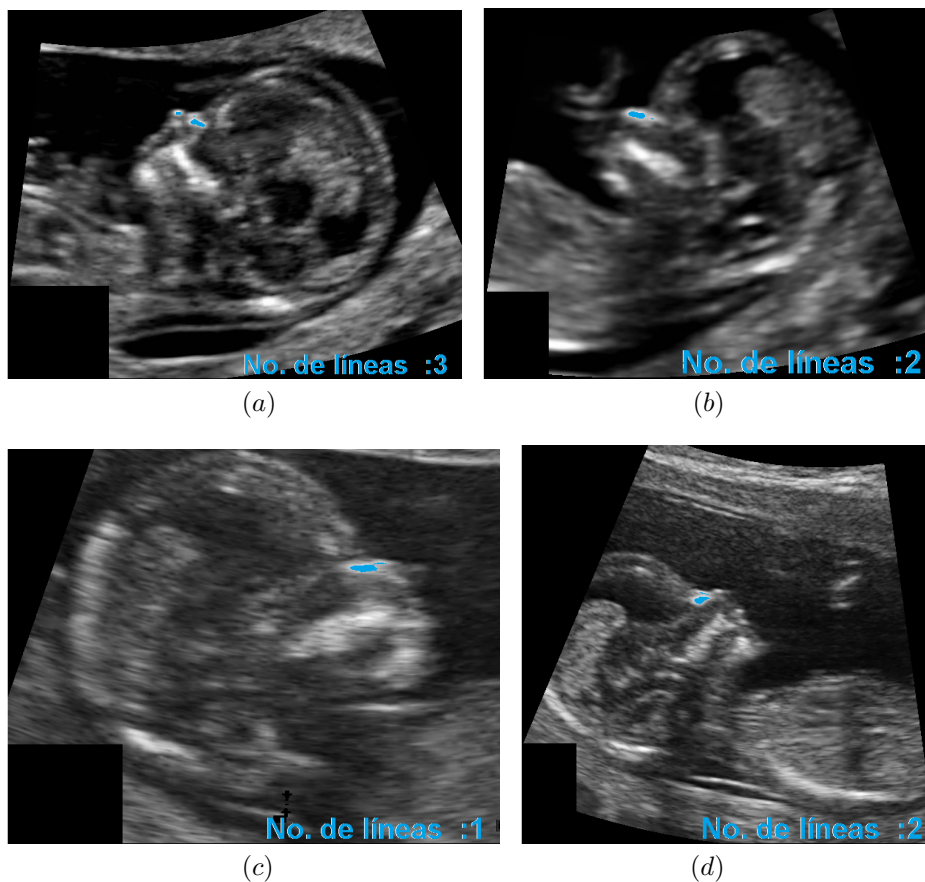


Figura 5. Resultado de líneas segmentadas en 4 imágenes ecográficas.

La Tabla I indica los resultados de la cantidad de imágenes relacionadas con el número de líneas identificadas, y la Tabla II relaciona la cantidad de VP y FP del total de líneas, para las 187 imágenes en las que la región nasal fue correctamente detectada.

Tabla I. Conteo líneas de la nariz con respecto a la cantidad de imágenes

Líneas encontradas \ Líneas esperadas	1	2	3	Total
	1	29	40	39
2	4	21	30	55
3	2	6	7	15
Más	0	1	8	9
Total	35	68	84	187

Tabla II. Conteo líneas de la nariz con respecto a la cantidad de líneas esperadas.

VP: Verdaderos positivos; FP: Falsos positivos; VPP: Valor predictivo positivo

Líneas encontradas \ Líneas esperadas	1			2			3		
	No. Líneas	VP	FP	No. Líneas	VP	FP	No. Líneas	VP	FP
1	29	29	0	40	40	0	39	39	0
2	8	5	3	42	40	2	60	53	7
3	6	2	4	18	8	10	21	16	5
Más	0	0	0	5	2	3	44	16	28
Total	43	36	7	105	90	15	164	124	40
VPP	83,72 %			85,71 %			75,61 %		
Error	19,44 %			16,67 %			32,26 %		

La tasa de detección de la región de la nariz fue de 62,54 % para imágenes en las cuales se encontraba el área nasal. En cuanto a las líneas de la nariz, el mejor valor predictivo positivo obtenido fue de 85,71 % con error de 16,67 % para imágenes con 2 líneas; y el peor, de 75,61 % con error de 32,26 % para imágenes con 3 líneas.

4. Discusión

El análisis realizado sobre la totalidad de las imágenes permitió establecer características comunes como el estimativo del área de la región nasal en 1,5 % respecto a la cabeza del feto y la similitud de esta a una elipse, que facilitan la adaptación del modelo a cada ecografía fetal y en consecuencia contrarresta en gran parte la incertidumbre entre imágenes. De cualquier manera, esta última tuvo implicaciones directas en los resultados obtenidos, ya que a pesar de que el método planteado es automáticamente ajustable a cada imagen, factores como el ruido, debido a elementos como la cantidad de tejido adiposo materno o movimientos continuos del feto, dificultan la segmentación.

Los resultados obtenidos en tasa de detección de la región de la nariz crean la necesidad de buscar nuevas alternativas para aumentar el porcentaje de detección. En cuanto a los resultados

obtenidos en el número de líneas de la nariz se debe considerar la existencia de trabajos con resultados de mayor valor porcentual, como por ejemplo el trabajo de Anjit y Rishidas que presenta una tasa de detección del 88 %, pero que fueron precedidos por una preselección de las imágenes. En este trabajo, a diferencia, no se realizó ninguna preselección puesto que se buscó desarrollar un método como punto de partida para la extracción de características de cualquier imagen ecográfica de las 11-13⁺⁶ semanas de gestación. Es de anotar que una preselección realizada por un experto en imágenes ecográficas fetales descarta en promedio un 90-95 % de las imágenes tomadas por otros especialistas.

Por otra parte, la cercanía que presenta la piel y la punta de la nariz hace que se confundan tales líneas y aumente el error en su conteo. Esto se refleja en los resultados que muestran la menor tasa de detección en las imágenes con tres líneas y la mayor tasa de detección en las que contienen dos líneas. Adicionalmente, el ruido (*speckle*) afecta la detección, en tanto que al ser ruido moteado se confunde con las líneas y da lugar a los falsos positivos. Así mismo, la atenuación en las variaciones de contraste añadidas por el ruido genera la confusión de unas líneas con otras de forma que el método llega a identificar dos líneas diferentes como una sola.

Por otro lado, el proceso jerárquico desarrollado implica subordinación de los resultados de una etapa a la anterior. Por lo tanto, los resultados finales correspondientes al número de líneas dependen directamente de la selección adecuada de la región nasal. Esto debido a que si la región no se identificó en su totalidad, se disminuye el número de líneas que se segmentan. Las variaciones de contraste son determinantes en la segmentación adecuada de la región nasal y las líneas de la nariz.

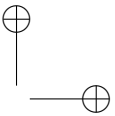
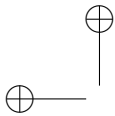
5. Conclusiones

El método propuesto establece un punto de partida para la investigación dedicada a la extracción automática de características, útiles en la validación de imágenes ecográficas de las 11-13⁺⁶ semanas de gestación. Debido a que este trabajo es una incursión inicial en la investigación de la selección de parámetros de este tipo de imágenes, no es un resultado definitivo. Sin embargo, a futuro puede llegar a ser una herramienta de ayuda para la auditoría de imágenes tomadas por los especialistas, lo que permitiría disminuir la subjetividad en la evaluación de las imágenes. En el proceso de auditoría de las imágenes son eliminadas un promedio de 90 a 95 % por no ser idóneas para el análisis por parte del especialista. Como trabajo futuro se sugiere el uso de otros métodos de procesamiento que permitan balancear la variación de intensidades de manera homogénea, con el fin de mejorar la selección de máximos regionales, lo que aumentaría la tasa de detección del área nasal. Por otro lado, modelos de aprendizaje no supervisado, tales como la máquina de soporte de vectores o *support vector machine* (SVM), podrían realizar una clasificación más detallada de la cantidad de líneas de la nariz; adicionalmente incluirían el parámetro de 0 líneas que no se evalúa en este trabajo como consecuencia de la naturaleza de los métodos utilizados. Así mismo y dado que el especialista al entregar el “gold standard” o criterio de comparación solo entrega el número total de líneas, en un trabajo futuro se podría evaluar que la línea encontrada corresponda claramente a la punta de la nariz, el hueso nasal o piel, sin embargo no hay características de forma que las diferencien. De igual manera, dedicar un trabajo al modelamiento del ruido *speckle* sería un punto de partida para la mejora notable de los resultados.

Agradecimientos: Los autores agradecen a la Clínica de Obstetricia y Ginecología Ltda y al Dr. Jaime Arenas Gamboa por sus invaluable sugerencias y por el tiempo dedicado en la recolección de la base de datos necesaria para este estudio.

Referencias

- [1] Kypros H. Nicolaides y Orlando Falcón, *La ecografía de las 11- 13+6 semanas*. Fetal Medicine Foundation, Londres, 2004.
- [2] K. T. A. Anjit y S. Rishidas, "Identification of nasal bone for the early detection of down syndrome using Back Propagation Neural Network," 2011 International Conference on Communications and Signal Processing, 2011, pp. 136-140.
- [3] Sami Abdulla y Haidi Ibrahim, "Mathematical Equations for Homomorphic Filtering in Frequency Domain : A Literature Survey," 2012 International Conference on Information and Knowledge Management (ICIKM), 2012, pp. 74-77.
- [4] Rafael. C. Gonzalez y Richard. E. Woods, *Digital Image Processing*, 3rd ed. Pearson International, 2009.
- [5] Nikhil J. Dhinagar y Mehmet Celenk, "Ultrasound Medical Image Enhancement and Segmentation Using Adaptive Homomorphic Filtering and Histogram Thresholding," 2012 International Conference on Biomedical Engineering and Sciences, 2012, pp. 349-353.
- [6] Departamento de Electrónica y Automática - Facultad de Ingeniería - U.N.S.J Capítulo 3: Técnicas de realce de Imágenes en Medicina (Bioingeniería), disponible en <http://dea.unsj.edu.ar/imagenes/recursos/capitulo3.pdf>
- [7] P. Soille, *Morphological Images Analysis, Principles and Applications*. 2nd ed, Springer, Italia, 2003-2004.
- [8] Luc Vincent, "Morphological grayscale reconstruction in image analysis: applications and efficient algorithms". *IEEE Transactions on Image Processing*, volumen 2, Número 2, 1993, pp.176-201.
- [9] Miguel Garre, Juan Cuadrado, Miguel A. Sicilia, Daniel Rodríguez y Ricardo Rejas, "Comparación de diferentes algoritmos de clustering en la estimación de coste en el desarrollo de software." *Revista Española de Innovación, Calidad e Ingeniería del Software*, Volumen 3, Número 1, 2007, pp. 6-22.
- [10] Matteo Matteucci, *A tutorial on Clustering algorithms: Fuzzy K-means*, 2013, disponible en http://home.deib.polimi.it/matteucc/Clustering/tutorial_html/cmeans.html
- [11] Omer Demirkaya, Prasanna K. Sahoo, and Musa Hakan, *Images Processing with MATLAB, Applications in Medicine and Biology*, CRC Press, 2009J. Jones, *Networks*, 10 de mayo de 1991, disponible en <http://www.atm.com>.
- [12] Ranjan Maitra y Ivan P. Ramler, A k-mean-directions Algorithm for Fast Clustering of Data on the Sphere, disponible en <http://www.public.iastate.edu/maitra/papers/kmndirs.pdf>
- [13] Bharati R. Jipkate y V.V.Gohokar, "A Comparative Analysis of Fuzzy C Means Clustering and K Means Clustering Algorithms", *International Journal Of Computational Engineering Research*, Volumen 2, Número 3, May-June 2012, pp. 737-739.
- [14] Klaus D. Toennies, *Guide to Medical Image Analysis*. Springer, London, 2012.
- [15] Luigi Di Stefano y Andrea Bulgarelli, "A simple and efficient connected components labeling algorithm," 10th International Conference on Image Analysis and Processing. *IEEE Comput. Soc.*, 1999, pp. 322-327.
- [16] James D. Leeper, What is the difference between categorical, ordinal and interval variables?, 2014, disponible en http://www.ats.ucla.edu/stat/mult_pkg/whatstat/nominal.ordinal.interval.htm
- [17] Rajul Parikh, Annie Mathai, Shefali Parikh, G Chandra Sekhar, y Ravi Thomas, "Understanding and using sensitivity, specificity and predictive values", *Indian Journal of Ophthalmology*, Volumen 56, Número 1, 2008, pp. 45-50.



Angee Paola Ballesteros Maldonado

Nació en Bogotá, Colombia. Es ingeniera electrónica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, de Bogotá, Colombia. Sus áreas de interés son el procesamiento digital de imágenes, la inteligencia computacional y el control.
e-mail: apballesterosm@correo.udistrital.edu.co

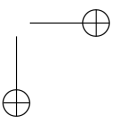
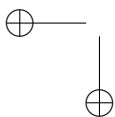
Laura Catalina López Alza

Nació en Bogotá, Colombia. Es ingeniera electrónica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, de Bogotá, Colombia. Sus áreas de interés son el procesamiento digital de imágenes, la inteligencia computacional y el control.
e-mail: llopeza@correo.udistrital.edu.co

Rodrigo Javier Herrera García

Nació en Bogotá Colombia. Es ingeniero electrónico de la Universidad Distrital, de Bogotá, Colombia. Obtuvo su título de Maestría en Ciencias de la Información y las Comunicaciones en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá, Colombia. Se desempeñó como docente universitario desde 1988 en las Universidades Santo Tomás de Aquino y Distrital de Bogotá en las áreas de sistemas digitales y electrónica analógica. A partir de 1997 se vinculó como profesor de tiempo completo en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Actualmente se desempeña como profesor en el área de procesamiento de señales en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá, Colombia, y es director del grupo de investigación, desarrollo y aplicaciones en señales IDEAS-UD, donde realiza estudios sobre procesamiento digital de imágenes.
e-mail: rherrera@udistrital.edu.co



Reporte de Caso

César Augusto Solano Villanueva
Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
casolanov@correo.udistrital.edu.co

Johan Fabiel Casas Díaz
Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
jfcasasd@correo.udistrital.edu.co

Juan Carlos Guevara Bolaños
Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
jcguevarab@udistrital.edu.co



Aplicación móvil de realidad aumentada para la enseñanza de la clasificación de los seres vivos a niños de tercer grado

A Mobile Augmented Reality Application for Teaching the Classification of Living Things to Primary School's Children

Resumen

Las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) han tenido un gran impacto en los últimos años en el aula de clase, obteniendo resultados prometedores en el apoyo al proceso educativo. Lo anterior hace indispensable crear herramientas innovadoras que fortalezcan los procesos de enseñanza y aprendizaje de los estudiantes, además de motivarlos a usar estas tecnologías tanto fuera como dentro del aula. En este artículo se presenta el desarrollo de una herramienta de este tipo, en donde se incorporan mecanismos de Realidad Aumentada (RA) en la enseñanza de temas biológicos en niños de tercer grado de primaria, y adicionalmente se plantea el modelo de evaluación que se utilizará para medir el impacto del software.

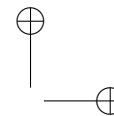
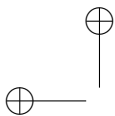
Palabras claves: ciencias naturales, constructivismo, educación primaria, objetos virtuales, realidad aumentada.

Abstract

The Information and Communication Technologies (ICT) have had an important development in recent years with promising results in supporting learning processes in the classroom. For this reason, it is important to create innovative tools to motivate teachers and students to use these kind of technologies both inside and outside the classroom. This paper describes the development of a tool in this direction, aimed at helping students of third grade of primary school in learning classification of living beings aided with Augmented Reality (AR) techniques. Additionally an evaluation model is proposed to measure the impact of the software.

Key words: augmented reality, constructionism, natural science, primary education, virtual objects.

Recibido: 09-02-2015
Modificado: 16-03-2015
Aceptado: 20-04-2015



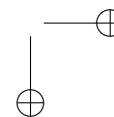
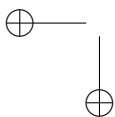
1. Introducción

Las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) son herramientas tecnológicas que permiten acceder, producir, guardar, presentar y transferir información [1]; dichas herramientas se han abierto paso a través de los años permeando cada uno de los aspectos de nuestra vida (social, político, económico, cultural, etc.) con lo que han demostrado el gran impacto que poseen. Sin embargo, existe una brecha acentuada en los países en vías de desarrollo conocida como la brecha digital. Entre los esfuerzos por disminuir dicha brecha, el factor económico adquiere una gran importancia, aunque en algunos casos la educación también juega un papel importante. Es por esto que la formación en TIC de los docentes y el respectivo acercamiento a sus estudiantes es un factor sustancial en la eliminación de la brecha digital [2].

Numerosos estudios han demostrado que en todo proceso de cambio o renovación de los procesos de enseñanza-aprendizaje de las ciencias, los docentes son el componente clave, en razón a que deben estar convencidos de que se necesita de su innovación, creación y actitud hacia el cambio para responder a los planteamientos y propósitos que se fijan en las propuestas didácticas, así como para cumplir con las exigencias de los contextos [3]. Sin ellos, adoptar nuevos modelos o modificar los ya existentes sería imposible.

La ciencia y la tecnología (CyT) tienen una presencia ubicua, notoria y significativa en la sociedad. Sus repercusiones en la economía, la política, la educación, la cultura, el ocio, etc., ponen de relieve su destacado papel en las decisiones, tanto personales como colectivas [4]. En una sociedad globalizada como la actual se observa un alto grado de consenso en cuanto a la necesidad de practicar una enseñanza científica capaz de formar alumnos como ciudadanos, en el sentido de que puedan usar la información científica en el momento de tomar decisiones de forma fundamentada. Para conseguir esto en la educación primaria, se debe plantear una ciencia que enseñe a pensar, hacer, hablar, a regular los propios aprendizajes y trabajar en interacción [5]. Se trata de acercar la ciencia a los intereses de los alumnos abordando las implicaciones sociales y éticas que el impacto tecnológico conlleva; este enfoque facilitará el uso en la vida diaria de lo aprendido en la escuela. Bajo este prisma, la enseñanza de las ciencias deja de concebirse como una opción para alumnos de élite y se convierte en un instrumento para la alfabetización tecnológica de los ciudadanos que los ayuda a comprender los problemas que tiene la sociedad actual y los facultar para la toma de decisiones fundamentadas y responsables [6].

Ahora bien, se han identificado varios problemas de la enseñanza de las ciencias a nivel mundial: el primero es la gran cantidad de profesores que no tienen la formación adecuada, lo cual se puede traducir en una falta de confianza en su capacidad de enseñar ciencias adecuadamente. Segundo, en la mayoría de los currículos de las distintas ciencias se abarcan demasiados temas y contenidos, lo cual no solo hace más difícil la labor docente, sino que además interfiere con la posibilidad de que el estudiante haga el ejercicio necesario de reflexión, lo cual es fundamental para la comprensión de cualquier tema [7]. Y por último, se puede apreciar que los científicos han dado respuesta a los diferentes fenómenos, pero este conocimiento queda plasmado en los textos que ellos mismos elaboran, con un lenguaje bastante avanzado, y estas respuestas deben ser conocidas por todas las generaciones, las cuales deben tener acceso al conocimiento científico.



La enseñanza de las ciencias en Colombia ha seguido un desarrollo paralelo al que han tenido los correspondientes estudios en el mundo. Sin embargo, ha presentado problemas como: el aprendizaje memorístico y repetitivo que no lleva a una comprensión real de las teorías y las explicaciones, la permanencia de ideas previas, preconceptos o preteorías que se oponen a las explicaciones y teorías de las ciencias, la incapacidad por parte de los estudiantes de resolver verdaderos problemas, el desconocimiento por parte de los maestros de los modos de conocimiento de los estudiantes, el temor de los estudiantes de expresar el propio punto de vista y discutirlo y defenderlo, la ausencia de autocrítica y de flexibilidad [8].

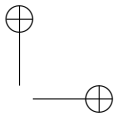
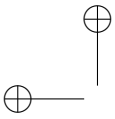
Con el fin de delimitar el problema, se eligió el tema de la clasificación de los seres vivos en el grado de tercero de primaria, ya que es un concepto estructurante de la biología, además de que se imparte en varios años de escolaridad, aunque es en el grado tercero donde se inicia este proceso [9].

Debido a estos problemas en la educación, el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones de Colombia creó la iniciativa “Tabletas para educar”, liderada por Computadores para Educar, mediante la cual se beneficia a las instituciones educativas públicas del país con tabletas con el propósito de fortalecer las dinámicas de aprendizaje de los estudiantes, favorecer la inclusión social y generar más y mejores oportunidades en cada región de la mano de la tecnología. Las tabletas son herramientas óptimas para la distribución, producción y consumo de contenidos educativos de distintos formatos y características: leer, jugar, ver videos, editar, producir estructuras, etc. [10]. Por esto se hace evidente la necesidad de crear aplicaciones para dispositivos móviles que estén orientadas y diseñadas con fines educativos y permitan mejorar los procesos educativos de las instituciones favorecidas por este programa.

La idea de usar software educativo de realidad aumentada (RA) para facilitar los procesos de enseñanza en las aulas de clase va ligada estrechamente al modelo constructivista, el cual se basa fundamentalmente en dos principios: el primero indica que el conocimiento no es recibido pasivamente, sino construido activamente por el sujeto pensante que realiza el acto del conocimiento; el segundo establece que la función de la cognición es adaptativa y sirve a la organización del mundo experiencial, no al descubrimiento de una realidad ontológica [11]. Estos principios permiten usar las TIC como herramientas del constructivismo para incentivar al estudiante a ser parte activa en la construcción de su propio conocimiento.

Desde su creación, la RA ha sido motivo de interés para diversos investigadores quienes vieron en esta tecnología un gran potencial para diversos campos de las ciencias naturales, entre ellas la clasificación de los seres vivos; además, su uso en la educación permite que los estudiantes difuminen en cierta medida las fronteras del mundo real y el digital.

Debido a las ventajas que proporciona el uso de RA en el área de la educación, se ha planteado realizar una aplicación que permita enseñar la clasificación de los seres vivos, la cual además de permitir visualizar contenido virtual, permitirá a los estudiantes enlazar sus experiencias con los conceptos aprendidos en el aula de clase con el fin de que puedan realizar una reflexión de lo aprendido. Por su parte, el docente tendrá la posibilidad de monitorear el uso y avance de la aplicación para que pueda medir y retroalimentar sus estrategias educativas.



El presente artículo se divide en las siguientes secciones: revisión de la literatura, donde se describe qué es la RA y cuáles han sido las aplicaciones más significativas que han surgido para esta tecnología; luego, en metodología, se indican cuáles metodologías usar y la forma en que estas se combinan para alcanzar nuestro objetivo; en herramientas de desarrollo se hace una breve descripción las tecnologías más importantes para llevar a cabo este proyecto; en descripción de la solución se relata cómo se integran los diferentes componentes del proyecto para crear nuestra aplicación y se describen todas las funcionalidades del sistema; en la sección de resultados se presentan los avances alcanzados en la aplicación y el modelo de evaluación tecnológica que se usará; para finalizar se encuentran las conclusiones obtenidas hasta el momento, el trabajo futuro en el cual se plasman algunas ideas acerca de posibles proyectos que se puedan derivar a partir de este trabajo y las referencias utilizadas en el texto.

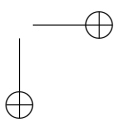
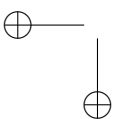
2. Revisión de la literatura

Los sistemas de RA son sistemas que combinan el mundo real y el virtual para ayudar al usuario a realizar una tarea en el mundo físico. Esta tecnología ha despertado el interés de muchos investigadores debido a que existe una gran necesidad por parte de los usuarios en beneficiarse tanto de las computadoras como del mundo real. La RA incorpora contenidos de realidad virtual (RV), pero se diferencia de esta, pues la RV se encuentra aislada del mundo y sus escenarios son puramente virtuales, mientras los sistemas de RA presentan las siguientes características [12]:

- Agregan información gráfica en 3D al mundo real
- Agregan información de audio dentro del mundo real
- Usan un *feedback* muy fuerte como posible método para aumentar las capacidades del usuario para interactuar con el mundo real.

Una vez la RA es llevada al aula de clase para el uso en la enseñanza de las ciencias, se pueden apreciar las siguientes ventajas [7]:

- Aumenta y apresura la capacidad de trabajo de los alumnos
- Provee acceso a fenómenos que serían muy difíciles o imposibles de observar de otra forma en una escuela primaria normal
- Ayuda a la experimentación porque proporciona una retroalimentación visual inmediata
- Enfoca la atención de los alumnos en aspectos poco obvios y resalta así conceptos abstractos
- Propicia el aprendizaje colaborativo y autorregulado
- Aumenta la motivación y el compromiso de los alumnos.



A continuación se presentan algunas de las aplicaciones de realidad aumentada que han incursionado en la educación y que han obtenido mayor popularidad.

Anatomy 4D: es una aplicación para dispositivos móviles IOS y Android. Su objetivo es permitir a los estudiantes de todo el mundo aprender la anatomía de forma rápida y precisa, en cualquier lugar y a cualquier hora. Su diseño permite que la puedan utilizar desde estudiantes de colegio hasta profesionales de la medicina. Esta aplicación fue desarrollada con el SDK de Vuforia en conjunto con Unity3d, en la Figura 1 se puede apreciar un ejemplo de la aplicación.



Figura 1. Ejemplo Anatomy 4D.

Fuente: [13]

Sesame Street: permite a los niños usar un teléfono inteligente como un ojo digital en ambientes reales para encontrar, identificar y aprender acerca de las palabras de su entorno, con lo que ayuda a una mayor comprensión de su significado mediante la exposición de los niños a ellas en contextos familiares. En la Figura 2 se puede ver una imagen de esta aplicación.



Figura 2. Imagen ilustrativa de la aplicación Sesame Street.

Fuente: [14]

Por último está la revista médica Neurosurgery, revista oficial del Congreso de Cirujanos Neurológicos, que publica más de 3.000 páginas de contenido cada año y utiliza la realidad aumentada para dar al lector una mejor comprensión de los artículos publicados en la revista.

La RA puede ser considerada como una de las muchas formas de software educativo, el cual se define como programas de computación realizados con el objetivo de ser empleados en la mejora de los procesos de enseñanza y, consecuentemente, de aprendizaje. Existen varias clasificaciones de software educativo: por tipo de aplicación, por su función educativa

o por su fundamentación educativa, pero independientemente de esto, deben poseer ciertas características para que pueda ser considerado educativo (Tabla I) [15].

Tabla I. Características del software educativo

Características	Descripción
Facilidad de uso	Deben ser en lo posible autoexplicativos y con sistemas de ayuda
Capacidad de motivación	Deben mantener el interés de los alumnos
Relevancia curricular	Deben estar relacionados con las necesidades del docente
Versatilidad	Deben ser adaptables al recurso informático disponible
Enfoque pedagógico	Den ser actuales: constructivista o cognitivista
Orientación hacia los alumnos	Deben tener control del contenido del aprendizaje
Evaluación	Deben incluir módulos de evaluación y seguimiento

3. Metodología

Dado el carácter multidisciplinar del proyecto, fue necesario analizar varias metodologías que permitieran establecer una guía con respecto a cada uno de los componentes conceptuales que lo integran, lo cual dio como resultado el uso de tres metodologías: la primera es Scrum, usada para el desarrollo del software de una manera ágil y rápida [16]; la segundo es AODDEI (Análisis, Obtención, Diseño, Desarrollo, Evaluación, Implementación) para el desarrollo de la parte pedagógica [17]; y por último está el modelo TAM (*Technology Acceptance Model*), que predice cómo los usuarios aceptan y utilizan una herramienta tecnológica [18]. En la Tabla II se describe cómo se integran estas metodologías.

Tabla II. Integración de metodologías para el desarrollo del proyecto

Metodología Fase	Scrum	AODDEI	TAM
Requerimientos	Product Backlog	-	Definición de las variables
Análisis	Spring Planning	Análisis y obtención del material	-
Diseño	Meeting		-
Implementación	Sprint Backlog	Armado o creación	-
Pruebas	Spring Review, Sprint Retrospective	Evaluación e Implementación	Validación del modelo

Como se puede apreciar, las tres metodologías se descompusieron en cinco fases, que se describen a continuación con las actividades necesarias para el desarrollo del proyecto:

Requerimientos: para el desarrollo del software se establece el Product Backlog, el cual contiene todas las tareas necesarias. En cuanto a TAM, es necesario definir las variables que se utilizarán para la validación del modelo

Análisis y diseño: esta fase es compartida tanto por Scrum como por AODDEI; lo que se hace es planificar las tareas que se realizan en las iteraciones definidas en Scrum, así como la elección del material didáctico educativo para la aplicación de RA.

Implementación: se realizan las tareas definidas en el Sprint Backlog de la aplicación de RA, así como la elaboración del material didáctico que no se haya podido obtener; al finalizar cada iteración se hará el Sprint Review para revisión del producto.

Pruebas: se realizan las pruebas de la aplicación antes de realizar el Sprint Retrospective, una vez finalizado el software, al mismo tiempo que se hará la validación de la tecnología con el modelo TAM.

4. Descripción de la solución

La aplicación se utilizará como una herramienta para ofrecer una perspectiva más realista de algunos contenidos como talleres del libro de ciencias naturales elegido; de esta forma, el estudiante podrá percibir más información de un contenido tridimensional digital que en un escenario real, y a su vez podrá resolver con mayor facilidad los talleres planteados. En la Figura 3 se puede ver el modelo conceptual de la aplicación, con cada uno de los módulos que van a ser creados o están en desarrollo, seguido de la descripción y funcionamiento.

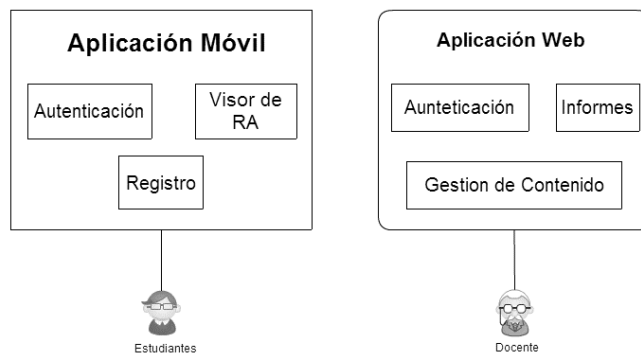


Figura 3. Modelo conceptual de la solución propuesta.

Fuente: los autores

En primer lugar se encuentra la aplicación móvil desarrollada en Android, la cual será de uso enteramente para los estudiantes y poseerá dos módulos: el primero será de autenticación

y registro de usuarios, el segundo será el de realidad aumentada, encargado de mostrar los modelos en 3D y demás contenidos multimedia en la pantalla del dispositivo. Esto es posible gracias a que el SDK Vuforia permite capturar una imagen e identificar si hay algún elemento utilizado como marcador; si el contenido es un modelo en 3D, se visualizará inmediatamente, puesto que ya se encuentra almacenado en el dispositivo para dar un mejor rendimiento. En caso de que sea cualquier otro contenido multimedia, se establecerá una comunicación hacia los servicios web por medio de JavaScript con el fin de recuperar del servidor dichos recursos y presentarlos al usuario, en este caso el estudiante.

Estos servicios web además de obtener los contenidos multimedia del servidor, también serán los encargados de consultar y almacenar la información del sistema en general a través de una conexión directa a la base de datos, lo que permitirá que en un futuro se pueda interactuar con otras aplicaciones, de ser necesario. Dichos servicios web están creados bajo la arquitectura *Representational State Transfer* (REST) para dar una mayor flexibilidad y escalabilidad.

Por otro lado, se encuentra la aplicación web destinada a los docentes; su principal objetivo es servirle al profesor como fuente primaria de información acerca del manejo de la aplicación móvil por parte de sus estudiantes, puesto que le permitirá consultar indicadores de uso y avance. Otra de sus funcionalidades es la gestión de los contenidos, es decir, los docentes pueden agregar nuevos contenidos que consideren útiles, como videos, imágenes o audios.

La aplicación web se encuentra dentro del servidor Glassfish junto con los servicios web, y al igual que estos también tendrá una conexión a la base de datos del sistema para que el docente pueda consultar la información de sus estudiantes.

En la Figura 4 se puede apreciar la arquitectura de la aplicación, donde se visualiza más claramente la comunicación entre módulos y tecnologías.

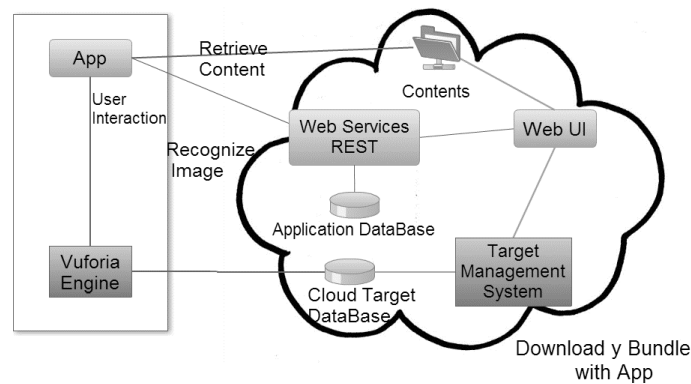


Figura 4. Arquitectura planteada para la aplicación.

Fuente: [19] modificado por los autores

Por último se describen las tecnologías usadas para el desarrollo de este proyecto, las cuales son:

Lenguaje de Programación: son tres, el primero es Java EE 6 para la aplicación web que mejora significativamente la productividad del desarrollador, presenta un perfil web ligero para aplicaciones web e incluye las últimas versiones de tecnologías como JAX-RS 1.1, JavaServer Faces(JSF) 2.0, Enterprise JavaBeans (EJB) 3.1, Java Persistence (App) 2.0, Context and Dependency Injection (CDI) 1.0 y mucho más. El segundo es Android, ya que es de código abierto y permite llegar a una mayor cantidad de dispositivos. Y por último, JavaScript, el cual es un lenguaje de programación interpretado muy poderoso y popular para la web y que permite mejoras en la interfaz de usuario y páginas web dinámicas.

Servidor de aplicaciones: GlassFish es un servidor de aplicaciones de código abierto compatible con Java EE, listo para funcionar en entornos de producción. GlassFish v3 proporciona una pequeña base con todas las funciones para la implementación de Java EE 6.

Motor de RA: Vuforia es un *software developer kit* (SDK) para el desarrollo de aplicaciones de RA que usa la pantalla de los dispositivos móviles como lente “mágico” para hacer coexistir el mundo virtual con el mundo real. Permite el reconocimiento de imágenes y objetos del mundo real de una manera fácil y sencilla.

Game Engine: Unity 5 es una plataforma de desarrollo poderosa y flexible para la creación de juegos y experiencias interactivas en 2D y 3D. Unity es similar a motores de juegos como Blender, Virtools y Torque Game Builder, pero se destaca por su robustez y sencillez.

Base de datos: PostgreSQL es un sistema de gestión de bases de datos objeto-relacional, distribuido bajo licencia BSD y con su código fuente disponible libremente. Es el sistema de gestión de bases de datos de código abierto más potente del mercado. Utiliza un modelo cliente/servidor y usa multiprocesos en vez de multihilos para garantizar la estabilidad del sistema.

5. Resultados

Debido a que el presente proyecto aún se encuentra en fase de desarrollo, este artículo pretende presentar los avances alcanzados hasta la fecha con respecto de la aplicación móvil de RA y el modelo de evaluación que se utilizará para medir el impacto del software.

5.1. Aplicación móvil

Los resultados obtenidos hasta el momento con respecto a la aplicación móvil de realidad aumentada consisten en el módulo de registro y autenticación (Figura 5).



Figura 5. Capturas de pantalla del módulo de registro y autenticación.

Fuente: los autores

En la Figura 6 se aprecia la interfaz principal de la aplicación en la cual se encuentra un menú de opciones, además se habilita la cámara para que el usuario pueda escanear un marcador cualquiera.

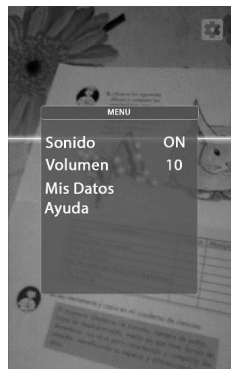


Figura 6. Captura de pantalla de la interfaz principal.

Fuente: los autores

Adicionalmente también se implementó el sistema que escanea los marcadores del libro guía y muestra el respectivo contenido. En la Figura 7 se puede ver el modelo en 3D de una ballena.

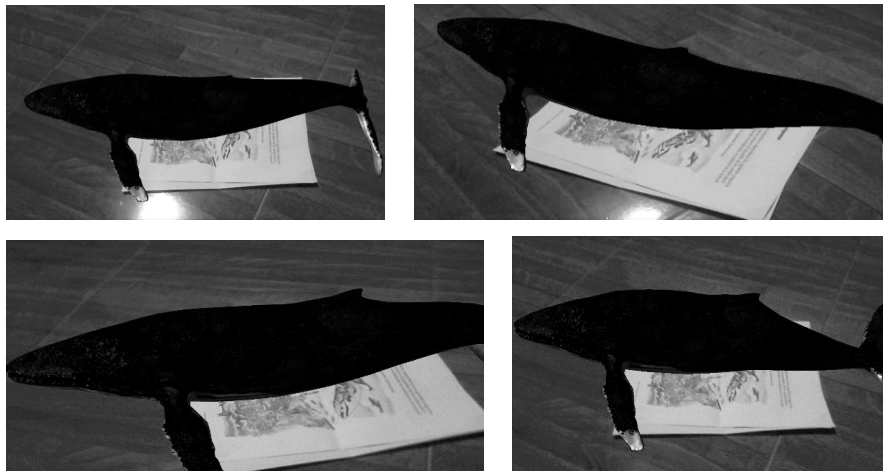


Figura 7. Modelo en 3D de una ballena.

Fuente: los autores

En la Figura 8 se puede apreciar otro de los modelos en 3D, que corresponde a una mariposa agitando las alas.

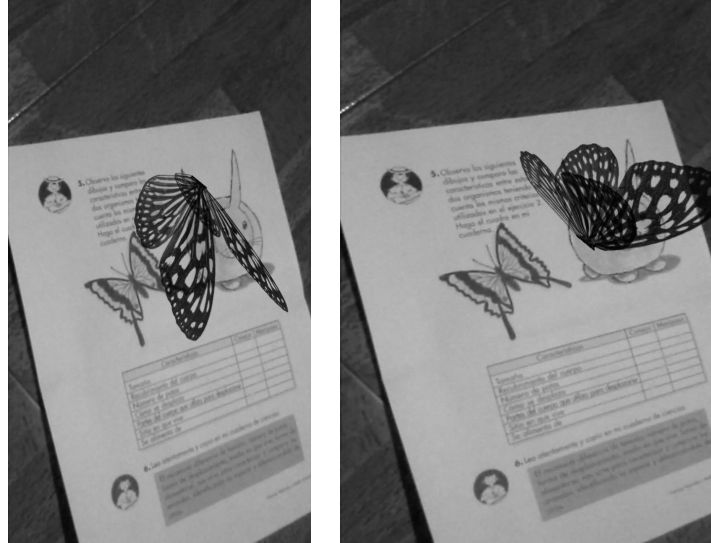


Figura 8. Modelo en 3D de una mariposa.

Fuente: los autores

Por último, en la Figura 9 se presenta el módulo de datos personales de la aplicación web donde el docente puede consultar y modificar sus datos así como el de sus estudiantes.

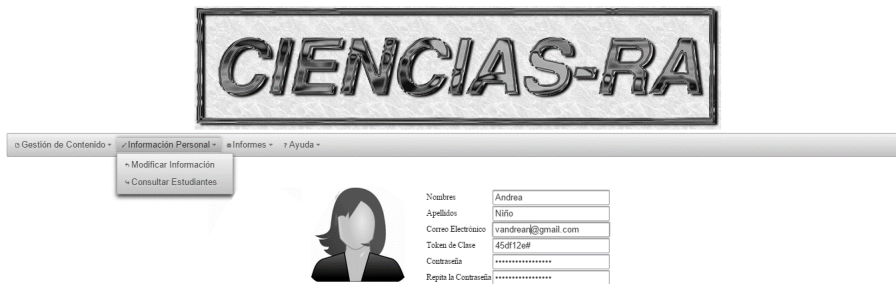


Figura 9. Captura de pantalla de la aplicación web.

Fuente: los autores

5.2. Modelo de evaluación

Para medir el impacto de la aplicación tanto en estudiantes como docentes se planteó usar una extensión al modelo TAM [18], para ello se aplicarán encuestas que midan la percepción del usuario con respecto a dos tipos de variables (dependientes e independientes).

Dentro de este modelo extendido se encuentran cuatro variables independientes: la primera es la utilidad estimada (EU), la cual deberá ser establecida por evaluadores externos; la segunda es la facilidad de uso percibida (PEOU), que indica el grado en que una persona cree que podrá usar un sistema sin realizar ningún esfuerzo; la tercera es la intención hacia el uso (BI), que consiste en el grado en el que una persona ha formulado planes conscientes para desarrollar (o no) alguna conducta futura; y la cuarta es el uso (U).

Por otro lado, las variables independientes son tres, las cuales permiten determinar la facilidad de uso de percibida: la primera es la afectividad frente al sistema, la segunda es autoeficacia con respecto al sistema y la tercera es la experiencia usando el sistema.

Como ya se mencionó, estas variables serán medidas a través de la aplicación de encuestas según el modelo extendido de TAM, el cual indica qué aspectos se deben tener en cuenta al momento de formular las preguntas que evalúan cada variable, y así mismo señala que se debe hacer una validación de la encuesta antes de aplicarla a los usuarios reales con el fin de obtener *feedback*. En la Figura 10 se ilustra el modelo de evaluación:

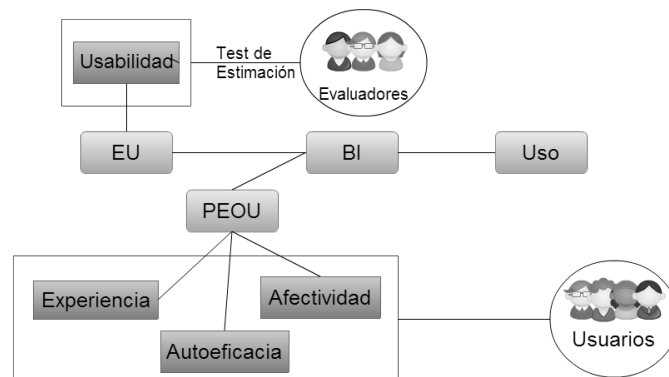


Figura 10. Modelo de evaluación.

Fuente: los autores

Este modelo de evaluación será aplicado a los estudiantes utilizando la estrategia de grupos de control y grupo experimental, donde al primer grupo se le impartirán los temas de clase como se realiza normalmente, mientras que al segundo grupo se le dará acceso a la herramienta y a los cuestionarios que se elaborarán para definir el porcentaje de éxito de la aplicación.

Puesto que este proyecto aún se encuentra en fase de desarrollo, los esfuerzos a los que nos encaminaremos en los próximos meses serán a la culminación exitosa de software y a la realización de las respectivas pruebas bajo el modelo de evaluación explicado. Una vez se hayan culminado estas fases, se procederá a realizar el proceso de *feedback* o retroalimentación con el fin de implementar este proyecto en una escala mayor.

6. Conclusiones

Debido a que la aplicación aún se encuentra en etapa de desarrollo, no es posible tener resultados acerca del uso e impacto del software en la población que se seleccionará, sin embargo se presentan algunas observaciones que nos parecen útiles con el fin de guiar a otros investigadores que trabajen en temas o tecnologías similares.

Al momento construir los servicios web nos enfrentamos a dos alternativas, utilizar SOAP o REST. Las dos tecnologías poseen sus ventajas, pero se decidió implementar servicios web basados en REST por su sencillez a la hora al momento de implementarlos, además de que permite utilizar JSON, una forma de comunicación más rápida que XML.

En una etapa inicial del proyecto no se contempló la idea de usar JavaScript, pero a medida que el desarrollo fue avanzado, se encontró que la invocación de los servicios web a través de la aplicación móvil realizada sobre Android era bastante compleja. Utilizando JavaScript pudimos simplificar este proceso.

Durante el desarrollo de la aplicación web se encontró que para poder crear un módulo que permita gestionar los contenidos multimedia, el docente debería estar en capacidad de crear nuevos marcadores, para lo cual necesitaría previa capacitación en el uso de determinadas herramientas de desarrollo, lo cual no es objetivo de este proyecto, por consiguiente se debe replantear la forma en que los docentes puedan agregar nuevo material.

La utilización de TAM como modelo de aceptación nos permitirá predecir cómo será la utilización de este software por parte de los usuarios, además, el hecho de utilizar una versión modificada nos permite simplificar el modelo, y reducir tiempo y costos en el momento de obtener los resultados de investigación definitivos.

Por último, se pudo apreciar que en los últimos años se ha producido un gran avance con respecto a la inclusión de nuevas tecnologías en el aula de clase con el fin de apoyar los procesos de enseñanza-aprendizaje, así como un cambio en las actitudes y aptitudes de los estudiantes frente a cómo reciben sus clases, por lo que es necesario que los procesos educativos en la escuela se adapten a estos cambios con el fin de incentivar en el alumno el interés por aprender. Tales cambios deben ser impulsados por los docentes, puesto que estudios previos han demostrado que son ellos quienes por medio de las nuevas herramientas mejoran la experiencia educativa de sus alumnos.

7. Trabajo futuro

Una vez este proyecto quede concluido, se puede pensar en hacer una implementación o adaptación a otros dispositivos más allá de los *smartphones* o tabletas, por ejemplo, en tecnologías emergentes como Google Glass, HoloLens de Microsoft, o incluso llegar a plantear proyectos con realidad virtual utilizando el dispositivo Oculus Rift, donde podríamos simular perfectamente un laboratorio completo de física o química, a muy bajos costos, lo cual es muy

posible con la arquitectura que se plantea actualmente. Este proyecto es solo una muestra del potencial que poseen estas tecnologías, la punta del iceberg de lo que se podría lograr

Referencias

- [1] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, “En Tic Confío,” Ministerio de las TIC, disponible en: <http://www.enticconfio.gov.co/index.php/usuariosincredibles/39.html>.
- [2] A. Silva, J. C. Ponce, F. Álvarez, J. Muñoz y C. Collazos, “Red iberoamerica para disminucion de la brecha digital de población vulnerable a través de estrategias de contenidos multiculturales (REDUCE),” LACLO, Volumen 4, Número 1, 2013, pp. 1-10.
- [3] A. Henao y L. González, “Elaboración de un ambiente virtual colaborativo usando eXe Learning para la enseñanza de ciencias naturales,” *Ventana Informática*, Número 31, 2014, pp. 115-130.
- [4] Á. Vázquez y M. Manassero, “La selección de contenidos para enseñar naturaleza de la ciencia y tecnología (parte 1): Una revisión de las aportaciones de la investigación didáctica,” *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, Volumen 9, Número 1, 2012, pp. 2-31.
- [5] L. Cortés, M. Gómez, J. Calvo, M. Martínez y M. Gil, “Expectativas, necesidades y oportunidades de los maestros en formación ante la enseñanza de las ciencias en la educación primaria,” *Enseñanza de las Ciencias*, Volumen 3, Número 30, 2012, pp. 155-176.
- [6] E. Asencio, “Una alternativa didáctica para el perfeccionamiento del proceso de enseñanza-aprendizaje de las ciencias,” *Revista Iberoamericana de Educación*, Número 58, 2012, pp. 81-97.
- [7] G. Moëne, M. Verdi y E. Sepúlveda, “Enseñanza de las ciencias con uso de TIC en escuelas urbano marginales de bajo rendimiento escolar,” en *IX Taller Internacional de Software Educativo*, Santiago, Chile, 2014.
- [8] C. Hernández, “Aproximación a un estado del arte de la enseñanza de las ciencias en Colombia,” en *La investigación educativa y pedagógica en Colombia*, Bogotá, Colciencias – Socolpe, 2011, pp. 1-71.
- [9] M. Solarte, “Análisis de contenidos en los textos escolares de ciencias naturales, aplicando la teoría de la transposición didáctica,” *EDUCyT*, Volumen 1, Número 1, 2010, pp. 175-188.
- [10] MinTIC, “Tabletas para Educar,” disponible en <http://micrositios.mintic.gov.co/tabletas/que-es>.
- [11] J. Tovar y G. García, “Investigación en la práctica docente universitaria: obstáculos epistemológicos y alternativas desde la Didáctica General Constructivista,” *Educ. Pesqui.*, Volumen 38, Número 4, 2012, pp. 881-895.
- [12] J. Andújar, A. Mejías y M. Márquez, “Augmented Reality for the Improvement of Remote Laboratories: An Augmented Remote Laboratory,” *Education, IEEE Transactions on*, Volumen 54, Número 3, 2011, pp. 492-500.
- [13] Daqri 4D Studio, “Anatomy 4D,” Disponible en: <http://www.4danatomy.com/>
- [14] Sesame Workshop, “Sesame Street,” Disponible en: <http://www.sesamestreet.org/>
- [15] E. Ascheri, R. Pizarro, G. Astudillo, P. Garcia y M. Culla, “Software educativo en línea para la enseñanza y el aprendizaje de temas de cálculo numérico,” *Matemática, Educación e Internet*, Volumen 14, Número 2, 2014, pp. 1-28
- [16] D. Godoy, E. Belloni, H. Kotynsky, H. Dos Santos y E. Sosa, “Simulando proyectos de desarrollo de software administrado con Scrum,” en *XVI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*, Tierra del Fuego, Argentina, 2014.
- [17] L. Tovar, J. Bohórquez y P. Puello, “Propuesta metodológica para la construcción de objetos virtuales de aprendizaje basados en realidad aumentada,” *Formación Universitaria*, Volumen 7, Número 2, 2014, pp. 11-20.
- [18] D. Leyton, *Extensión al modelo de aceptación de tecnología TAM, para ser aplicado a sistemas colaborativos, en el contexto de pequeñas y medianas empresas*. Santiago de Chile, Universidad de Chile, 2013.
- [19] GravityJack, “Vuforia Engine,” Disponible en: <https://gravityjack.com/vuforia-sdk-gravity-jacks-browser-code-stack-is-an-augmented-reality-developers-dream>

César Augusto Solano Villanueva

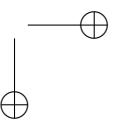
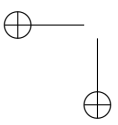
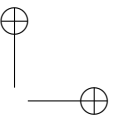
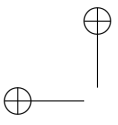
Nació en Bogotá, Colombia. Es tecnólogo en Sistematización de Datos de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, de Bogotá, Colombia. Actualmente es estudiante de último semestre de Ingeniería Telemática de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, de Bogotá, Colombia. Es líder del semillero de investigación Pegasus e integrante del Grupo de Investigación Metis.
e-mail: casolanov@correo.udistrital.edu.co

Johan Fabiel Casas Díaz

Nació en Bogotá, Colombia. Es tecnólogo en Sistematización de Datos, de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, de Bogotá, Colombia. Actualmente es estudiante de último semestre de Ingeniería Telemática de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, de Bogotá, Colombia. Además es integrante del semillero de investigación Pegasus y del Grupo de Investigación Metis.
e-mail: Fabiel016@gmail.com

Juan Carlos Guevara Bolaños

Nació en Bogotá, Colombia. Es Ingeniero de Sistemas de la Universidad Central de Bogotá, Colombia. Obtuvo su título de Maestría en Ciencias de la Información y las Comunicaciones en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Actualmente se desempeña como profesor de tiempo completo en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y es director del Grupo de Investigación Metis.
e-mail: jcguevarab@udistrital.edu.co





Pasarela para usar transmisores HART desde una red DeviceNet

Gateway to use HART transmitters from a DeviceNet network

Asfur Barandica López
Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.
asfur.barandica@correounivalle.edu.co

Andrés Ernesto Guevara Escobar
Carvajal Tecnología y Servicios, Área de Facturación Electrónica.
andresegs@hotmail.com



Resumen

Este artículo demuestra la viabilidad de compatibilizar dos protocolos industriales con características muy diferentes, mediante la implementación de una interfaz hardware-software. HART es un protocolo de muy baja velocidad que usa el paradigma maestro-esclavo, no orientado a la conexión y con un conjunto de comandos definidos, mientras que DeviceNet tiene una velocidad al menos 100 veces superior, que funciona con el modelo productor-consumidor, es orientado a la conexión y no utiliza comandos sino objetos. El desarrollo se soporta en un sistema embebido TINI (Tiny InterNet Interface), programable en Java. La pasarela (*gateway*) actúa como esclavo de una red DeviceNet y como maestro de una red HART. Este novedoso equipo puede ser empleado para incluir equipos HART en procesos de manufactura que requieran pocas variables continuas.

Palabras claves: comunicaciones industriales, DeviceNet, pasarela, protocolo HART, redes industriales.

Abstract

This paper demonstrates the feasibility of harmonizing two industrial protocols with very different characteristics, through the implementation of a hardware-software interface. HART is a very low speed protocol that operates with master-slave paradigm, connectionless oriented and with a defined set of commands, while DeviceNet is at least 100 times faster, works with the producer-consumer model, is connection-oriented and does not use commands but objects. The development is supported on the TINI (Tiny InterNet Interface) embedded system, which is Java programmable. The gateway acts as a slave on a DeviceNet network and as master of a HART network. This innovative equipment can be used to include HART devices in manufacture processes requiring few continuous variables.

Key words: DeviceNet, *gateway*, HART protocol, industrial communications, industrial networks.

Recibido: 16-03-2015
Modificado: 14-04-2015
Aceptado: 20-04-2015

1. Introducción

Existe un sinnúmero de protocolos para comunicación de equipos industriales con características únicas e incompatibles [1], enfocados en cubrir diferentes necesidades como instrumentación de procesos continuos, automatización de sistemas secuenciales, control de movimiento, distribución de inteligencia en sistemas de transporte, entre otros.

En la mayoría de las empresas existen equipos con diferentes protocolos de comunicación que deben hacer parte de un mismo proceso. La integración de la información proveniente de estos equipos puede hacerse en los equipos de supervisión y control como se muestra en la Figura 1(a) o directamente en el piso de planta, como aparece en la Figura 1(b). La primera opción requiere la extensión de todas las redes hasta el cuarto de control y la existencia de interfaces físicas en los PLCs o PCs para cada una de las redes, así como el software de administración de éstas. Con la segunda opción sólo se requiere una interfaz de comunicación en el dispositivo de control, pero debe existir una pasarela (*gateway*) que realice el intercambio de información entre las redes.

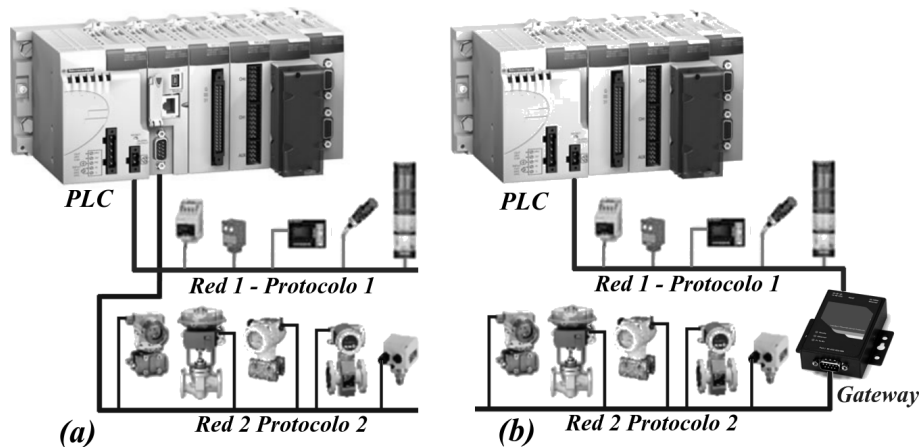


Figura 1. Opciones para coexistencia de varias redes en un proceso.

El diseño de *gateways* ha sido objeto de investigación y desarrollo por muchos años [2] [3] [4] [5] y se han reportado propuestas para insertar transmisores HART en redes con otros protocolos. Hyncica et al. [6] presentan tres opciones: Bluetooth, Modbus sobre Ethernet y Zigbee. Las dos redes inalámbricas no representan una opción que pueda ser utilizada industrialmente, por cuanto no se implementa el *stack* completo de un protocolo de comunicación industrial. Modbus sobre Ethernet, conocido como Modbus/TCP, sí es una alternativa viable en un ambiente industrial. Yanjun y Jun [7], al igual que Liu et al. [8] describen dispositivos *gateway* para insertar equipos HART en redes con el protocolo Profibus-DP, un protocolo de menor complejidad que DeviceNet.

Un estudio realizado en 2008 encontró que los protocolos HART y DeviceNet tienen fuerte presencia en la industria colombiana y particularmente en el Valle del Cauca, pero que sus bondades son poco conocidas y explotadas [9]. Por ello al interior del grupo de investigación

PSI y se definieron proyectos tendientes a formar ingenieros y a desarrollar equipos que aporten a la competitividad industrial mediante el uso adecuado de estas tecnologías. Este artículo presenta la implementación de una interfaz tipo *gateway* entre los protocolos HART y DeviceNet, que permite el uso de transmisores HART a través de una red DeviceNet y de la cual no se encuentran reportes en la literatura. Tampoco se ha encontrado un dispositivo similar en los portafolios de las empresas del sector de la automatización.

2. Los protocolos HART y DeviceNet

2.1. El protocolo de comunicación HART

HART (*Highway Addressable Remote Transducer*) fue introducido a mediados de los 80s por la compañía Rosemount Inc. como un estándar para la comunicación de transmisores de proceso. Representó la primera generación de comunicaciones digitales con dispositivos de campo, guardando compatibilidad con los transmisores convencionales de 4-20 mA. Por ello es quizás el protocolo con mayor número de nodos instalados a nivel mundial. Actualmente el protocolo es administrado por la *HART Communication Foundation* - HCF (www.en.hartcomm.org). Una buena descripción del protocolo, hasta la revisión 6, puede encontrarse en [10].

HART es un protocolo maestro-esclavo, que permite la co-existencia de dos maestros en el enlace. Puede usarse en modo punto a punto, con un único esclavo, o en red, en cuyo caso el número de esclavos puede llegar a 63 (a partir de la revisión 6.0). Utiliza una señal digital para transferir información de diagnóstico, configuración y medición.

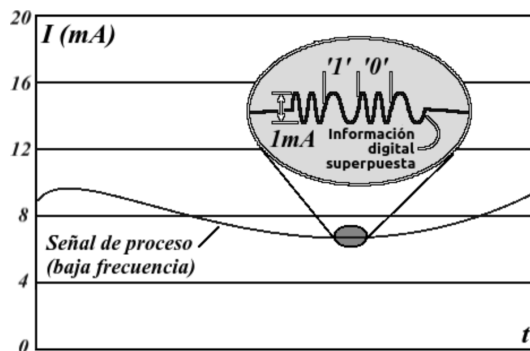
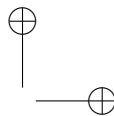
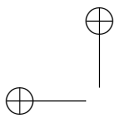


Figura 2. Señal digital HART sobre señal analógica de corriente 4-20 mA.

Aunque HART define varias posibilidades para la capa física, la más difundida es la FSK, basada en el estándar Bell 202, la cual utiliza modulación en frecuencia para la transmisión de señales digitales superpuestas a una señal de corriente analógica de 4-20 mA. Debido a que la modulación FSK posee un valor promedio igual a cero, la señal digital no causa desviaciones de la señal analógica, lo que permite la coexistencia de ambas señales en el mismo par de hilos. El estándar Bell 202 especifica una señal sinusoidal modulada en frecuencia con una amplitud



de 1 mA p-p y una tasa de transmisión de 1200 baudios, con 1200 Hz para representar el '1' binario y 2200 Hz para representar el '0' binario, como se muestra en la Figura 2.

El protocolo HART define dos modos de operación: *POLL* y *BURST*. En modo *POLL* cualquier transacción es originada por el maestro; el esclavo sólo responde cuando recibe un mensaje dirigido a él. La longitud y el retardo típicos de los mensajes permiten idealmente hasta 2,5 actualizaciones de una variable por segundo. Un esclavo configurado en modo de operación *BURST* produce mensajes sucesivamente sin solicitud directa del maestro, lo que permite realizar cerca de 3,5 actualizaciones por segundo, en el mejor de los casos.

La capa de aplicación del protocolo HART define tres grupos de comandos de acuerdo al tipo de servicio que ofrecen:

- Comandos universales: la mayoría son de implementación obligatoria en todos los dispositivos HART. Proveen las funciones básicas para el diagnóstico, la configuración y supervisión.
- Comandos de práctica común: ofrecen funciones comunes a muchos dispositivos de campo que permiten mejorar sus prestaciones. Su implementación es opcional.
- Comandos específicos del dispositivo: proveen funciones especiales únicas, diseñadas por el fabricante para un dispositivo en particular.

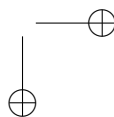
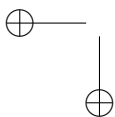
2.2. DeviceNet

DeviceNet es un protocolo abierto de comunicación entre equipos de nivel de proceso, para la conformación de redes entre dispositivos industriales simples (actuadores y sensores) y dispositivos de nivel alto (controladores), desarrollado por Allen Bradley en 1993 y administrado actualmente por la *Open DeviceNet Vendor Association* (ODVA – www.odva.org). En [11] puede encontrarse una descripción clara y concisa de la especificación.

La capa física de DeviceNet es definida por el estándar ISO 11898, en la cual el estado lógico '0' es un voltaje diferencial de 3 V y el '1' es un voltaje diferencial nulo. La red admite hasta 64 nodos. La velocidad configurada determina la longitud máxima de la red: 125 kbps – 500 m, 250 kbps – 250 m o 500 kbps – 100 m. El cable de red incluye un par de hilos con 24 VDC para alimentación de los dispositivos que lo requieran.

En la capa de enlace de datos, DeviceNet acoge la especificación CAN 2.0A, que se caracteriza por ofrecer una elevada seguridad en el transporte de datos. DeviceNet permite el intercambio de datos peer-to-peer, en el cual, cualquier dispositivo de la red puede producir y consumir mensajes. Utiliza un modelo basado en conexiones que facilita la comunicación entre aplicaciones.

DeviceNet ofrece al usuario una capa de aplicación orientada a objetos. Los objetos modelan el comportamiento del dispositivo a través de atributos y servicios. De hecho, las conexiones son objetos que se crean y eliminan dinámicamente durante la configuración y operación de la red. Se identifican dos tipos de conexiones: explícitas e I/O. Se establece una conexión



explícita para leer o escribir parámetros de un dispositivo, o para crear una conexión I/O. Se establece una conexión I/O para comunicar datos de proceso por medio de alguno de los siguientes mecanismos, que hacen parte de lo que la especificación denomina el Conjunto de Conexiones Predefinidas *Master-Slave*:

- Sondeo (*poll*): es un mecanismo solicitud/respuesta en el cual un dispositivo produce sus datos sólo después de que le son solicitados.
- Cíclico (*cyclic*): el dispositivo produce sus datos periódicamente, a una rata programada durante su configuración.
- Cambio de estado (*COS*): el dispositivo produce los datos de proceso sólo cuando haya ocurrido un cambio apreciable en ellos; dado que esto puede resultar muy espaciado en el tiempo, se programa también un reporte periódico para indicar que el dispositivo permanece conectado y funcionando, denominado heartbeat.
- Estroboscópico (*strobed*): el controlador envía una única trama mediante la cual indica a todos los dispositivos presentes en la red, programados con el mecanismo *strobed*, que deben producir sus datos.

Es así como durante el proceso de configuración de la red, es necesario asignar a cada dispositivo uno o varios mecanismos de transferencia de datos, teniendo en cuenta los requerimientos específicos de las variables que produce.

Es importante anotar que cualquier conexión creada en DeviceNet tiene un tiempo de vida, de tal forma que la conexión es eliminada si no se utiliza por un lapso de tiempo superior al especificado por el tiempo de vida.

3. Implementación de la pasarela (*gateway*)

3.1. Plataforma Hardware

En la figura 3 pueden identificarse los diferentes bloques que conforman el hardware; la plataforma seleccionada para implementar el Gateway Hart-DeviceNet es el sistema embebido TINI (*Tiny InterNet Interface*) desarrollado por Dallas Semiconductors, que utiliza Java J2SE como lenguaje de programación. La plataforma cuenta con un microprocesador DS80C390 de Dallas Semiconductors, doble puerto serial, un controlador Ethernet 10 Base-T y doble controlador CAN 2.0. Cada controlador CAN posee 15 centros de mensajes con filtros de aceptación configurables de forma independiente. La programación de la TINI se realiza a través del controlador Ethernet [12].

Además de la TINI, se emplea un módem Smar HI311ME con interfaz RS232 para la implementación de la capa física del protocolo HART y un conversor DC/DC que toma los 24 V de la red DeviceNet y genera 5 V para alimentar la TINI y el módem HART.

3.2. División Modular del Software

Para simplificar el diseño del software y aprovechar al máximo las características de la programación orientada a objetos, el sistema ha sido dividido en cuatro módulos (Tabla I), cada uno de los cuales está compuesto por uno o más objetos que en conjunto realizan una tarea específica e independiente de las demás.

Cada módulo del software fue implementado en un hilo de ejecución independiente (*thread*). Los hilos se comunican entre sí mediante espacios de memoria compartida y colas de mensajes. Al interior del bloque TINI, en la Figura 3, se muestra de manera abstracta la interacción entre los módulos software desarrollados.

El módulo *DeviceNet Server stack* es el encargado de implementar el *stack* del protocolo DeviceNet para un dispositivo tipo servidor solo grupo 2. Las principales características implementadas en el servidor DeviceNet son:

- Baud Rate: 125 Kbps.
- MacID configurable por software.
- Perfil: Adaptador de Comunicaciones (Perfil ID 0Chex).
- Soporte de fragmentación de mensajes I/O producidos.
- Soporte de reensamble de mensajes explícitos consumidos.
- No soporta el Administrador de Mensajes Desconectado UCMM
- Soporte de Mensajes Explícitos, Conexión I/O Poll y Conexión I/O Strobed del Conjunto de Conexiones Predefinido Master/Slave.

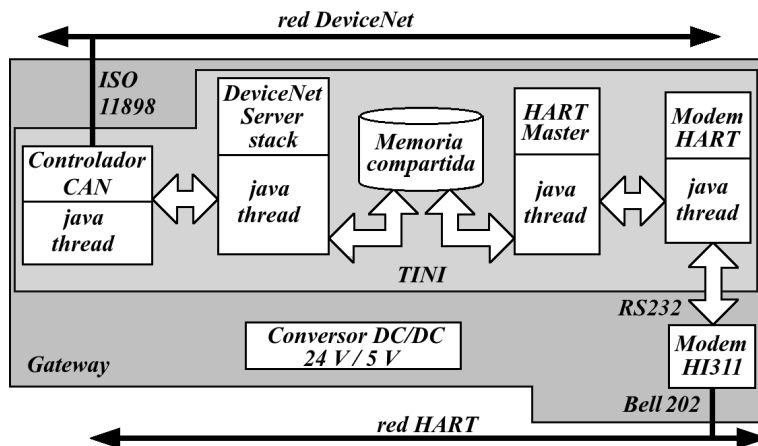


Figura 3. Diagrama de bloques del hardware e Interacción de los módulos software.

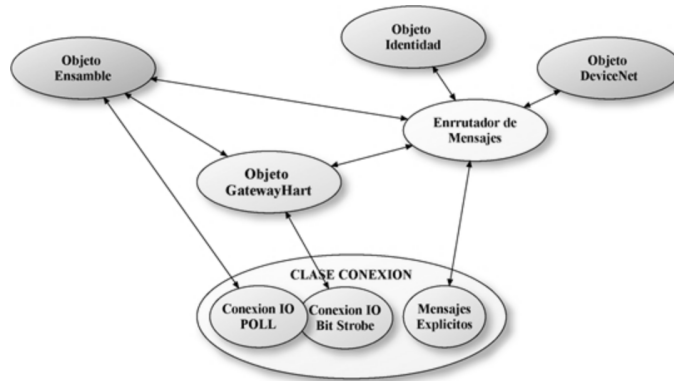


Figura 4. Modelo de objetos para el perfil Adaptador de Comunicaciones.

La ODVA no proporciona una definición para los objetos ensamble y los objetos aplicación necesarios para la operación de un dispositivo bajo el perfil Adaptador de Comunicaciones, ya que ellos dependen del tipo de protocolo a interconectar. La Figura 4 presenta el modelo de objetos implementado siguiendo las especificaciones del perfil y los requerimientos de la aplicación específica al protocolo HART.

El módulo Master Hart implementa una versión reducida del stack del protocolo HART revisión 5.0 para un dispositivo tipo maestro, con soporte de algunos comandos universales y de uso común. Las principales características del maestro HART implementado son:

- Revisión del protocolo: 5.0
- Lectura de las 4 variables dinámicas del proceso.
- Conexiones punto a punto y multipunto (red).
- No soporta el modo BURST, ni operación multimaestro.
- Soporta configuración básica de las funciones de medición: rango, función de transferencia, constante de tiempo.
- Permite administrar la topología de una red multipunto mediante la configuración de la dirección de sondeo (poll address) de los dispositivos esclavos activos.

Tabla I. Módulos software y objetos del gateway

Módulo	Objetos	Descripción
<i>DeviceNet Server stack</i>	<i>Identidad</i>	Implementa la funcionalidad de esclavo del protocolo DeviceNet.
	<i>Enrutador</i>	
	<i>DeviceNet</i>	
	<i>Conexión</i>	
	<i>Ensamble</i>	
<i>Master HART</i>	<i>GatewayHart</i>	Implementa la funcionalidad de un maestro de una red HART.
	<i>HartMaster</i>	
	<i>HartFrame</i>	

Continúa

<i>Interfaces de comunicación I/O</i>	<i>CanBusDriver</i>	Configura y maneja el controlador CAN.
	<i>HartBusDriver</i>	Configura y maneja el puerto serial para conexión a la red HART a través del módem HI311.

Para este módulo se ha seleccionado un subconjunto de comandos universales y de práctica común requeridos para la supervisión de las variables del proceso y la configuración de las características de medición de los dispositivos HART. La Tabla II contiene el listado de los comandos HART implementados.

Tabla II. Comandos HART implementados

Com.	Tipo	Descripción
0	Universal	Lee identificador único del dispositivo, fabricante y revisión de comandos.
2	Universal	Lee valor de la corriente de lazo de la variable primaria.
3	Universal	Obtiene el valor de la corriente de lazo y 4 variables dinámicas.
6	Universal	Escribe dirección de sondeo del dispositivo.
14	Universal	Lee información del sensor: límites, mínimo span y unidades.
15	Universal	Lee información de medición: rangos, función de transferencia, constante de tiempo.
34	Práctica común	Modifica el valor de la constante de tiempo.
35	Práctica común	Modifica rangos superior e inferior de la medición.
47	Práctica común	Modifica la función de transferencia.

El módulo *Interfaces de Comunicación I/O* contiene los drivers necesarios para manejar el controlador CAN y el puerto serie que aloja el módem HART HI311, utilizados para conectar físicamente el sistema TINI con las redes DeviceNet y HART, respectivamente. Debido a su estrecha relación con el hardware, estos módulos serían las únicas secciones del proyecto que deberían modificarse para migrar la aplicación a otra plataforma con soporte de Java J2SE.

3.3. Archivo EDS

La especificación DeviceNet obliga a que cualquier dispositivo que se introduzca en una red disponga de un archivo tipo texto, denominado *Electronic Data Sheet* (EDS), que permite al software de configuración de la red identificarlo y parametrizarlo apropiadamente. Un archivo de este tipo fue creado para el *gateway* HART-DeviceNet, tomando como base la especificación del protocolo y los archivos de los dispositivos ya existentes.

4. Pruebas y Resultados

4.1. Plataforma de Prueba

Las pruebas se realizaron utilizando un PLC Allen Bradley Controllogix 5555, equipado con un módulo Ethernet/IP y una tarjeta scanner DeviceNet 1756-DNB. Esta tarjeta hizo las veces de controlador en la red DeviceNet. Como esclavos de la red se colocaron dos sensores de la misma marca (802DN y 871TM), un PLC Koyo DL-06 equipado con tarjeta D0-DEVNETS y el *gateway* HART-DeviceNet.

Para la conformación de la red HART se utilizaron: transmisores de temperatura Smar TT301 y ABB-TH02, transmisor de nivel Drexelbrook 509-15-X09, transmisor de caudal Siemens SITRANS FM MID Intermag 2 y transmisor de presión Moore 340D.

Las pruebas fueron realizadas con los aplicativos para comunicación, configuración y desarrollo de la firma Rockwell que serán presentados más adelante.

4.2. Operación del *gateway*

La capacidad de supervisión de los transmisores HART a través del *gateway* Hart-DeviceNet fue verificada usando el software RS-Networx para DeviceNet.

La Figura 5 muestra la red mientras está en curso el proceso de identificación de dispositivos. Puede notarse que el *gateway* fue detectado sin errores, al igual que los demás dispositivos presentes en la red. En la misma figura también aparece una foto del banco de pruebas en la que se observa el modem HART, dos sensores DeviceNet, un transmisor HART y el *gateway* con sus componentes internos.

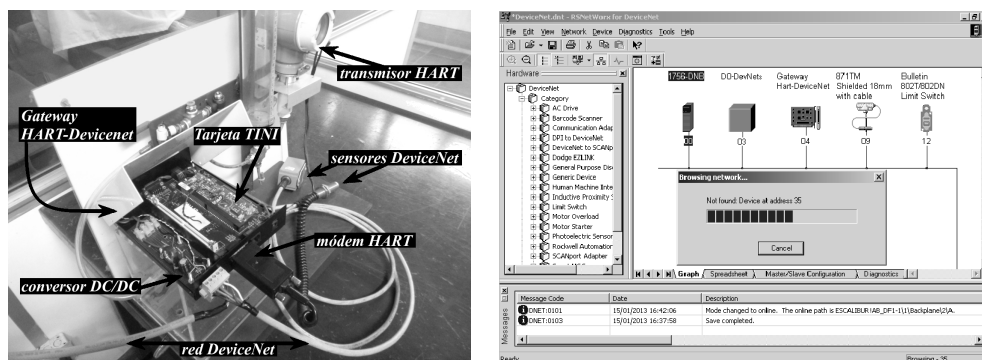


Figura 5. Proceso de identificación de dispositivos en la red DeviceNet y vista parcial del montaje.

La Figura 6 presenta la viñeta de General de la ventana de configuración del *gateway* Hart-DeviceNet, la cual contiene información básica del dispositivo, como el nombre, descripción, dirección e información contenida en el objeto identidad que facilita la identificación automática del dispositivo cuando se realiza la exploración de la red.

El monitoreo y configuración de los parámetros de los dispositivos DeviceNet se realiza a través de la viñeta Parámetros. Los parámetros corresponden a los atributos de instancia definidos por el objeto aplicación (*GatewayHart*) del perfil implementado.



Figura 6. Ventana de propiedades del dispositivo Gateway Hart-DeviceNet.

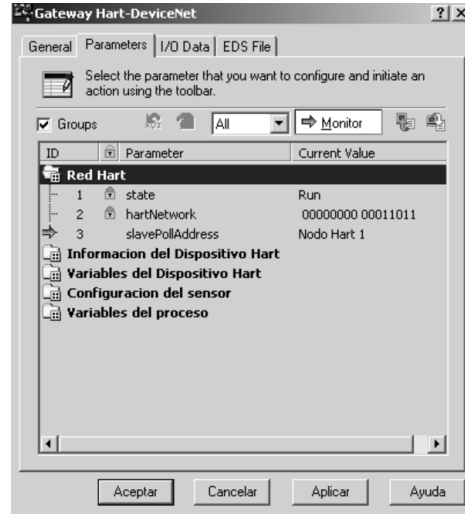


Figura 7. Información básica de la red HART.

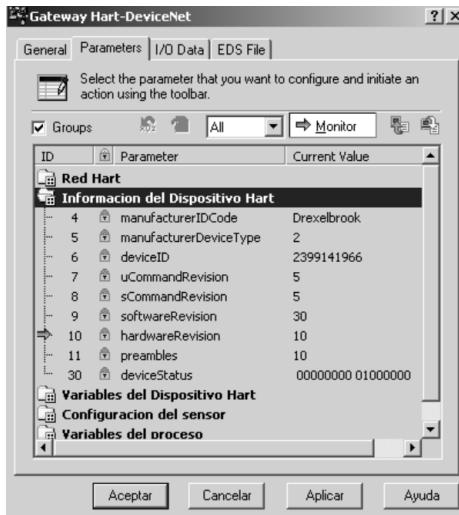


Figura 8. Información de identificación del dispositivo HART seleccionado.

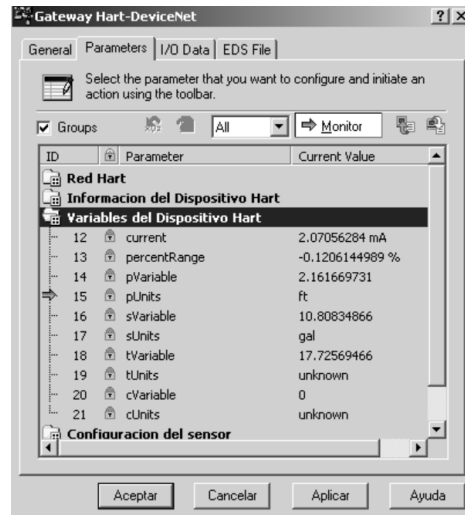


Figura 9. Variables dinámicas del dispositivo HART seleccionado.

Los parámetros han sido agrupados en 5 categorías de acuerdo a su funcionalidad.

- **Red Hart:** (Figura 7) contiene información básica de la topología de la red HART y el estado del *gateway* Hart-DeviceNet. De acuerdo con lo que indica el parámetro

hartNetwork en la Figura 7, la red tendría activos los transmisores con direcciones de sondeo 0, 1, 3 y 4.

- **Información del Dispositivo Hart:** (Figura 8) contiene información con la identificación del dispositivo HART seleccionado con el parámetro *slavePollAddress*. De acuerdo con la Figura 7, la información presentada en la Figura 8 es del nodo con dirección de sondeo 1.
- **Variables del Dispositivo Hart:** (Figura 9) contiene toda la información de medición obtenida del dispositivo HART seleccionado.
- **Configuración del sensor:** (Figura 10) permite la configuración de los parámetros de medición del sensor del dispositivo HART seleccionado.
- **Variables del proceso:** (Figura 11) contiene la variable primaria de todos los dispositivos activos en la red HART.

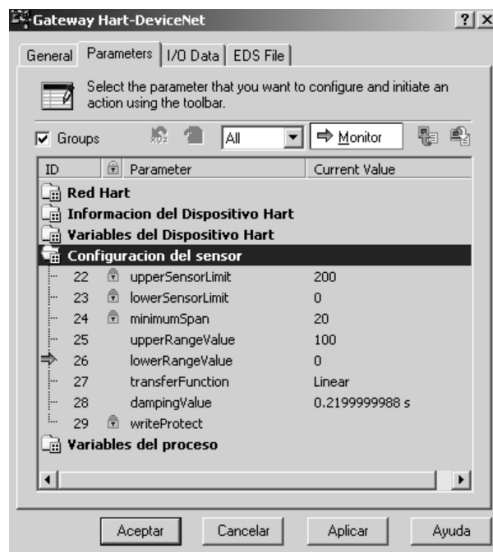


Figura 10. Parámetros de configuración del dispositivo HART seleccionado.

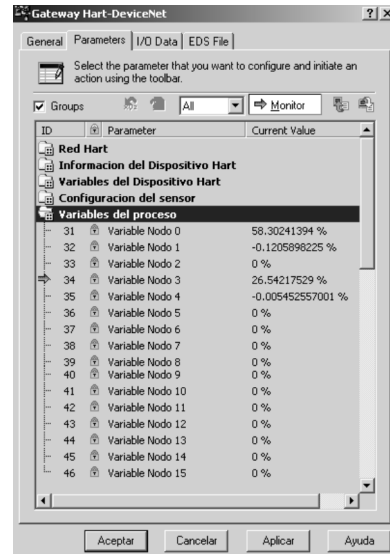


Figura 11. Variable principal de todos los dispositivos activos en la red HART.

4.3. Mensajería Explícita

Se verificó la respuesta del *gateway* HART-DeviceNet a mensajes explícitos mediante la solicitud de ejecución del servicio *StartGatewayHart*. Este servicio se encarga de inicializar el sistema y explorar la red Hart para descubrir los dispositivos activos. Para solicitar el servicio se utilizó la ventana *Class Instance Editor* de RS-Networx. La ventana mostró que el servicio fue exitosamente ejecutado y el parámetro *hartNetwork* fue actualizado con la nueva topología de la red HART.

Los demás servicios de la mensajería explícita fueron también probados exhaustivamente: cambio de dirección de sondeo, cambio de rango, cambio de unidades de ingeniería, etc.

4.4. Operación Continua

Para comprobar la transferencia de datos a través del *gateway* en forma continua, se implementó una estrategia de monitoreo con el programa RS-Logix 5000, para la visualización de las variables principales de cada uno de los dispositivos HART presentes en la red. La Figura 12 muestra la evolución de las diferentes magnitudes en el tiempo. Con 4 transmisores en la red HART, se observó que cada variable se actualizaba en menos de un segundo, algo similar a lo que ocurriría si se tuviera la red HART directamente conectada a un PC. Esta prueba muestra que la implementación de los mecanismos *I/O Poll* e *I/O Strobed* es exitosa y no genera problemas a los demás dispositivos de la red DeviceNet.

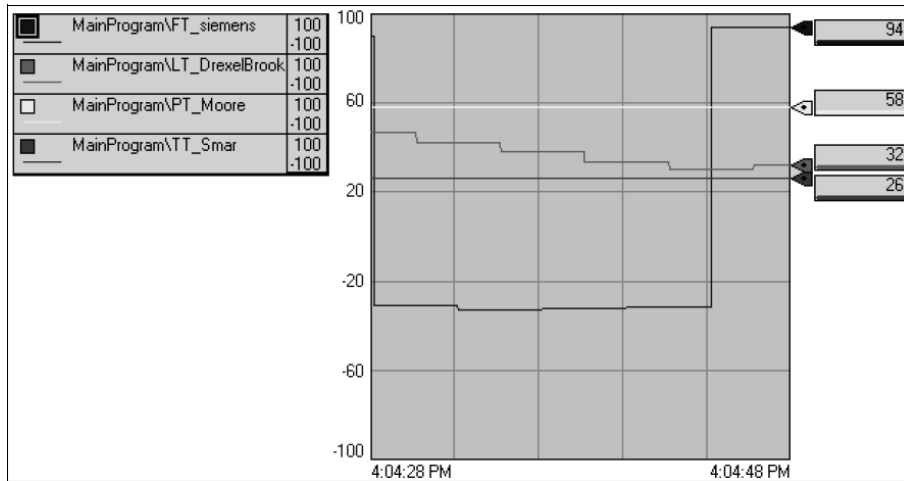


Figura 12. Sistema Scada de la planta PI2 utilizando el Gateway Hart-DeviceNet.

5. Discusión

Aunque la revisión 6.0 del protocolo HART permite 63 dispositivos en una red, es poco probable y nada práctico tener implementaciones con más de 15 dispositivos. Por ello se adoptó el límite definido por la revisión 5.0.

El *gateway* Hart-DeviceNet soporta dos mecanismos de intercambio de datos *I/O*: *Poll* y *Strobed*. La conexión *Poll* produce un arreglo de 64 bytes con la variable principal de todos los dispositivos activos en la red HART en formato IEEE754. La conexión *Strobed* produce un arreglo de tres bytes con el estado del sistema y la topología de la red HART. Sin embargo, el estado del sistema no es actualizado por el maestro HART mientras no se haga una solicitud por mensajería explícita.

La tasa de actualización de las variables tomadas de los transmisores no se ve afectada sustancialmente por la presencia del *gateway* y los distintos elementos de la red DeviceNet, debido a que la velocidad de HART es extremadamente baja. Este hecho fue determinante para la definición de la arquitectura del software, pues un mensaje de solicitud del Scanner DeviceNet debe ser respondido dentro de una ventana de tiempo de algunos milisegundos, mientras que una transacción en la red HART puede tardar más de medio segundo. La ejecución por hilos permite que el bloque *HART Master* actualice en forma permanente las variables de todos los transmisores activos, depositando la información en la memoria compartida. Por su parte, el bloque *DeviceNet Server stack* responde las solicitudes *Poll* y *Strobed* tomando la información existente en la memoria compartida, pudiendo así dar una respuesta inmediata. La Figura 13 muestra los diagramas de secuencia para atención al servicio una conexión I/O *Poll* y a una conexión explícita.

En la Figura 13(a) es claro que los mensajes I/O *Poll* son respondidos de forma inmediata usando la información existente en la memoria compartida (*dataBuffer*). Tal información es refrescada en forma permanente por el hilo Master HART. En la Figura 13(b), la solicitud explícita obtiene una respuesta inmediata con la información almacenada en los atributos de instancia al momento de procesar el servicio; la solicitud también dispara una secuencia de actualización del atributo, que puede ser en la memoria compartida o en el dispositivo HART, de acuerdo con el servicio solicitado.

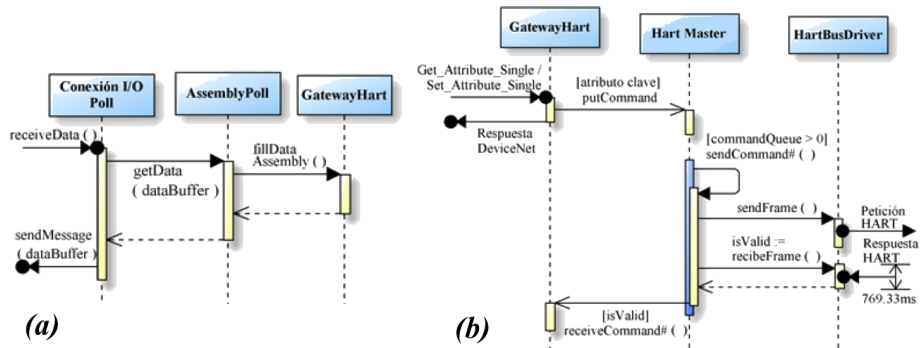


Figura 13. Diagramas de secuencia para atención a las solicitudes I/O y explícitas.

6. Conclusiones

Se ha presentado la implementación de un dispositivo tipo *gateway* que permite la integración de transmisores de proceso con protocolo HART en una red DeviceNet. El dispositivo se soporta en la plataforma TINI de Dallas Semiconductor, la cual mostró muchas ventajas para la implementación, pues dispone de controlador CAN y brinda la facilidad de programación en un lenguaje orientado a objetos, lo cual se adapta perfectamente a la especificación DeviceNet. El único inconveniente encontrado es que el controlador CAN limita la velocidad de transferencia de datos a 125 kbps. Dado que el desarrollo se hizo en Java, puede ser migrado con facilidad a otras plataformas, modificando únicamente los bloques software relacionados con los periféricos de comunicación (controlador CAN y puerto serie).

Para la comunicación con la red HART, el sistema Gateway Hart-DeviceNet implementa el protocolo HART revisión 5 para un dispositivo tipo maestro, con soporte del modo de operación Maestro/Esclavo para conexiones punto a punto y multipunto. El sistema utiliza un subconjunto de comandos universales y de práctica común para la supervisión de las variables del proceso y la configuración de las características de medición de los dispositivos HART. En el lado DeviceNet, el *gateway* implementa mensajería explícita y dos de los mecanismos del Conjunto de Conexiones Predefinidas MasterSlave: *Poll* y *Strobed*.

Las pruebas realizadas permiten afirmar que el *gateway* satisfizo las especificaciones de diseño y ofrece comunicación confiable sobre la red DeviceNet, con una buena tasa de actualización de las variables provenientes de los transmisores y sin afectar los demás dispositivos presentes en la red.

Este proyecto permite ofrecer a la industria nacional un producto que puede mejorar los procesos productivos con costos inferiores a los que tendrían otras soluciones. Con él se ha demostrado la capacidad de diseño de la ingeniería colombiana y se han generado documentos y herramientas útiles para realizar nuevas implementaciones y capacitar personal en el área de las comunicaciones industriales.

Para poder utilizar todo el potencial de los transmisores HART, es necesario acceder a cada transmisor con sus comandos universales. Por ello, se tratará de avanzar en el diseño del *gateway* para que provea soporte multimaestro, de forma tal que se pueda usar una terminal de mano u otro dispositivo de configuración, dado que hacerlo con mensajería explícita a través del *gateway* sería muy dispendioso. También se quieren explorar las posibilidades de migración de la pasarela a plataformas como Arduino y Raspberry-pi, puesto que además de un menor costo, tienen mayor disponibilidad y soporte.

Ante el auge del WirelessHART, el desarrollo de una pasarela con la capa física inalámbrica del protocolo HART, definida en la revisión 7, plantearía un reto de mayores proporciones, pues además de que la capa física es considerablemente más compleja, se hace necesario rediseñar la capa de enlace de datos y abordar problemas como la generación y mantenimiento de rutas. Dado que los protocolos ControlNet y Ethernet/IP comparten con DeviceNet las capas superiores del modelo OSI (lo que se denomina el CIP en la terminología de la ODVA), sería interesante también evaluar las posibilidades de reuso del firmware para la construcción de pasarelas HART-ControlNet y HART-Ethernet/IP.

Referencias

- [1] Galloway, B.; Hancke, G.P.; Introduction to Industrial Control Networks, Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 15(2), 2013, pp. 860 – 880
- [2] Saleh, K.; Jaragh, M.; Rafiq, O.; A methodology for the synthesis of communication gateways for network interoperability, Computer Standards & Interfaces, 17(2), 1995, pp. 193-207
- [3] Ninagawa, C.; Host-Based Architecture LON Communication Gateway for Building Air-conditioner Monitoring System, Technical Review, Mitsubishi Heavy Industries Ltd., (43) 2 , 2006.
- [4] Yoon, S.S.; Lee, J.C.; Cho S.J.; Jeon, J.W.; Gateway between high-performance Fieldbus and serial communication, International Conference on Control Automation and Systems (ICCAS), 2010, pp. 971–974.

- [5] Wu, H.Z.; Zhang, L.J.; Zhang, C.G.; Realization of Ethernet and RS485 communication gateway based on $\mu C/OS-II$ system, *Applied Mechanics and Materials* (Volume 39), 2010, pp. 416-420.
- [6] Hyncica O., Fiedler P., Bradac Z., Kucera P., Honzik P., Protocol gateways for HART sensors, *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, v 9, PART 1, 9th IFAC Workshop on Programmable Devices and Embedded Systems, PDES 2009 – Proceedings, 2009, pp. 194-197.
- [7] Yanjun F., Jun X., An approach for interoperation between heterogeneous fieldbus systems, *IEEE Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA, 2 2 OF 2 VOL*, 10th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2005, pp. 239-243.
- [8] Liu, J.; Fang, Y. ; Zhang, D.; PROFIBUS-DP and HART Protocol Conversion and the Gateway Development, *2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications- ICIEA*, 2007, pp. 15–20.
- [9] Barandica A., Una propuesta para la apropiación de la tecnología HART y su transferencia hacia el sector industrial, tesis de maestría, Escuela de Ing. Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2008.
- [10] Bowden R., HART Field Communications protocol. A Technical Overview. HCF, 2007.
- [11] RTA Automation, DeviceNet™ Unplugged – A View “Under the Hood” for End Users, 2 de abril de 2015, disponible en <http://www.rtaautomation.com/technologies/devicenet/>
- [12] Loomis D., *The TINI Specification and Developer's Guide*, (Primera Edición), 2001.

Asfur Barandica López

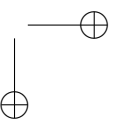
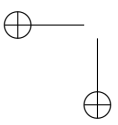
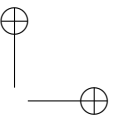
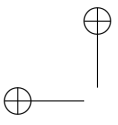
Nació en Cali, Colombia. Es Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Obtuvo su título de Maestría en Ingeniería con énfasis en Electrónica en la misma universidad. Actualmente se desempeña como profesor en el área de Informática Industrial en la Universidad del Valle de Cali, Colombia, y pertenece como investigador al grupo Percepción y Sistemas Inteligentes, donde realiza estudios sobre transductores inteligentes y comunicaciones industriales.

e-mail: asfur.barandica@correounivalle.edu.co

Andrés Ernesto Guevara Escobar

Nació en Cali, Colombia. Es Ingeniero Electrónico de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Actualmente se desempeña como arquitecto de soluciones en el área de facturación electrónica en Carvajal Tecnología y Servicios en Cali, Colombia.

e-mail: andresegs@hotmail.com





Eduyn Ramiro López Santana
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad de Ingeniería
erlopezs@udistrital.edu.co

José de Jesús Romero Carvajal
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad de Ingeniería
jjmisoromero@gmail.com



A hybrid column generation and clustering approach to the school bus routing problem with time windows

Un aproximación híbrida de generación de columnas y agrupación para resolver el problema de ruteo de buses escolares con ventanas de tiempo

Abstract

This paper attempts to solve the School Bus Routing Problem with Time Windows that consists of finding the best set of routes to pick up students distributed geographically with constraints as capacity, time windows and maximum travel time. We formulated the problem as a classic Vehicle Routing Problem with Time Windows and solved it using an approach based on a clustering algorithm and column generation method. A real world case from a school in Bogotá, Colombia is presented including 600 students to pick up in near 400 nodes located in urban and rural areas. The obtained results demonstrate a reduction as the problem's complexity and an improvement on the performance measures of the proposed method.

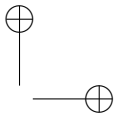
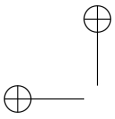
Key words: clustering, column generation, optimization, school bus routing.

Resumen

Este artículo intenta resolver el problema de ruteo de buses escolares con ventanas de tiempo el cual consisten en encontrar el mejor conjunto de rutas para recoger estudiantes geográficamente distribuidos con restricciones de ventanas de tiempo. El problema es formulado como un clásico problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo y resuelto una aproximación basada en agrupación y generación de columnas. Se presenta un caso de aplicación real en un colegio de Bogotá, Colombia con 600 estudiantes y 400 nodos localizados en área urbana y rural. Los resultados obtenidos muestran como la complejidad del problema es reducida y se mejoran las medidas de desempeño.

Palabras claves: agrupación, generación de columnas, optimización, ruteo de buses escolares.

Recibido: 12-02-2015
Modificado: 01-03-2015
Aceptado: 04-03-2015



1. Introduction

The School Bus Routing Problem (SBRP) described by [1] as a set of five smaller sub-problems: Data preparation, bus stop selection (student assignment to stops), bus route generation, school bell time adjustment and route scheduling. This paper focuses in the bus route generation step, assuming in our case that students are picked up at their homes, buses belong to a single school, so steps two and four are skipped.

The bus route generation step can be formulated and solved as a Vehicle Routing Problem (VRP), which is stated by [2] as a set of costumers with known location and demand to be supplied from a depot by vehicles of known capacity subject to all customer demand to be satisfied. This problem is key in logistics systems and its correct planning could drive into meaningful savings [3].

Since 1959, when Dantzing and Ramser [4] proposed the first VRP formulation it has been widely studied; on one hand formulating models which include more real world characteristics each time and on the other hand developing methods to efficiently solve it [3]. The interest in the VRP is not just practical but also academic, since VRP is a combinatorial optimization problem cosidered as an NP-Hard [3], aproaches for solving it are constantly proposed and improved.

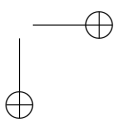
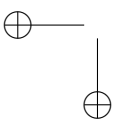
Solution methods include heuristic, which perform a limited search in the solutions space and obtain acceptable quality solutions in reasonably calculation times; metaheuristic, which perform a more exhaustive search in the solution space than heuristic methods and generally obtain better results [3], and exact methods in which optimal solution is the goal.

Among exact methods the main approaches are branch and bound, branch and cut, lagrangian relaxation, column generation, dynamic programming, and linear and integer programming. Further information about exact methods can be found in [5], [6] and [7] likewise further information for heuristic methods can be found in [3].

School Bus Routing Problem solution methods have already been studied, for instance an Ant Colony Optimization algorithm is proposed by [8] to solve it, whereas [9] propose a decision aiding methodology for the same purpose. Exact solution methods are also found, in this case [10] solve it through integer programming.

Column generation method have been studied successfully and vastly to solve Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW). Desaulniers, Desrosiers and Solomon [11] dedicate a whole chapter to deeply study this application.

In this paper, we study the School Bus Routing Problem with Time Windows. This is a variant of SBRP taking in account that the buses must arrive to pick up students before at specific time (lower bound of time window) and they can arrive before another specific time (upper bound of time window), but the students did not pick up before the beginning of the time window. We consider a case study of school bus routing problem for the Jose Max León school bus system. This school is located at the northwest suburban area in Bogota, Colombia, with near 600 students who use the school bus system, located in 440 nodes approximately.



This problem differs from the classical VRP in some characteristics. For instance, the service is intended to pick up and deliver people (school pupils or workers) rather than products, so that demand is the number of people to be picked up in each location. In SBRP students are delivered to their homes at afternoon, this delivery could be formulated as another problem or be assumed to be done in the inverse path in which they are picked up. Finally, SBRP buses generally departure (parking) and arrive (school) to different locations being similar to Open Vehicle Routing Problem OVRP.

Since the SBRPTW is a NP-hard problem because this is a generalization of the SBRP that is NP-hard [8], we propose a hybrid column generation and clustering method to solve it. Firstly, the clustering phase is executed in two steps then the routing phase is performed. The first clustering step aims to generate large groups of nodes, and then the algorithm is executed again to cluster nearest nodes. Subsequently, with this information, routes between clusters in the group are generated using the Column Generation method. Finally, using the inter-cluster routes previously generated, intra-cluster routes are created by solving a Travelling Salesman Problem.

This paper is organized as follows. Section 2 introduces the problem statement, in which the problem definition, notation and mathematical formulation are presented. Section 3 explains the proposed solution approach. Section 4 provides some numerical results on the real-world case. Finally, Section 5 concludes this work and provides directions for possible future research

2. Problem statement

We consider the bus system, in which a set of customers $C = \{1, 2, \dots, n\}$ geographically distributed are meant to be picked up and took to the school (depot) indexed as 0, depot is considered the departure and final location for all vehicles. To do so the school counts on a set of identical vehicles $K = \{1, 2, \dots, m\}$ with known transportation capacity Q . Students travel time could be maximum as twice as the time they would travel directly from home to school, so time windows are defined for each student as e_i as the earliest picking up hour, defined as the travel time of going directly from home to school and l_i the latest picking up hour, defined as twice e_i . As several students may be picked up at the same customer location, p_i is defined as the demand of each customer location.

Thus, this problem can be defined in a directed Graph $G = (V, A)$, $V = C \cup \{0\}$, $A = \{(i, j) : i, j \in V, i \neq j\}$. For each arc (i, j) a non-negative value t_{ij} is associated representing the travel time from i to j . So the problem consists of finding a set of routes that pick up all students minimizing the total travelled time, satisfying maximum travelled time and demand satisfaction.

Assumptions and conditions to solve this problem are the following:

- Arcs are supposed symmetrical, that means $t_{ij} = t_{ji}$.

- Vehicle fleet is homogeneous.
- Travel times are deterministic and comply with the triangle inequality.
- The time window $[e_j, l_j]$ is met, i.e., the vehicles must arrive on customer before time l_j and can arrive before e_j , but the customer will not be serviced before the beginning of the time window.

Notation used throughout the paper is defined in Table I.

Table 1
Notation of proposed method

Sets:

C : Set of customers
 V : Set of vertices (Customers and depot)
 A : Set of arcs
 K : Set of vehicles
 R : Set of paths
 L : set of clusters

Parameters:

p_i : Demand of customer i
 Q : Transportation capacity of vehicles
 t_{ij} : Travel time from customer i to customer j
 e_i : Lower bound of time window to pick up customer i
 l_i : Upper bound of time window to pick up customer i
 s_i : Service time for customer i
 a_{ir} : Number of times the customer i is visited in path r
 t_r : Travel time for path r
 a_{ir}^k : Number of times the customer i is visited in path r by vehicle k
 t_r^k : Travel time for covering path r by vehicle k
 q : Cluster of nodes
 CG : Geographical center for cluster l
 M : Large number

Variables:

$x_{ijk} = 1$, if arc (i, j) is covered by vehicle k in the solution. 0, otherwise
 y_{ik} : Continuous variable that shows the arrival time of vehicle k to serve customer i
 γ_r : Variable representing the usage of path r
 γ_r^k : Variable representing the coverage of path r by vehicle k

The mathematical formulation is the typical VRPTW formulation; it is presented in equations (1) to (10).

$$\min \sum_{(i,j) \in A} t_{ij} \sum_{k \in K} x_{ijk} \quad (1)$$

s.t.,

$$\sum_{j \in V} x_{0jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{i \in V} x_{in+1k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in V \setminus \{0, n+1\} \quad (4)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} = \sum_{j \in V} x_{jik} \quad \forall i \in V \setminus \{0, n+1\}, k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in V} p_i \sum_{j \in V} x_{ijk} \leq Q \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$y_{ik} + t_{ij} + s_i - M \cdot (1 - x_{ijk}) \leq y_{jk} \quad \forall k \in K, (i, j) \in A \quad (7)$$

$$e_i \leq y_{ik} \leq l_i \quad \forall k \in K, i \in V \quad (8)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V \quad (9)$$

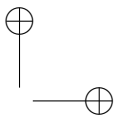
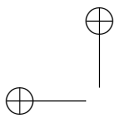
$$y_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in V, k \in K. \quad (10)$$

The objective function (1) minimizes the total travel time. Constraints (2) and (3) ensure that all vehicles departure and arrive to depot. Constraints (4) forces that all customers are served exactly once. The flow constraints for each node are presented in (5). Constraints (6) ensures the vehicle's capacity are observed. Constraints (7) and (8) ensures the service starts between the time windows for each customer. Finally, constraints (9) are integrality conditions and (10) are nonnegative variable conditions.

The problem described and formulated is a combinatorial optimization problem sorted ad NP-Hard, due to its amount of variables and solutions space, so that alternative methods to the classical have been widely studied and successfully applied such as langrangian relaxation, column generation, and Clarke and Wright savings method, among others. Here we propose an alternative hybrid approach that combines column generation and clustering techniques.

3. Description of the solution approach

The solution approach uses the clustering algorithm and a column generation technique in order to find the best set of routes to pick up all students with a minimum routing cost, consisting of two phases:



- The clustering phase: This phase uses as input the nodes where the bus pick up the students and the number of students that are picked up. This phase executes two steps. In the first step, the clusters are computed with the Shin & Han's algorithm [12]. The output is a small fixed number of clusters that it is an independent routing problem. In the second step, for each of the clusters from step 1 the Shin & Han's algorithm is executed again to obtain a number of clusters that are visited for the bus in its path.
- The routing phase: this phase also consists in two steps. The first step solves a vehicle routing problem with time windows, taking as nodes, the clusters obtained in step 2 of phase 1. With the set of routes in the second step, for each cluster a traveling salesman problem is solved in order to determine the sequence of locations the bus must to visit to pick up students in their respective clusters.

In the next two sections, we describe these phases in detail.

3.1. The clustering phase

We use the algorithm proposed by Shin & Han [12]. This algorithm consists of two parts: cluster construction and cluster adjustment.

The method use the Geometrical Centre (GC) of a cluster defined as follows: Let $q_i = \{v_0, v_1, \dots, v_k\}$ be cluster i , where v_i is a member of cluster i .

$$CG(q_i) = \left(\sum_{j=0}^n v_j^x / n, \sum_{j=0}^n v_j^y / n \right) \quad (11)$$

where v_j^x and v_j^y are x and y coordinates of v_j . Table II shows the pseudo-code of cluster construction. The process starts by selecting the farthest node from the depot as a cluster seed. Then the CG is calculated according with (11) and is illustrated in Fig. 1. Now, to add nodes, we find the un-clustered node, which is located closest from GC, and include the node into the cluster only if the demand does not exceed the available bus capacity of the cluster. If the node is added to cluster, its bus capacity is reduced by the demand of node and GC is recalculated again. The process is repeated until the capacity is feasible to add the new node, if not a new cluster is created and the process is conducted until all nodes are clustered.

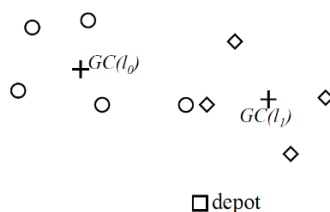


Figura 1. The geometrical center of a cluster. (Source: [12])

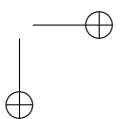
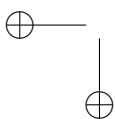


Table II**Pseudo code for the cluster construction (Source: [12])**

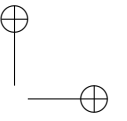
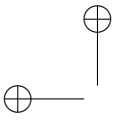
Set $i = 0$ and $W =$ truck capacity
While (unvisited node exist)
 $v_j =$ the farthest node among un-clustered nodes from the depot
 Generate cluster $q_i =$ with v_j
 Set capacity of $l_i = W$
 While (demand of v_j does not exceed available capacity of q_i)
 Add v_j to q_i
 Reduce available capacity of q_i by demand of v_j
 Calculate $CG(q)$
 $v_j =$ the closest node among un-clustered nodes from $CG(q_i)$
 Endwhile
 $i = i + 1$
Endwhile

Once clusters are constructed, they are optimized using cluster adjustment algorithm proposed by [12] and presented in Table III. This procedure ensure that if node v_k , which belongs to cluster q_i , is closer to $GC(q_j)$ than $GC(q_i)$, and the demand v_k of does not exceed the available capacity of l_j , then move v_k from q_i to cluster q_j . The $GC(q_j)$ and $GC(q_i)$ are recalculated again.

Table III**Pseudo code for the cluster adjustment (Source: [12])**

Set cluster group $L = \{q_0, q_1, \dots, q_m\}$
For $i = 0$ to m repeat
 For every node v_k in q_i
 For every q_j in cluster group
 If ($i = j$ and v_k is closer to $GC(q_j)$ than $GC(q_i)$ and available capacity of q_j is equal to or bigger than demand of v_k)
 Move v_k from q_i to q_j
 Recalculate $GC(q_i)$ and $GC(q_j)$
 End if
 End for
 End for
End for

When running the clustering phase, the first step is aimed at distributing the demand as uniformly as possible in each cluster. This is desirable since each cluster is a vehicle routing problem to be solved. In the second step, we divide each cluster into smaller clusters in order to make them easier to solve using the column generation method. The time complexity of both steps is $O(n^2)$ as it was shown in [12]. In the same way as this technique has been used to generate initial solutions as input to a metaheuristic algorithm [12], here we use as input to the column generation method.



3.2. The routing phase

This phase is developed in two steps. The first step use a VRPTW formulation and solved with a column generation method in order to get a set of routes such that the operational constraints are respected. The second step use a TSP formulation in order to set a route such all nodes in each clusters are meet. In both steps, the objective function minimize the total travel time.

3.2.1. Step 1: A column generation method to VRPTW

We use a set partitioning formulation problem proposed by Desaulniers, Desrosiers, & Solomon [11]. The constraints (4) in VRPTW formulation relate all vehicles, while the other constraints are for each vehicle k . With the assumption that the vehicle are homogenous, is possible to use the decomposition principle to generate a subproblem for each vehicle and the master problem that related them.

In reference [11] it is stated that to formulate the subproblem as a shortest path problem is so far the most successful decomposition scheme for VRPTW. In this way the problem is solved without enumerating all possible paths [13].

3.2.1.1. The master problem

Let R^k be the set of feasible paths for vehicle $k \in K$. Hence, $r \in R^k$ corresponds to an elementary path which can also be described by using the binary values x_{ijr}^k , where $x_{ijr}^k = 1$, if vehicle k goes directly from vertex i to vertex j on path r , and, $x_{ijr}^k = 0$ otherwise. Any solution x_{ijr}^k to the master problem can be written as a non-negative convex combination of a finite number of elementary paths, i.e.

$$x_{ij}^k = \sum_{r \in R^k} x_{ijr}^k \gamma_r^k \quad \forall k \in K, (i, j) \in A \quad (12)$$

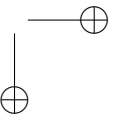
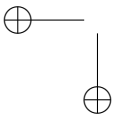
$$\sum_{r \in R^k} \gamma_r^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (13)$$

$$\gamma_r^k \geq 0 \quad \forall k \in K, r \in R^k \quad (14)$$

Where γ_r^k is the number of times path r is used by one vehicle k . Using x_{ijr}^k we can define the cost of a path, t_r^k , and the number of times a customer i is visited by vehicle k , a_i^k , as:

$$t_r^k = \sum_{(i,j) \in A} t_{ij}^k x_{ijr}^k \quad \forall k \in K, r \in R^k \quad (15)$$

$$a_i^k = \sum_{j \in N \cup \{n+1\}} x_{ijr}^k \quad \forall k \in K, i \in N, \forall r \in R^k \quad (16)$$



$$x_{ij}^k = \sum_{r \in R^k} x_{ijr}^k \gamma_r^k \quad (17)$$

Now we can substitute these values in (1) and (4) and arrive at the revised formulation of the master problem:

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{r \in R^k} t_r^k \cdot \gamma_r^k \quad (18)$$

s.t.,

$$\sum_{k \in K} \sum_{r \in R^k} a_{ir}^k \cdot \gamma_r^k = 1 \quad \forall i \in V \quad (19)$$

$$\sum_{r \in R^k} \gamma_r^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (20)$$

$$\gamma_r^k \geq 0 \quad \forall k \in K, \forall r \in R^k \quad (21)$$

The objective function (18) minimizes the total travel time. Constraints (19) ensure that a node is visited exactly once. Constraints (20) represents that each vehicle use only one route. Constraints (21) ensures nonnegative variables.

In the usual case of a single depot and a homogeneous fleet of vehicles with the same initial conditions for all vehicles, all are identical, that is, $R = R^k$, $k \in K$.

$$\sum_{k \in K} \gamma_r^k = \gamma_r \quad (22)$$

$$c_r = \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ijr} \quad \forall r \in R \quad (23)$$

$$a_{ir} = \sum_{j \in V \cup \{n+1\}} x_{ijr} \quad \forall i \in N, r \in R \quad (24)$$

where γ_r is number of times path r is used. The resulting model given below is the classical linear relaxation of the set partitioning formulation given by equations (25) to (29).

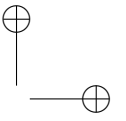
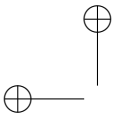
$$\min \sum_{r \in R} t_r \cdot \gamma_r \quad (25)$$

s.t.,

$$\sum_{r \in R} a_{ir} \cdot \gamma_r = 1 \quad \forall i \in C \quad (26)$$

$$\sum_{r \in R} \gamma_r = m \quad (27)$$

$$\gamma_r \geq 0, \quad \forall r \in R \quad (28)$$



The objective function (25) minimizes the total travel time. Constraints (26) ensure that a node is visited exactly once. Constraints (27) represents that the number of active paths is equal to the number of vehicles. Constraints (28) ensures nonnegative variables.

In the column generation method, the set of paths R is restricted, so this problem is called the Restricted Master Problem (RMP). To find an optimal solution to the master problem, a new variable (column) is requested with negative reduced cost. This variable is obtained to solve the subproblem, sometimes called pricing subproblem, i.e., the subproblem search a path with the least possible reduced cost. This process is repeated until the variable from subproblems has a nonnegative reduce cost (it will actually be 0). It is the stopping criterion. Solving the master problem, we can obtain an integer solution but it is not guaranteed to be so. In the event that a solution is whole, will be a basic solution to the VRPTW, but not necessarily optimal [11].

3.2.1.2. The subproblem

In the column generation approach for the VRPTW proposed by [11], the subproblem decomposes into $|K|$ identical problems, each one being an Elementary Shortest Path Problem with Time Windows and Capacity Constraints (ESPPTWCC), where elementary means that each customer can appear at most once in the shortest path. The resource constraints are the time windows, vehicle capacity and maximum duration travel time of a path. It can be formulated as:

$$\min \sum_{(i,j) \in A} (t_{ij} - \pi_i) \cdot x_{ij} \quad (29)$$

s.t.,

$$\sum_{j \in V} x_{0jk} = 1 \quad (30)$$

$$\sum_{i \in V} x_{in+1k} = 1 \quad (31)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ij} = \sum_{j \in V} x_{ji} \quad \forall i \in V \quad (32)$$

$$\sum_{i \in V} p_i \sum_{j \in V} x_{ijk} \leq Q \quad (33)$$

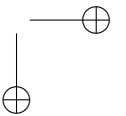
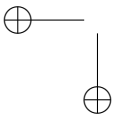
$$y_i + t_{ij} + s_i - M \cdot (1 - x_{ij}) \leq y_j \quad \forall i, j \in V \quad (34)$$

$$e_i \leq y_i \leq l_i \quad \forall i \in V \quad (35)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V \quad (36)$$

$$y_i \geq 0 \quad \forall i \in V. \quad (37)$$

The objective function (29) finds the shortest time path. Constraints (30) and (31) are the resulting in a path from the depot to the depot . Constraints (32) are flow constraints. Constraint



(33) is the capacity constraint, constraints (34) and (35) are time constraints, while constraint (36) ensures integrality and (37) nonnegative variables.

Since the ESPPTWCC is NP-hard in the strong sense (see [11]), this problem is solved by relaxing some of the constraints or using the special algorithms developed for it, as dynamic programming approach or label algorithms.

To the initial solution of RMP we use the combination of two phase simplex's method and column generation method. We assume that all $t_{ij} = 0$ and add many artificial variables as constraints there have been as basic solution initial. Then, the column generation is running until all artificial variables leaves the basic solution or all cost are non-negative. Once the basic feasible solution is found, all t_{ij} take its original values.

3.2.2. Step 2: A TSP model

After solving the problem as described above, we obtain the path of each vehicle to visit all the clusters. In the second step of routing phase, the visiting sequence of nodes in each cluster is generated.

We propose a variant of TSP formulation in order to find the shortest path to visit all nodes in each cluster observing the obtained sequence in step 1. The proposed variant consists that the vehicle does not return to the origin node. It can be formulated as follows:

$$\min \sum_{(i,j) \in V} t_{ij} \cdot x_{ij} \quad (38)$$

s.t.,

$$\sum_{j \in V} x_{0j} = 1 \quad (39)$$

$$\sum_{i \in V} x_{in} = 1 \quad (40)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V \setminus \{0, n\} \quad (41)$$

$$\sum_{j \in V} x_{hj} = \sum_{j \in V} x_{jh} \quad \forall h \in V \setminus \{0, n\} \quad (42)$$

$$y_{ik} + t_{ij} + s_i - M \cdot (1 - x_{ijk}) \leq y_{jk} \quad \forall i, j \in V \quad (43)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V \quad (44)$$

The objective function (38) finds the shortest time path. The constraints (39) and (40) ensure the starting from the node 0 and arrive at node n (different start node to the end node of the route), respectively. All other nodes must be visited once time is stated in constraints (41). The flow balance constraints are stated in (42). Finally, constraints (43) remove the sub-tours and constraints (44) ensures nonnegative variables.

After the second stage, the detailed scheduling of each vehicle by setting the check nodes and when the time will. Table IV summarizes the proposed approach.

Table IV
Pseudo code proposed to solve the SBRPTW

Phase 1: Clustering phase
Set n_clusters1
Create n_clusters1 number of clusters // phase 1 step 1
Run Cluster Construction
Run Cluster Adjustment
For $i = 1$ to n_cluster1 // phase 1 step 2
 Create n_clusters_i
 Run Cluster Construction
 Run Cluster Adjustment
 $i = i + 1$
End for
Phase 2: Routing phase
For $i = 1$ to n_cluster1
 Run Column generation method to VRPTW // phase 2 step 1
 For $j = 1$ to n_clusters_i
 Solve TSP model // phase 2 step 2
 End for
 $i = i + 1$
End for

4. Numerical results

In this section, we apply the proposed method to a real world case. The reported results were obtained using Xpress-MP 7.4 on a Windows 8 64-bit machine, with an Intel Core i5 3337 processor (2×1.8 GHz) and 6GB of RAM.

4.1. Case study

The Jose Max Leon Schools is located in Bogota, Colombia. The school counts on 600 users for its buses system, located in 400 different locations (nodes). Although the bus fleet is currently heterogeneous, with an average 18 passengers capacity, it is provided by a third-party transport company, and so we reason it would be feasible to be changed to an homogenous fleet with no additional costs to the school. Thus, we assume the homogeneous fleet of vehicles with transportation capacity of 18 and 25 passengers. In addition, it was assumed that the vehicles departure and arrive to the school (depot). Finally, the return path to deliver students is supposed to be inverse to picking them up.

Shortest travel time/distance between each pair of points in the network was computed using the “Euclidian distance” method. We use the free service www.mapas.com.co for geocoding addresses turn into latitude and longitude coordinates. Nodes’ distribution after geocoding the address is shown in Fig. 2.

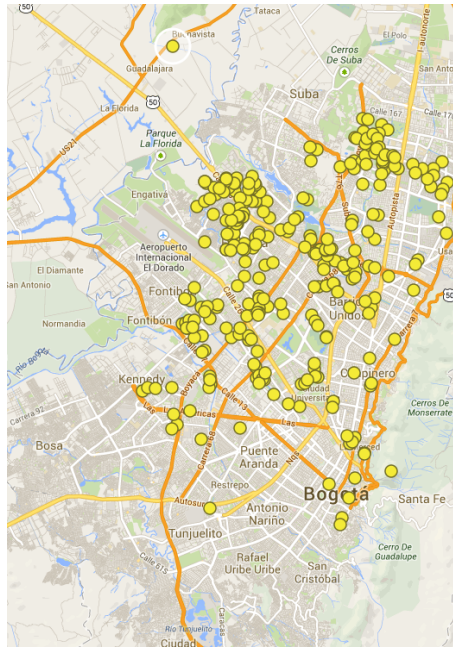


Figura 2. Demand geographical distribution in Bogota city.

4.2. Results

In first step, big groups were formed. The clustering algorithm was run for urban locations, rural locations established fifth group. Groups’ description is presented in Table V. First column shows the number of groups created, second column shows the amount of nodes assigned to each groups and third column the final demand of each group.

Table V. First step, created group’s description

Group	Nodes	Demand
1	85	133
2	103	132
3	95	130
4	81	128
5	78	140

Then, the clustering algorithm was executed once again for each group so to be divided into more or less 25 clusters. Group characteristics are shown in Table VI where first columns identifies each group, second column represent the amount of clusters generated for each group and finally in third column the clusters' demand average is presented.

Table VI. Groups characteristics after second step clustering

Group	Clusters	Demand Average
1	25	5,3
2	26	5,1
3	21	6,2
4	20	6,4
5	24	5,8

The previous phase intended to reduce the solutions space so that the column generation method could be executed successfully. Results of the clustering phase are shown in Fig. 3, left side shows the big groups' creation and right side shows clustering inside a group were same-color points represent a cluster.

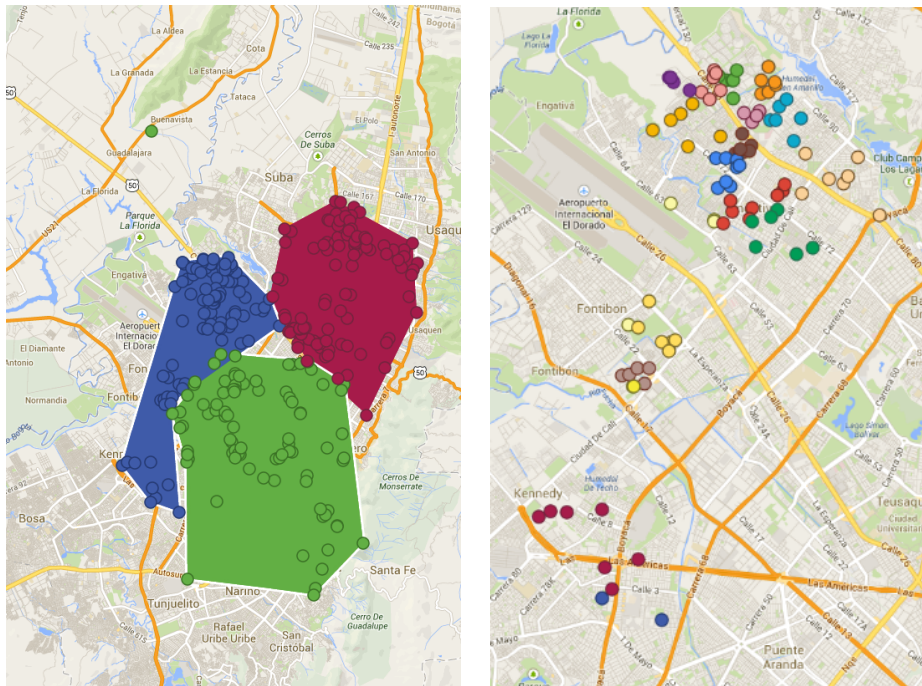


Figura 3. Demand geographical distribution in Bogota city.

Routing phase was executed twice, all solution steps took about three minutes of execution. First of all, with the vehicles' capacity parameter set to 18 passengers and finally increasing

this parameter to 25 passenger so as to evaluate the convenience of using one or another kind of vehicles.

Results of this phase are summarized in Table VII. First column presents the performance measures. Second column shows the current information for Jose Max Leon's school bus system. Third column shows the solution with homogeneous fleet of vehicles with 18 passenger capacity and finally, fourth column shows the solution with 25 passenger vehicles.

As shown in Table VII, the capacity utilization decreases in both cases (18 and 25 passenger-vehicles) compared to the current solution. In the case of 18 passenger -vehicles, the cost per user is increasing, since more vehicles has to be used in order to serve the same demand. In the case of 25 passenger -vehicles, the capacity utilization decreases, besides that cost per user is also slightly decreased because less vehicles are used and fixed costs are reduced. Lower capacity utilization at a same level of cost per user could drive to have some room to face a marginal demand increase.

The travel times are also improved, the main goal was to reduce students' travel time and that is achieved in both scenarios. In 18 passenger vehicles, a 39 % decrease in travel time whereas in 25 passenger vehicles the reduction goes to a 35 % decrease compared to current solution.

Table VII. Summary results of routing phase

Solution	Current	18 passenger Vehicles	25 passenger Vehicles
Fleet	Heterogeneous	Homogeneous	Homogeneous
Capacity utilization	91,4 %	89,8 %	85,5 %
Average of visited nodes	-	10,78	14,26
Average of students per vehicle	17,56	16,17	21,39
Average of travel time	62,59	37,78	40,44
Cost per user (COP)	\$ 166.878	\$ 187.473	\$ 165.355

A graphical description of routing phase is shown in Fig. 4, left side represents the routing phase performed in every group in which the column generation algorithm was executed and right side shows the routing step for each cluster in which a TSP was solved.

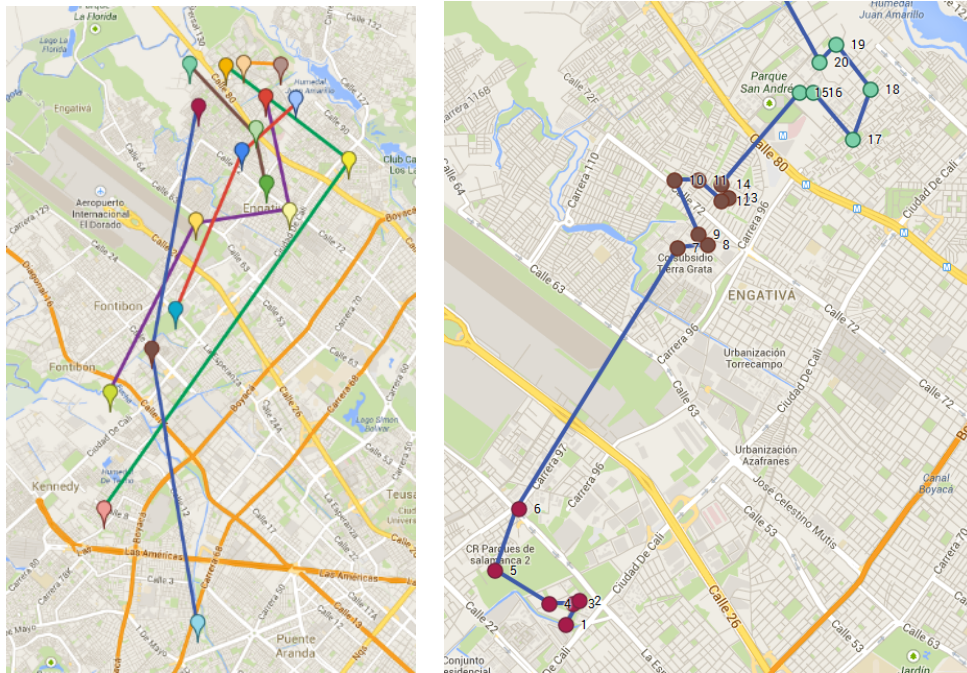


Figure 4. Graphical description of routing phase.

5. Concluding remarks

In this work is studied a variant of the school bus routing problem including time windows. The problem was modeled as a classical vehicle routing problem with time windows. It was solved using a hybrid column generation and clustering method. This is a two-phase method. The first phase uses clustering in order to reduce the number of nodes in the VRPTW formulation. The second phase is aimed at finding the best set of route to pick up all students. This phase was solved in two steps, the first step with a column generation method, while the second step with a modified TSP formulation.

The proposed approach found a reduction of 39% and 35% of the students travel time for the 18 and 25 passenger per vehicle scenarios, respectively. Although the fleet cost is increased in case of, 18 passenger per vehicle since more vehicles has to be used in order to serve the same demand, our approach allows reducing the number of visited students, which implies that the vehicle does less stops, and hence the travel time is reduced. In addition, a student does not take more than 88 minutes on the road and an average travel time of 37 minutes, in case of 18 passenger per vehicle.

Future work should focus in the other clustering method to reduce the complexity of the problem in terms of required computational time to obtain a cluster or explore another classification for instance the importance or priorities and improve the decision-aid tool to allow speeding up the method. Another real world constraints and characteristics can be explored as heterogeneous fleet of buses, stochastic travel times, other objective functions, among others.

6. Acknowledgment

We thank Fair Isaac Corporation (FICO) for providing us with Xpress-MP licenses under the Academic Partner Program subscribed with Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas (Colombia). In addition, our special thanks to José Max León School for providing us the information for this research.

References

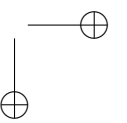
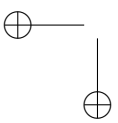
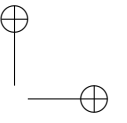
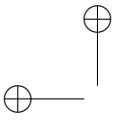
- [1] J. Park y B.-I. Kim, “The school bus routing problem: A review”, *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 202, n.o 2, pp. 311-319, abr. 2010.
- [2] G. K. Rand, “The life and times of the Savings Method for Vehicle Routing Problems”, *ORiON*, vol. 25, n.o 2, dic. 2009.
- [3] A. Olivera, “Heurísticas para problemas de Ruteos de Vehículos”. *Universidad de la República, Montevideo, Uruguay*, 2004.
- [4] G. B. Dantzig y J. H. Ramser, “The truck dispatching problem”, *Manag. Sci.*, vol. 6, n.o 1, pp. 80–91, 1959.
- [5] G. Laporte y Y. Nobert, “Exact algorithms for the vehicle routing problem”, *Surv. Comb. Optim.*, vol. 31, pp. 147–184, 1987.
- [6] G. Laporte, “The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms”, *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 59, n.o 3, pp. 345–358, 1992.
- [7] P. Toth y D. Vigo, *The vehicle routing problem*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002.
- [8] J. S. Arias-Rojas, J. F. Jiménez, y J. R. Montoya-Torres, “Solving of school bus routing problem by ant colony optimization.”, *Rev. EIA*, n.o 17, 2012.
- [9] M. Spada, M. Bierlaire, y T. M. Liebling, “Decision-aiding methodology for the school bus routing and scheduling problem”, *Transp. Sci.*, vol. 39, n.o 4, pp. 477–490, 2005.
- [10] T. Bektas y S. Elmastas, “Solving school bus routing problems through integer programming”, *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 58, n.o 12, pp. 1599–1604, 2006.
- [11] G. Desaulniers, J. Desrosiers, y M. M. Solomon, *Column generation*, vol. 5. Springer, 2005.
- [12] K. Shin y S. Han, “A Centroid-based Heuristic Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem”, *Comput. Inform.*, vol. 30, n.o 4, pp. 721-732, ene. 2012.
- [13] D. Simchi-Levi, X. Chen, y J. Bramel, “A case study: School bus routing”, *Log. Logist. Theory Algorithms Appl. Logist. Supply Chain Manag.*, pp. 319–335, 2005.

Eduyn Ramiro López Santana

He is an Assistant Professor at the Engineering Faculty of the Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Bogotá, Colombia. He obtained his bachelor degree on Industrial Engineering at the same university in 2009, a Master degree on Industrial Engineering at the Universidad de los Andes – Bogotá, Colombia in 2013, and currently he is performing Doctoral studies on engineering at the Universidad Distrital Francisco José de Caldas. His main interests are: combinatorial optimization, expert systems and applications in production and logistics.
e-mail: erlopezs@udistrital.edu.co

José de Jesús Romero Carvajal

He is a professional engineer at Private Corporation. He obtained his bachelor degree on Industrial Engineering at the Universidad Distrital Francisco José de Caldas – Bogotá, Colombia in 2014.
e-mail: jjmisoromero@gmail.com





Juan Carlos Figueroa García
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
jcfigueroag@udistrital.edu.co



On the fuzzy extension principle for LP problems with Interval Type-2 Technological Coefficients

Acerca del principio de extensión para problemas LP con parámetros difusos Tipo-2 de Intervalo

Abstract

A special kind of Linear Programming (LP) problems involve linguistic uncertainty that can be represented by Interval Type-2 Fuzzy numbers using the extension principle for fuzzy sets. This principle has been widely used in decision making, computation of a function of fuzzy sets, fuzzy optimization, etc, so this paper focuses to clarify some aspects about its use in LPs with interval Type-2 fuzzy technological parameters.

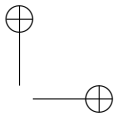
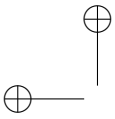
Key words: Fuzzy Sets, Linear Programming, Extension Principle.

Resumen

Una familia especial de problemas de programación lineal (LP) incluyen incertidumbre lingüística que puede ser representada a través de números difusos Tipo-2 de intervalo que a su vez se operacionalizan a través del principio de extensión. Este principio ha sido ampliamente utilizado en toma de decisiones, cómputo de funciones de conjuntos difusos, optimización difusa, etc, por lo que en este artículo hacemos algunas claridades acerca de su aplicación en problemas LP con coeficientes tecnológicos definidos como números difusos Tipo-2 de intervalo.

Palabras claves: Conjuntos Difusos, Programación Lineal, Principio de Extensión.

Recibido: 12-02-2015
Modificado: 08-03-2015
Aceptado: 10-03-2015



1. Introduction

In some situations decision making is performed by a group of people instead of a single person, so disagreement, ambiguity, and other uncertainty sources can affect the selection of a particular parameter. The main idea of combining Linear Programming (LP) models to fuzzy sets is to include the opinion of multiple experts who define the left hand side parameters on an LP problem, namely a_{ij} .

In some practical applications, the parameters a_{ij} are just realizations of an unknown random process that can be represented through multiple experts perceptions, so the analyst has to find a solution given those operation conditions. This way, there is a need for correlate practical issues (random realizations of a_{ij}) to experts perceptions and opinions about a_{ij} .

On the other hand, there is a need for computing the membership degree that a random selection of technological coefficients of an LP problem has, to later analyze their results to what it is expected by experts.

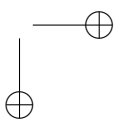
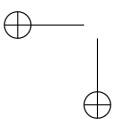
Different approaches to Fuzzy Linear Programming (FLP) problems have been presented in bibliography. Rommelfanger [19], [20], [17], [18], Ramík [14], [15], Ramík & Řimánek [16], and Gasimov & Yenilmez [9] who treated the field of classical fuzzy sets and its application in LP problems.

Figuroa-García [4] has proposed a model for FLP with uncertain technological parameters defined as Interval Type-2 Fuzzy Numbers (IT2FN), Figuroa-García & Hernández [7], [6] proposed a method for solving LP problems with Type-2 fuzzy constraints, Figuroa-García, Chalco-Cano & Román-Flores [5], and Figuroa-García & Hernández [8] provide some definitions on fuzzy constraints and fuzzy ordering. Building upon these results, in this paper we apply them to the particular issue of handling random values of a_{ij} in order to compute its optimal solution and its satisfaction degree.

This paper focuses on how to compute the membership degree of a random realization of a_{ij} given previous experts perceptions and/or opinions about a_{ij} which are represented using interval Type-2 fuzzy sets, and applied in LP problems. The paper is divided into six sections; a first one that introduces the main problem; a second one that shows some basic concepts on interval Type-2 fuzzy sets; a third one that presents the interval Type-2 fuzzy linear programming model; a fourth section introduces the extension principle for fuzzy sets; a fifth section presents an application example, and finally some concluding remarks are shown in section 6.

2. Basics on Type-2 fuzzy numbers

Firstly, we want to clarify some notations used throughout this paper. An Interval Type-2 Fuzzy Set (IT2FS) is denoted by emphasized capital letters \tilde{A} whose membership function $\mu_{\tilde{A}}(x)$ is defined over $x \in X$. A classical fuzzy set μ_A is a measure of the affinity of a particular value $x \in X$ regarding a concept/word/label A , and $\mu_{\tilde{A}}(x)$ measures uncertainty of a value $x \in X$ regarding A .



In this paper, we use notations and definitions provided by Jerry Mendel [12]. A Type-2 fuzzy set is an ordered pair $\{(x, u), \mu_{\tilde{A}}(x, u) : x \in X, u \in J_x \subseteq [0, 1]\}$, where A is its linguistic label, so \tilde{A} represents uncertainty around the word A ; $\mathcal{F}_1(X)$ is the class of all Type-1 fuzzy sets over X ; $\mathcal{F}_2(X)$ is the class of all Type-2 fuzzy sets over X ; $\mathcal{P}(X)$ is the class of all crisp sets over X . A Type-2 fuzzy set can be represented as follows:

$$\begin{aligned} \tilde{A} &: X \rightarrow F([0, 1]) \\ \tilde{A} &= \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) \mid x \in X\} \\ \tilde{A} &= \{(x, u), \mu_{\tilde{A}}(x, u) \mid \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0, 1]\} \end{aligned}$$

where J_x is the set of primary membership degrees of $x \in X$, $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x, u) \leq 1$, and u is its domain of uncertainty.

An IT2FS \tilde{A} encloses an infinite amount of classical fuzzy sets into its *Footprint of Uncertainty* (FOU), and A_e is a Type-1 fuzzy set embedded in its FOU (see Mendel et al [13]):

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) \mid x \in X\}$$

where $\mu_{\tilde{A}}(x)$ is completely characterized by $J_x \subseteq [0, 1]$.

A simpler Type-2 fuzzy set is called *Interval Type-2 fuzzy set (IT2FS)* in which $u = 1$, and is characterized by two primary membership functions: Upper Membership Function (UMF) namely $\bar{\mu}_{\tilde{A}}$, and Lower Membership Function (LMF) namely $\underline{\mu}_{\tilde{A}}$. Figure 1 shows the set \tilde{A} .

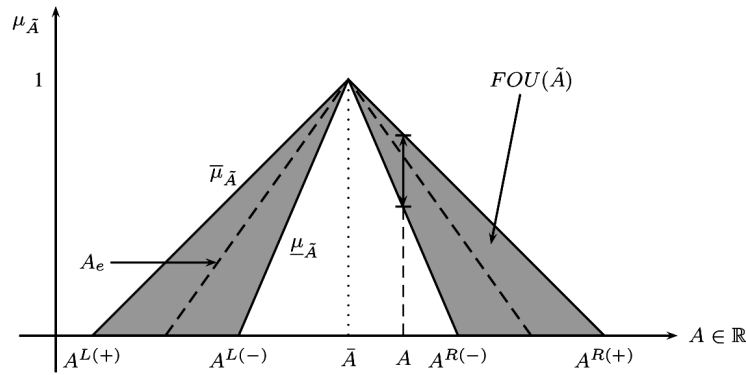


Figura 1. Interval Type-2 Fuzzy set \tilde{A}

As discussed by Figueroa-García, Chalco-Cano & Román-Flores [5], a Type-2 fuzzy number (*T2FN*) is considered as the extension of a Type-1 fuzzy number. This is, \tilde{A} is a T2FS whose UMF and LMF are fuzzy numbers e.g a normal fuzzy set, ${}^\alpha A$ is closed interval for all $\alpha \in [0, 1]$, and its support $supp(A) \in \mathcal{P}(\mathbb{R})$ is bounded which means that a fuzzy number is a convex fuzzy set as well.

The α -cut of A is defined as ${}^\alpha A = \{x \mid \mu_A(x) \geq \alpha\}$. This makes the computation of any function $f(x)$ of fuzzy sets easier. Here, $z^* = c'x^*$ comes from $f(\tilde{A}_i)(z^*)$, so we want to compute $f(\tilde{A}_i)(z^*)$ by using α -cuts instead of mapping x_i . The α -cut of A is simply the cut ${}^\alpha J_x = \{x \mid \mu_A(x) \geq \alpha\}$ done over its primary membership function J_x (see Figueroa [3],

and Figueroa-García, Chalco-Cano & Román-Flores [5]). A graphical representation of $\alpha\tilde{A}$ is provided in Figure 2.

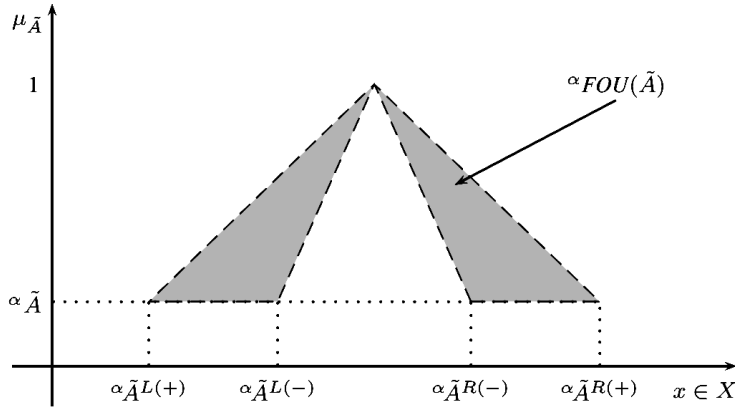


Figure 2. $\alpha\tilde{A}$ of an Interval Type-2 Fuzzy set \tilde{A} .

3. The Interval Type-2 fuzzy LP problem

First, the classical crisp LP problem is basically is a model that relates a set of m inequalities whose goal is to maximize the value of an objective (a.k.a goal) function, as follows:

$$\begin{aligned} \text{Max}_x \quad & z = c'x + c_0 \\ \text{s.t.} \quad & Ax \leq b \\ & x \geq 0 \end{aligned} \tag{1}$$

where $x \in \mathbb{R}^n$, $c \in \mathbb{R}^n$, $c_0 \in \mathbb{R}$, $A \in \mathbb{R}^{n \times m}$, and $b \in \mathbb{R}^m$.

Now, when technological parameters A cannot be well defined or they are bad measured, we need to use other methods to get those parameters. A popular way to get them is by using experts opinions, so the use of fuzzy sets to quantify its perceptions about A become an important information source. Commonly in the industry, there are more than one expert who can provide valuable information about A , so we need to comprise all their perceptions and opinions into a single measure: an IT2FN.

This leads us to re-define the crisp LP model as an IT2FLP, as follows:

$$\begin{aligned} \text{Max}_x \quad & z = c'x + c_0 \\ \text{s.t.} \quad & \tilde{A}x \preceq b \\ & x \geq 0 \end{aligned} \tag{2}$$

where $x \in \mathbb{R}^n$, $c \in \mathbb{R}^n$, $c_0 \in \mathbb{R}$, $\tilde{A} \in \mathcal{F}_2(X)$.

This model cannot be solved in a closed form, so the idea in this paper is to show how to compute the membership degree of any crisp solution and how to understand its sense. Based on the results of Figueroa-García [4] we do a complement of his results by clarifying some concepts about random solutions instead of α -cuts (which is also a reasonable method).

The α -cuts approach proposed by Figueroa-García [4] is way to go from \tilde{A} to \tilde{z} (which is the IT2FS of optimal solutions), but it does not include random choices of A . A random choice of A is a selection of different a_{ij} that depends on the current conditions of the system, and mostly are just available conditions under the system has to operate, so the analyst has no any guarantee that their results are the best possible or even good, they are just solutions of the IT2FLP.

Next section is dedicated on explain how to compute the membership degree that any random solution has, and how to understand its meaning.

4. Extension principle for IT2FS

A first approach to find an appropriate way for modeling fuzzy functions is given by the Zadeh's *Extension principle* (see Bellman & Zadeh [1], Klir & Yuan [10], and Mendel [12]). Let f be a function such as $f : X_1, X_2, \dots, X_n \rightarrow z$, and A_i is a fuzzy set in X_i , $i = 1, 2, \dots, n$ with $x_i \in X_i$, then we have

$$f(A_1, A_2, \dots, A_n)(z) = \sup_{z=f(x_1, x_2, \dots, x_n)} \min_i [A_1(x_1), A_2(x_2), \dots, A_n(x_n)] \quad (3)$$

The fuzzy extension principle projects any function e.g $z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ to a fuzzy set by using their memberships $A_1(x_1), A_2(x_2), \dots, A_n(x_n)$. Its extended version is as follows.

Definition 1 Let $A_x \in \text{supp}(\tilde{A})$ be a matrix of crisp technological coefficients, $A_x \in \mathbb{R}^{m,n}$, and $z_x^* = c'x^*$ be the optimal solution of the LP for A_x . Then we have

$$f(A_x)(z_x^*) = \min_{i' \in k} \{ [\underline{\mu}_{\tilde{A}_{i'}}, \bar{\mu}_{\tilde{A}_{i'}}], \dots, [\underline{\mu}_{\tilde{A}_{i'}}, \bar{\mu}_{\tilde{A}_{i'}}], \dots, [\underline{\mu}_{\tilde{A}_{k'}}, \bar{\mu}_{\tilde{A}_{k'}}] \}, \quad (4)$$

$$\underline{\mu}_{\tilde{A}_{i'}} = \min_j \{ \underline{\mu}_{\tilde{A}_{i'1}}, \dots, \underline{\mu}_{\tilde{A}_{i'j}}, \dots, \underline{\mu}_{\tilde{A}_{i'n}} \}, \quad (5)$$

$$\bar{\mu}_{\tilde{A}_{i'}} = \min_j \{ \bar{\mu}_{\tilde{A}_{i'1}}, \dots, \bar{\mu}_{\tilde{A}_{i'j}}, \dots, \bar{\mu}_{\tilde{A}_{i'n}} \}. \quad (6)$$

where $i' \in k$ is the set of all binding constraints of the optimal program.

This Definition computes the membership degree of any random solution z_x^* regarding the set \tilde{z} . Basically it is computed using the membership degree that A_x has regarding the sets \tilde{A}_{ij} , that is $\bar{\mu}_{\tilde{A}_{ij}}$ and $\underline{\mu}_{\tilde{A}_{ij}}$ which finally lead to $f(A_x)(z_x^*)$.

5. Application example

To illustrate how an IT2FLP works, we present the following example. Suppose that a company has to plan the production quantity (in thousands) of two products x_1 and x_2 , where every sold product returns $c_1 = 2$ and $c_2 = 3$ thousand US dollars (profits) per unit, and its production requires two materials which are available by $b_1 = 12$ and $b_2 = 15$ tons, respectively. The material consumption a_{ij} per product x_1, x_2 is uncertain since historical data is absent, so the analyst is encouraged to find a way to plan the best production quantities that maximize profits.

Given hypothetical normal operation conditions, it is supposed that the material consumption per product should be $a_{11} = 1, a_{12} = 4, a_{21} = 3$ and $a_{22} = 2$, but it is a hard supposition since we do not have historical information about the material consumption in order to verify the performance of the company. To have a better idea about the system, we have to ask the people involved into production planning, so we enquire to five experts (people on manufacturing, engineering, mechanical processes, etc) about their perception around material consumption of every product.

Now, both uncertain parameters and information that comes from multiple experts (perceptions and opinions) leads us to deal with Type-2 fuzzy uncertainty, so a_{ij} turns into \tilde{A}_{ij} . This way, the experts are encouraged to provide its opinions about “Normal material consumption” of every \tilde{A}_{ij} using two boundaries: *pessimistic* and *optimistic*. The description of the IT2FLP is given next:

$$\begin{aligned} \text{Max}_{x_j} \quad & z = 2x_1 + 3x_2 \\ \text{s.t.} \quad & \\ & \tilde{1}_{11}x_1 + \tilde{4}_{12}x_2 \lesssim 12 \quad (7) \\ & \tilde{3}_{21}x_1 + \tilde{2}_{22}x_2 \lesssim 15 \quad (8) \\ & x_j \geq 0 \end{aligned}$$

The analyst has to use the information provided by the experts, which usually is described using sentences such as “I think that the parameter (i, j) should be between a and c ”, or “I think that the most possible value of the parameter (i, j) should be b ”. Now, the five experts namely E_1, \dots, E_5 were asked for the parameters a_{ij} using the above sentences having the same idea about its most possible value (provided as starting information in the model), but they are not agree about their perceptions around its boundaries.

In this paper, the UMF and LMF of every a_{ij} are triangular membership functions. A triangular membership function $T(a, b, c)$ is defined by an *optimistic* boundary a , an *expected* value b , and a *pessimistic* boundary c , as follows:

$$T(a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & x = b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & x \geq c \end{cases} \quad (9)$$

The complete description of a_{ij} is shown next:

$$\begin{aligned} \bar{\mu}_{\tilde{A}_{11}} &= T(0, 1, 3) & \underline{\mu}_{\tilde{A}_{11}} &= T(0.5, 1, 1.5) \\ \bar{\mu}_{\tilde{A}_{12}} &= T(2, 4, 7) & \underline{\mu}_{\tilde{A}_{12}} &= T(3, 4, 5.5) \\ \bar{\mu}_{\tilde{A}_{21}} &= T(1, 3, 5) & \underline{\mu}_{\tilde{A}_{21}} &= T(2, 3, 4) \\ \bar{\mu}_{\tilde{A}_{12}} &= T(0, 2, 5) & \underline{\mu}_{\tilde{A}_{12}} &= T(0.5, 2, 3.5) \end{aligned}$$

First, we solve the IT2FLP using the method proposed by Figueroa-García [4] which computes a predetermined amount of α -cuts (in this case 10), and then solve the 4α crisp problems using 1. This leads to solve a crisp LP for ${}^\alpha\tilde{A}^{L(+)}$, ${}^\alpha\tilde{A}^{L(-)}$, ${}^\alpha\tilde{A}^{R(-)}$ and ${}^\alpha\tilde{A}^{R(+)}$ (see Figure 2). Finally the set of optimal solutions \tilde{z} is done by using the representation theorem and the extension principle for fuzzy sets (see Klir & Yuan [11]), this is $f(\tilde{A})(z^*)$. The set of optimal solutions \tilde{z} is shown in Figure 3

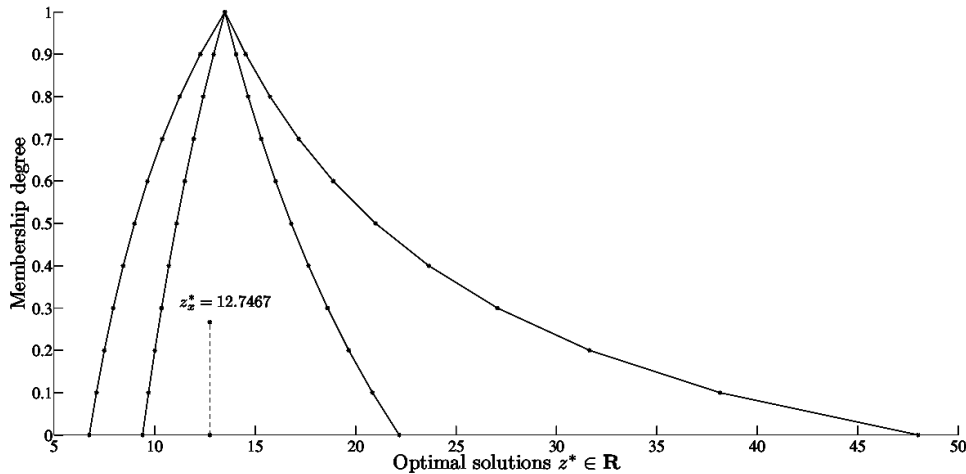


Figure 3. Set of optimal solutions \tilde{z}

Figure 3 show the whole set of optimal solutions of the IT2FLP as a function of α . In practice there is no any certainty that the values of A corresponding to ${}^\alpha\tilde{A}$ occur. Nay, what we can see in practical applications are *random realizations* of \tilde{A} namely A_x , which indeed lead to an optimal solution z_x^* having a membership degree that can be computed by using Definition 1.

Figueroa-García [4] did not consider random realizations A_x of \tilde{A} since that method maps uncertainty using α -cuts while this paper is focused to compute the membership of A_x regarding the set \tilde{z} of optimal solutions proposed by Figueroa-García [4]. The current proposal complements the results of Figueroa-García [4] in the sense that he maps all uncertainty of \tilde{A} while in this paper the membership of a random value A_x is computed and enclosed into \tilde{z} .

Now, suppose that the following values $A_x \rightarrow a_{11} = 0.7, a_{12} = 6.2, a_{21} = 3.1$ and $a_{22} = 1.4$ are observed, leading to $z_x^* = 12.7467$. The question is, how satisfactory is this solution to the experts?. This can be computed using Definition 1 as follows:

$$\begin{aligned} \bar{\mu}_{\tilde{A}_{11'}} &= 0.7, \underline{\mu}_{\tilde{A}_{12'}} = 0.2667, \underline{\mu}_{\tilde{A}_{21'}} = 0.95, \underline{\mu}_{\tilde{A}_{22'}} = 0.3 \\ \underline{\mu}_{\tilde{A}_{11'}} &= 0.4, \underline{\mu}_{\tilde{A}_{12'}} = 0, \underline{\mu}_{\tilde{A}_{21'}} = 0.9, \underline{\mu}_{\tilde{A}_{22'}} = 0.4 \end{aligned}$$

Now, the membership value of $f(A_x)(z_x^* = 12.7467)$ is computed as follows

$$\begin{aligned} \bar{\mu}_{\tilde{A}_1} \min\{0.7, 0.2667\} &= 0.2667, \bar{\mu}_{\tilde{A}_2} = \min\{0.95, 0.3\} = 0.3 \\ \underline{\mu}_{\tilde{A}_1} \min\{0.4, 0\} &= 0, \underline{\mu}_{\tilde{A}_2} \min\{0.9, 0.4\} = 0.4 \\ f(A_x)(z_x^*) &= \min_{1,2}\{[0, 0.2667], [0.4, 0.3]\} = [0, 0.2667] \end{aligned}$$

This means that the optimal $z_x^* = 12.7467$ is satisfactory to all experts in the range $[0, 0.2667]$. On the other hand, this interval of satisfaction degrees is not as large as the corresponding α -cut is, which means that arbitrary choices of $A_x \in \tilde{A}$ are not always the most satisfactory solutions of the problem.

A fully satisfactory crisp solution of this example is $z^* = 13.5$ coming from $x_1^* = 3.6, x_2 = 2.1$. It can be compared to the solution provided by A_x which is $z_x^* = 12.7467$ coming from $x_1^* = 4.18, x_2^* = 1.46$ in the sense that A_x is a random realization of \tilde{A} while the crisp solution needs more materials than the random problem except from first material for second product. Other issue is that the crisp problem is the expected value of the problem which is a less possible combination of parameters. The random problem prefers to produce more units of x_1 than the crisp one and reduces the quantities of x_2 to have a better usage of materials.

Both examples provide different solutions for different operation points of the system, so every optimal solution provides a different way to operate the system.

6. Concluding remarks

We have clarified the meaning of the extension principle applied to IT2FLPs when using random choices of a_{ij} which are enclosed into \tilde{A}_{ij} . This kind of solutions are enclosed into the set of optimal solutions \tilde{z} , but their membership degrees are smaller than the α -cuts solutions which in practice means that random selections of a_{ij} are less satisfactory to the experts of the system even when they are feasible and optimal.

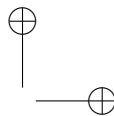
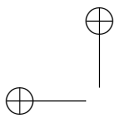
A practical example that shows the applicability of our results is presented to illustrate how a random choice can be optimal in a crisp sense, but less satisfactory to experts expectations about the system's performance.

Based on the IT2FLP model proposed by Figueroa-García [4], [2], and some definitions about fuzzy constraints provided by Figueroa-García, Chalco-Cano & Román-Flores [5] we have extended the applicability of IT2FLPs in presence of random parameters a_{ij} which is a common issue seen on practical applications. Now, the analyst can see how satisfactory an optimal solution is, given any combination of parameters a_{ij} .

Next steps lead to general modeling for FLPs with fuzzy costs, technological coefficients, and constraints which are more complex problems. Also the use of generalized Type-2 fuzzy sets comes as a new way to represent uncertainty, so its potential use in optimization arises as a new field to explore.

References

- [1] R. E. Bellman and Lofti A. Zadeh. Decision-making in a fuzzy environment. *Management Science*, 17(1):141–164, 1970.
- [2] Juan Carlos Figueroa-García. Linear programming with interval type-2 fuzzy right hand side parameters. In *2008 Annual Meeting of the IEEE North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS)*, 2008.
- [3] Juan Carlos Figueroa-García. An approximation method for type reduction of an interval Type-2 fuzzy set based on α -cuts. In IEEE, editor, *In Proceedings of FEDCSIS 2012*, pages 1–6. IEEE, 2012.
- [4] Juan Carlos Figueroa-García. A general model for linear programming with interval type-2 fuzzy technological coefficients. In *2012 Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS)*, pages 1–6. IEEE, 2012.
- [5] Juan Carlos Figueroa-García, Yurilev Chalco-Cano, and Heriberto Román-Flores. Distance measures for interval type-2 fuzzy numbers. *Discrete Applied Mathematics*, To appear(1), 2015.
- [6] Juan Carlos Figueroa-García and German Hernández. *Constraint Programming and Decision Making - Studies in Computational Intelligence*, volume 539, chapter Linear Programming with Interval Type-2 fuzzy constraints, pages 19–34. Springer Verlag, 2014.
- [7] Juan Carlos Figueroa-García and Germán Hernández. A method for solving Linear Programming models with Interval Type-2 fuzzy constraints. *Pesquisa Operacional*, 34(1):1–17, 2014.
- [8] Juan Carlos Figueroa-García and Germán Jairo Hernández-Pérez. On the computation of the distance between interval type-2 fuzzy numbers using α -cuts. In *Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS)*, volume 1, pages 1–6. IEEE, 2014.
- [9] Rafail N. Gasimov and Kürşat Yenilmez. Solving fuzzy linear programming problems with linear membership functions. *Turk J Math*, 26(2):375–396, 2002.
- [10] George J. Klir and Tina A. Folger. *Fuzzy Sets, Uncertainty and Information*. Prentice Hall, 1992.
- [11] George J. Klir and Bo Yuan. *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*. Prentice Hall, 1995.
- [12] Jerry Mendel. *Uncertain Rule-Based Fuzzy Logic Systems: Introduction and New Directions*. Prentice Hall, 1994.
- [13] Jerry M. Mendel, Robert I. John, and Feilong Liu. Interval type-2 fuzzy logic systems made simple. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 14(6):808–821, 2006.
- [14] J. Ramík. Soft computing: overview and recent developments in fuzzy optimization. Technical report, Institute for Research and Applications of Fuzzy Modeling, 2001.
- [15] Jaroslav Ramík. Optimal solutions in optimization problem with objective function depending on fuzzy parameters. *Fuzzy Sets and Systems*, 158(17):1873–1881, 2007.

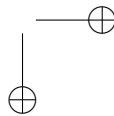
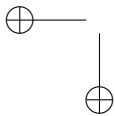


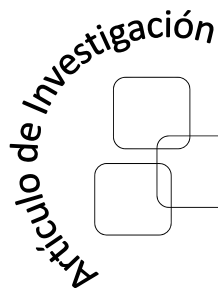
- [16] Jaroslav Ramík and Josef Řimánek. Inequality relation between fuzzy numbers and its use in fuzzy optimization. *Fuzzy Sets and Systems*, 16:123–138, 1985.
- [17] H Rommelfanger. *FULPAL - An interactive method for solving multiobjective fuzzy linear programming problems*, pages 279–299. Reidel, Dordrecht, 1990.
- [18] H Rommelfanger. *FULP - A PC-supported procedure for solving multicriteria linear programming problems with fuzzy data*, pages 154–167. Springer-Verlag, 1991.
- [19] H Rommelfanger. *Entscheiden bei Unsicherheit - Fuzzy Decision Support-Systeme 2nd ed.* Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1994.
- [20] Heinrich Rommelfanger. A general concept for solving linear multicriteria programming problems with crisp, fuzzy or stochastic values. *Fuzzy Sets and Systems*, 158(17):1892–1904, 2007.

Juan Carlos Figueroa-García

He is an Assistant Professor at the Engineering Faculty of the Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Bogotá, Colombia. He obtained his bachelor degree on Industrial Engineering at the same university in 2002, a Master degree on Industrial Engineering at the same university in 2010, and a Ph.D. degree on Industry and Organizations at the Universidad Nacional de Colombia in 2014. His main interests are: fuzzy sets, fuzzy optimization, time series analysis and evolutionary optimization.

e-mail: jcfigueroag@udistrital.edu.co





Nidya Milena Farfán Pinzón
Compañía Grupo Enel
nfarfan@endesacolombia.com.co

Geimar Peña Ardila
Compañía Grupo Enel
gpena@endesacolombia.com.co



Evaluación de políticas de protección en el sector papicultor mediante sistemas dinámicos: caso Villapinzón (Cundinamarca)

Evaluation of protection policies to the potato farmer sector using dynamical systems: the Villapinzon-Cundinamarca case

Resumen

El sistema de producción de papa es una actividad económica de gran relevancia en zonas frías de la Región Andina (Suramérica). En Colombia, se constituye en la principal actividad agrícola de clima frío, caracterizada por una producción predominantemente campesina, con escasa infraestructura tecnológica y escaso nivel de gestión agroempresarial, con elevados costos y cuya rentabilidad depende de precios de mercado altamente fluctuantes. En el presente artículo se utiliza el enfoque de sistemas dinámicos para modelar el contexto de dicho sistema productivo. En el documento se evalúa el impacto de las políticas de protección del sector papicultor en el municipio de Villapinzón, Cundinamarca (municipio de mayor área sembrada en Colombia), mediante el desarrollo de un modelo de análisis estructurado que permite analizar los indicadores de desempeño del sistema. De esta manera se comparan los escenarios actuales, los propuestos por el gobierno y los del enfoque de sistemas dinámicos, y se encuentra que estos últimos son una opción de mejora para los agricultores del sector papicultor.

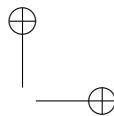
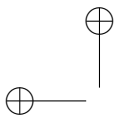
Palabras claves: evaluación de políticas públicas, sistemas dinámicos, política agropecuaria, sector papicultor.

Abstract

The potato production system is an economic activity of great importance in cold areas of the Andina Region (South America). In Colombia it is the main agricultural activity of peasant farmers in cold weather regions, carried out with little technological infrastructure and limited level of agriculture business management, whose production is incurring in soaring costs and whose profitability is highly-dependent on fluctuating market prices. In this paper the dynamical systems approach is used to model the context of the production system. The impact of current government protection policies to potato grower sector compared to the proposed policies obtained from the dynamical systems analysis are evaluated, with a particular attention to the town of Villapinzón, in the Cundinamarca county (the largest municipality in Colombia with potato crops). It is shown that the proposed policies contribute to improving the financial earnings of the peasant farmers. For this purpose a model of structured analysis to measure the impact of these policies on the performance indicators of the system is developed and described.

Key words: agricultural policy, dynamical systems, potato grower sector.

Recibido: 11-02-2015
Modificado: 23-02-2015
Aceptado: 13-03-2015



1. Introduction

El surgimiento durante las últimas décadas de diversos acontecimientos mundiales como la globalización, las cadenas de valor integradas, las restricciones ambientales y el aumento del precio de los bienes agrícolas han tenido como consecuencia que la agricultura retorne a la agenda mundial, al tiempo que le ha proveído un renovado papel en el desarrollo de los países. Este nuevo rol reconoce en la agricultura la capacidad de ejercer múltiples funciones para el desarrollo. Dichas funciones tienen que ver con el crecimiento económico, la sostenibilidad ambiental, la reducción de la pobreza y del hambre, y el logro de mayores niveles de equidad y de seguridad alimentaria. Igualmente, se destaca el hecho de que el sector no sólo contribuye a la producción de alimentos y materias primas, sino que también lo hace a la nutrición y a la salud de las personas [1].

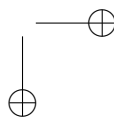
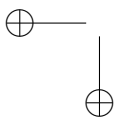
A pesar de su importancia, el sector agrario en Colombia se ha visto desde hace algunos años inmerso en una crisis que ha surgido a raíz de las distintas problemáticas a nivel económico y social que enfrenta el sector. Aunque ha habido avances en materia rural —en reducción de pobreza y mayor acceso a servicios públicos—, la brecha entre lo rural y lo urbano no sólo es excesiva en el país, sino que se ha ampliado [2]–[4].

En Colombia la sostenibilidad del agro queda en entredicho debido, entre otros, a los altos costos de los insumos, así como por la falta de políticas de créditos, por los cambios climáticos y por el sistema de comercialización monopolizado por Corabastos y unos pocos acaudalados [5], [6].

Para Rafael Mejía López [7], presidente de la Sociedad de Agricultores de Colombia (SAC), la situación de inconformismo que han manifestado productores del agro como paperos, lecheros, arroceros y cafeteros, durante el paro nacional que inició el día lunes 19 de agosto de 2013, obedece al pesimismo más alto de los agricultores en los últimos cinco años: “El primer motivo que ha llevado a todo esto son los precios desfavorables de venta de los productos. El segundo es el alto costo de los insumos”.

Visto de este modo, se entiende por qué en el caso particular de la producción de papa, ya no hay rentabilidad. El costo de los fertilizantes y fumigantes es muy alto, y cada vez se requieren más químicos porque la tierra produce cada día menos. Los precios de venta de la papa son muy bajos, entre otras razones por la abundante oferta provocada por el ingreso del producto de otros lugares [8].

El presidente de la junta directiva de Fedepapa, Alejandro Estévez [9], afirma por otra parte que las grandes ganancias se están quedando en la larga cadena de comercialización, que encarecen el producto y distorsionan el mercado. Por eso cree que el gobierno está en mora de retomar las medidas que se discutieron en marzo de 2014 relacionadas con la creación de un fondo parafiscal para el sector: “Se deben destinar recursos para fomentar el consumo que viene de capa caída, establecer unos márgenes de ganancias para las multinacionales y los intermediarios en el precio de los fertilizantes e insecticidas, fijar parámetros más estrictos para las importaciones de papa congelada y controlar más el contrabando”.



La situación que se presenta actualmente afecta a los papicultores de los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Antioquia, Tolima, Santanderes y, por supuesto, Nariño. Sin embargo, es Villapinzón (Cundinamarca), municipio de mayor área sembrada de papa en Colombia [10], uno de los más importantes epicentros de esta problemática económica y social, dada la proporción de habitantes que dependen de la producción de dicho cultivo [11].

Es por ello que el presente artículo busca establecer las diferentes problemáticas que enfrenta el sector en este municipio de Cundinamarca. Se desarrollará un modelo que represente la estructura del sistema, con el objetivo principal de formular políticas que contribuyan al mejoramiento de las condiciones económicas de los papicultores de este lugar, a través de una aproximación a las diferentes problemáticas planteadas por papicultores, federaciones y agremiaciones durante el paro agrario de 2013.

Este artículo pretende, mediante de la identificación de la dinámica actual del sector papicultor, emplear el modelamiento sistémico en la evaluación de las políticas para anticipar los traumatismos que se puedan seguir presentando en el sector papicultor y minimizar los costos involucrados, con el fin de que a mediano y largo plazo se produzcan resultados benéficos a favor de los campesinos papicultores.

2. Materiales y métodos

El proceso investigativo se llevó a cabo utilizando la metodología propuesta por Méndez y Álvarez [12], que se resume en la Figura 1.

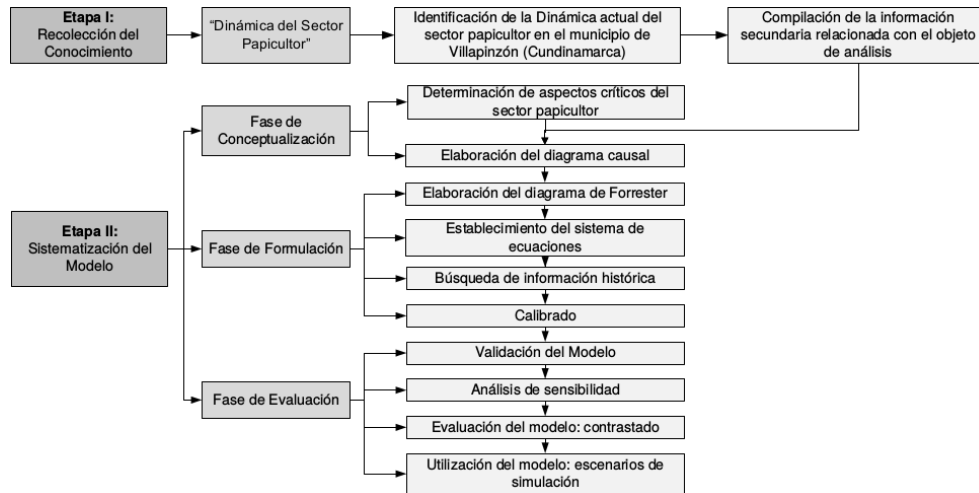


Figura 1. Etapas de desarrollo de la investigación.

En la primera etapa de investigación se realizó la adquisición de conocimiento de la denominada “dinámica del sector papicultor”. Se buscó construir un modelo de referencia de la dinámica actual del sector papicultor en el municipio de Villapinzón (Cundinamarca) me-

diante la respectiva revisión bibliográfica, que permitió identificar los atributos, elementos, relaciones, procesos, actores y particularidades presentes en las actividades y en su desarrollo.

Al encontrar que el proceso de revisión bibliográfica no fue suficiente para obtener la información cuantitativa que identificara propiamente al municipio, y dada la importancia que tiene esta información para la elaboración del modelo y su respectivo análisis, los autores de la presente investigación implementan una serie de metodologías adicionales para lograr construir un modelo de referencia exacto, esta vez desde una fuente de información primaria. Teniendo en cuenta que adoptar la técnica de investigación más apropiada para el estudio determina la exactitud del modelo a desarrollar a través de la dinámica de sistemas, se decidió que la técnica empleada para llevar a cabo el estudio correspondiente debía ser la encuesta.

En la segunda etapa se da el proceso de elaboración del modelo de dinámica del sistema que permite entender la funcionalidad y comportamiento del sector papicultor. Se desarrollan los objetivos de simulación propuestos a través de las fases de conceptualización, formulación y evaluación del modelo. La metodología seguida para complementar el desarrollo de estas tres fases sigue las pautas expuestas por López Díaz-Delgado y Martínez Vicente [13].

Dado que el desarrollo de políticas constituye un proyecto de intervención directa, cuya finalidad es satisfacer un conjunto de necesidades concretas que permitan mejorar o transformar de forma sustancial una realidad existente que no conviene a un grupo social, se desarrolló el enfoque de marco lógico (EML) como herramienta analítica para la planificación de la gestión de proyectos orientados por objetivos, que en este caso están dirigidos a la evaluación del impacto de nuevas políticas de protección del sector papicultor en Colombia que contribuyan al mejoramiento de la estructura financiera del campesino. El EML, en esta investigación, es una metodología que permite estructurar los principales elementos de una política de protección, acentuando las relaciones lógicas entre los requerimientos del sector papicultor, las acciones planeadas y los resultados esperados. Como cualquier método de planificación, se trata de un sistema de toma de decisiones que permite tomar y justificar decisiones mejores y más razonadas.

En la Figura 2 se incluye una propuesta de etapas proyectuales y de ciclos de gestión que puede resultar suficientemente ilustrativa, por su construcción intencionada desde el punto de vista del enfoque del marco lógico (EML) [14]. Se puede observar en la Figura el desarrollo de cuatro fases centrales en las que se incluyen un conjunto de categorías internas o subetapas y algunas otras fases complementarias.

En el análisis de problemas se complementa la indagación efectuada sobre las dificultades de sostenibilidad económica del sector papicultor, considerando como factor adicional el uso de la técnica del Metaplán. Se resalta el uso de esta herramienta con enfoque metodológico social participativo, pues es una de las bases primordiales en la elaboración diagnóstica de metodologías participativas, como el caso del marco lógico, el cual se orienta a la planificación estratégica para la construcción de soluciones pertinentes y oportunas que combinan las potencialidades de los actores sociales involucrados en el proceso [14].

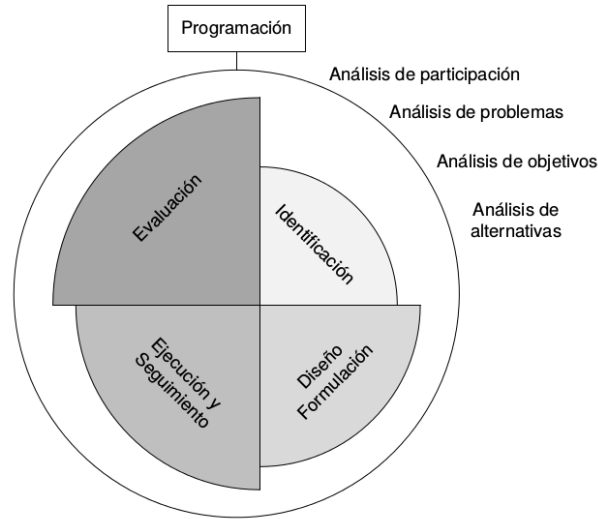


Figura 2. Ciclos de gestión a partir del Enfoque de Marco Lógico.

Se realizó adicionalmente una investigación de trabajos sobre el sector agrícola cuyo objetivo fue evaluar políticas públicas, mediante el enfoque de dinámica de sistemas, con lo cual se afianzó el conocimiento práctico generado para este sector en Colombia. Es así como se estudian, por ejemplo, métodos econométricos para mejorar las políticas agrícolas iraníes [15], [16], se evalúa el sector agrícola en Letonia [17], se evalúa la rentabilidad del pequeño productor agropecuario del Perú [18] y finalmente se estudia la estructura agropecuaria en Chile [19].

3. Resultados

Previamente a la identificación de la política agraria que afecta la dinámica actual del sector papicultor en el municipio de Villapinzón (Cundinamarca), y de hacer claridad sobre cada uno de sus ejes temáticos, junto a los acuerdos y subsidios que impactan directamente el sector en este municipio, se indagó a través del instrumento de investigación sobre el conocimiento general de la política agraria colombiana. En esta averiguación se constató que tan sólo el 3,1 % de los papicultores afirman tener conocimiento de esta, mientras que el 96,9 % restante no posee ninguna noción del tema.

Se ha constatado, de tal manera, que el sector papicultor no se encuentra realmente protegido por ninguna política pública en la actualidad. El gobierno no enfatiza en proteger este sector cuya producción a nivel nacional genera una gran dinámica en el mercado, y prueba de ello es el desconocimiento que manifiestan los productores agrícolas frente a la temática.

También se comprueba que no existen mecanismos efectivos para que el papicultor e incluso otros productores agrícolas tengan acceso a la información concerniente a las políticas públicas vigentes. Lo que se ha podido establecer es que la totalidad de programas a los cuales puede postular su participación un campesino en Colombia son de convocatoria pública, pero no existe conciencia por parte de las entidades gubernamentales frente a las condicio-

nes en que viven los agricultores, que en la mayoría de los casos no tienen acceso a medios tecnológicos y por ende se ven imposibilitados en el acceso a la información requerida para poder aplicar a un beneficio de este tipo.

Así mismo, la información consultada permite afirmar que los únicos mecanismos de ayuda a los cuales puede tener acceso un papicultor corresponden a los créditos bancarios subsidiados por Finagro. Como bien se ha visto, el acceso a créditos otorga al papicultor la posibilidad de contar con un capital de soporte para llevar a cabo su ejercicio económico, pero no soluciona de ninguna manera la crisis que enfrenta el sector. Por último, mediante indagación directa con las oficinas de gobierno local, se logró establecer que no existen políticas del municipio distintas a las gubernamentales mencionadas anteriormente.

A continuación se presenta la síntesis de la caracterización del sector papicultor en el municipio de Villapinzón. Para ello se exponen en primera instancia los aspectos críticos del sector papicultor, seguidos del respectivo desarrollo de la simulación en el software Vensim. El modelo matemático que soporta esta simulación comprende un total de 603 ecuaciones, que se omiten por limitaciones de espacio (para consultar los detalles del modelo se remite al lector al informe técnico realizado por Farfán y Peña [20]).

3.1. Análisis causa efecto

Para aclarar las causas del problema que se aborda en el presente artículo, en la Figura 3 se presenta el análisis causa-efecto, que parte de la pregunta: ¿Qué afecta la sostenibilidad económica del sector papicultor? Se discriminan las causas, definidas por importancia y afinidad.

3.2. Modelo causal

El problema de la inestabilidad económica del sector papicultor en Colombia, específicamente en el municipio de Villapinzón, se puede abordar analizando la dinámica de las variables que definen el eslabón de producción como principal actor de la cadena de abastecimiento de la papa. Es por ello que el diagrama causal se presenta en concordancia con el ciclo productivo característico del municipio. Se puede decir, entonces, que el modelo es abordado desde tres aspectos: el ciclo productivo, los ciclos biológicos y, por supuesto, el ciclo económico.

El modelo de causalidad del ciclo productivo que se presenta en la Figura 4 relaciona 6 componentes: acondicionamiento del terreno y preparación del suelo para siembra, siembra, desarrollo del cultivo, cosecha del tubérculo, poscosecha del tubérculo, producción y acondicionamiento de la semilla.

Por su parte, el modelo de causalidad de los ciclos biológicos que ilustra la Figura 5 presenta: ciclo biológico de la polilla guatemalteca y ciclo biológico del gusano blanco.

Finalmente, se establece el modelo de causalidad del ciclo económico cuyo contenido muestra las diferentes realimentaciones del sistema, pues es a partir de este ciclo que se llevan a cabo los procesos de decisión en el modelo, tal y como lo muestra la Figura 6.

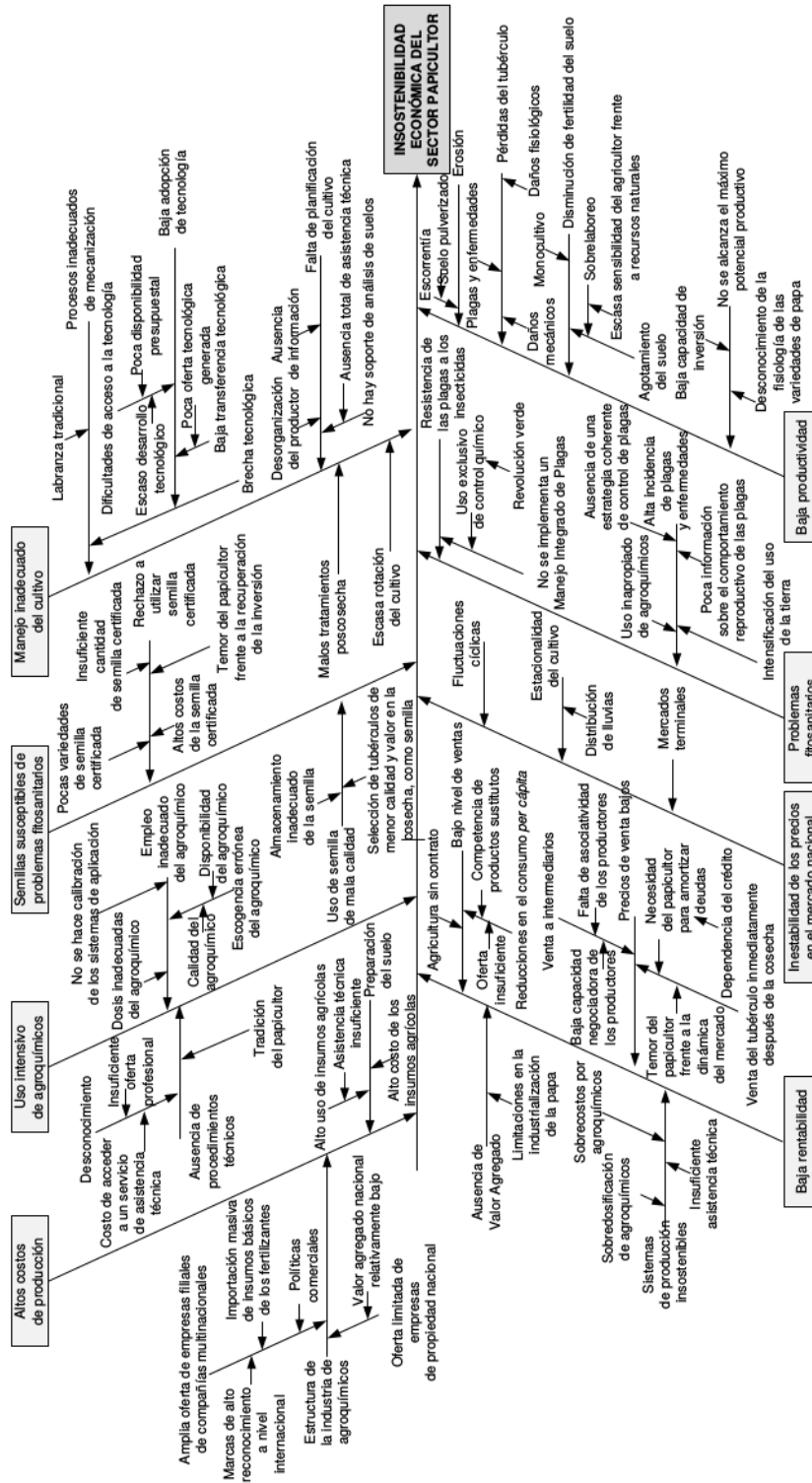


Figura 3. Diagrama causa-efecto del problema de insostenibilidad económica del sector papicultor.

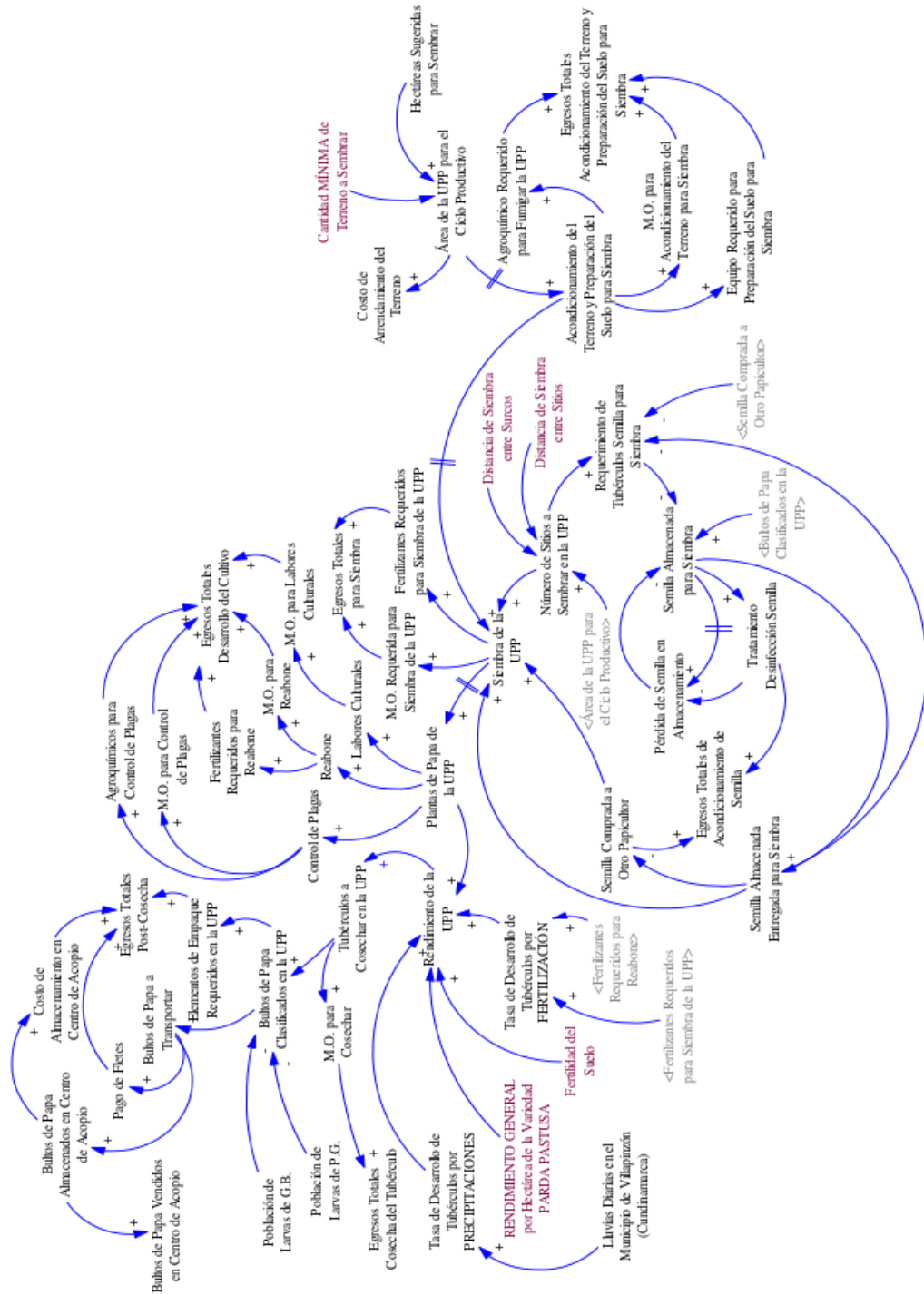


Figura 4. Modelo causal del ciclo productivo.

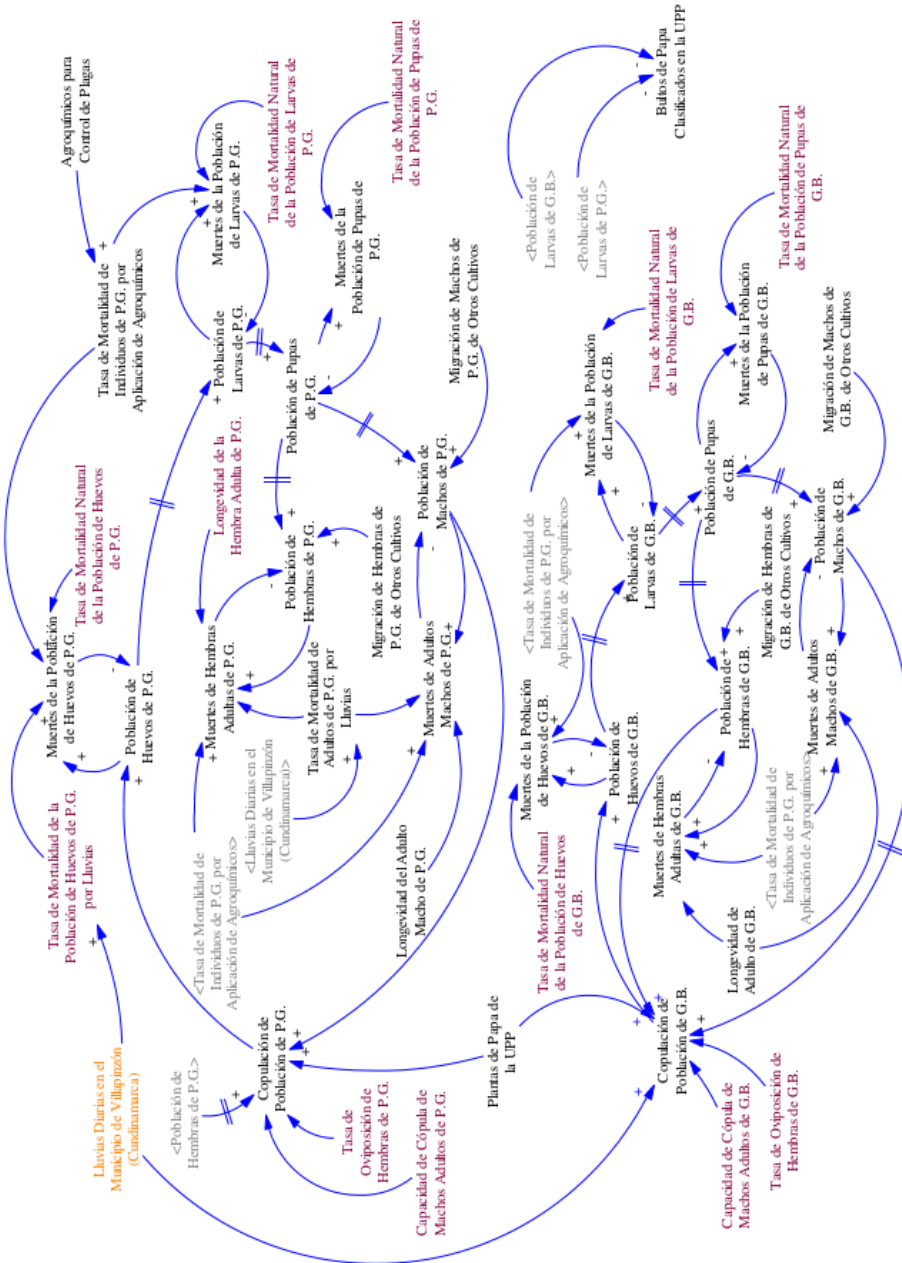


Figura 5. Modelo causal de los ciclos biológicos.

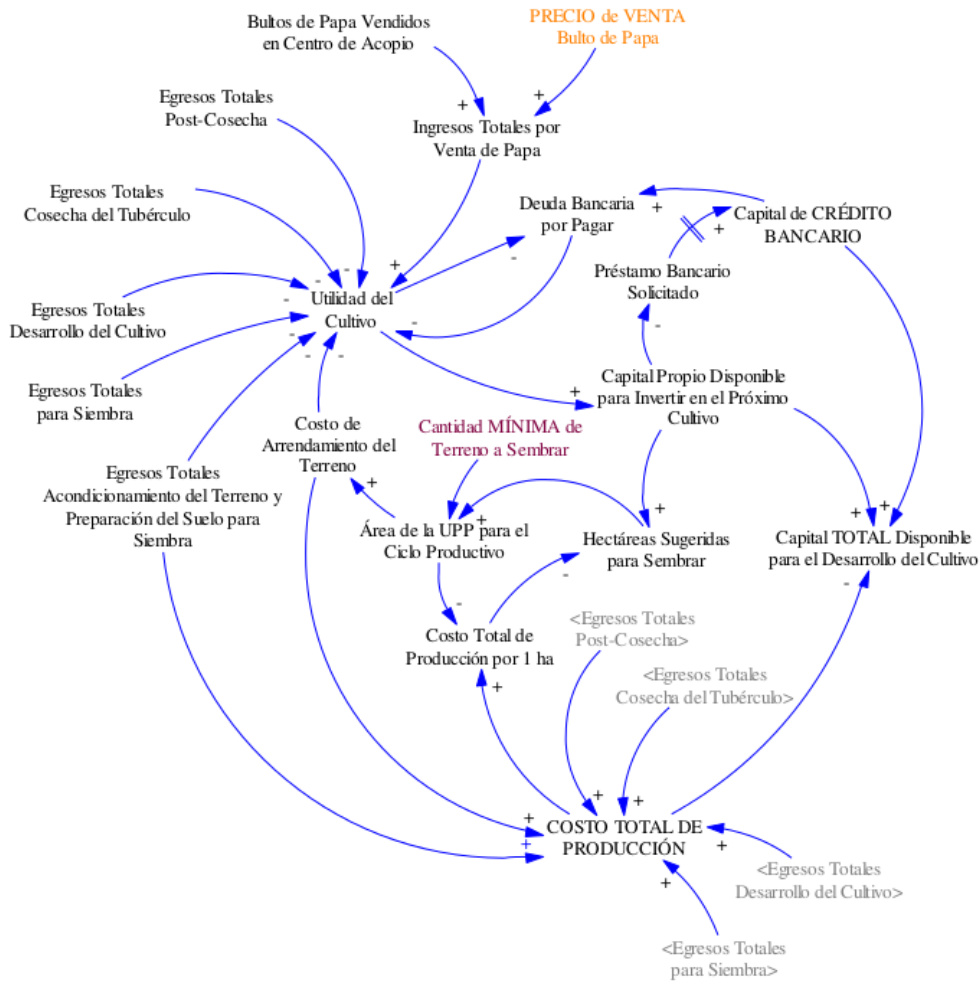


Figura 6. Modelo causal del ciclo económico.

3.3. Políticas propuestas por los autores

Al formalizar y organizar los resultados obtenidos en el proceso de investigación a través del EML, se establecen las políticas descritas en los siguientes numerales, dando respuesta a dos preguntas: qué se quiere hacer y cómo se pretende realizarlo.

3.3.1. Política de planificación del cultivo

La política de planificación del cultivo surge en respuesta a la necesidad primaria de los papicultores de recibir un pago adecuado por la venta de sus cosechas. Esta política está orientada a la programación de los ciclos productivos de acuerdo con las épocas en que se obtienen

los mejores precios de venta. Lo que pretende la política es establecer un parámetro de referencia para que el papicultor tenga conocimiento pleno de las épocas en que le conviene sembrar y con ello asegure un precio de venta que sustente los costos de producción y que además le permita generar una utilidad positiva para su ejercicio económico.

El establecimiento de esta política, aunque no regula los precios de venta del tubérculo, sí permite aprovechar la oportunidad de tomar los mejores precios del mercado que se presentan anualmente, para conveniencia del papicultor.

3.3.2. Política de implementación del MIP

La mayoría de los productores de papa manejan los insectos presentes en el cultivo mediante el uso indiscriminado de plaguicidas, con aplicaciones calendario o como reacción a la aparición de las diferentes plagas, sin tener en cuenta los umbrales de daño económico ni su distribución en los lotes. Esta situación ocasiona un aumento considerable en los costos de producción, que afecta negativamente la rentabilidad de esta actividad agrícola. Por ello se hace necesario que los productores agrícolas adopten técnicas de manejo integrado de plagas (MIP), conociendo la distribución espacial de las poblaciones de insectos, su biología y la forma como éstas son afectadas por las condiciones ambientales. El conocimiento de la distribución espacial y la pauta de colonización de las plagas en el lote de cultivo de la papa es muy importante para su manejo racional, porque permite realizar controles localizados de acuerdo con la presencia de focos de plaga. El MIP hace más eficiente y económica la aplicación de insecticidas y ejerce menor impacto ambiental.

La política de implementación del MIP está orientada a la reducción de individuos machos de las poblaciones de plagas que afectan al cultivo de la papa. Lo que pretende la política es realizar una intervención directa sobre el comportamiento reproductivo de las plagas, de modo que se evite la cópula con las hembras, con lo cual se frenaría su ciclo biológico.

3.4. Políticas propuestas por el Gobierno

En el marco de construcción de políticas de desarrollo rural, se presentan a continuación las diferentes posturas del Gobierno frente a la situación actual del agro colombiano, definidas mediante de los compromisos que surgieron en el marco del paro campesino de agosto de 2013.

Las políticas aquí referidas se han tomado a fecha del 20 de mayo de 2014, teniendo en cuenta el paquete de medidas que ya fueron adoptadas por el Ministerio de Agricultura para dar soluciones financieras a los pequeños, medianos y grandes productores del campo colombiano.

3.4.1. Política de importación directa de agroquímicos

Atendiendo la solicitud generalizada de los productores agrícolas para abaratar los costos de los agroinsumos, el ministro de Agricultura y Desarrollo, Rural Rubén Darío Lizarralde, anunció el día 20 de mayo de 2014 un nuevo paquete de medidas que permitirán romper la cadena de intermediarios y reducir los precios entre 25 % y 35 %.

Para ello, la cámara de Procultivos de la ANDI se comprometió a ceder a las asociaciones de productores o gremios los registros nacionales de plaguicidas a través de cartas de autorización, sin costo alguno. Estos registros son la condición básica para la importación de plaguicidas y son los que garantizan el cumplimiento de los estándares ambientales, la protección de la salud pública y la eficacia agronómica del insumo.

Con la implementación de esta medida, se avanza en la reducción de una larga cadena de intermediación que existe para el acceso a estos productos, se facilita el proceso de importación y, en consecuencia, se disminuyen significativamente el costo de los agroquímicos.

3.4.2. Línea de crédito rotativo para compra de insumos

El Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural a través del Banco Agrario también lanzó una novedosa línea de crédito para abaratar radicalmente los costos de los insumos agropecuarios para todos los productores del campo, que de esta forma podrán adquirir y pagar directamente al proveedor los insumos que adquieran en Colombia o en el exterior. Con esta nueva línea de crédito se busca promover la asociatividad y reducir los costos de producción por eliminación de la cadena de intermediarios.

Esta línea de crédito servirá exclusivamente para compra de insumos, beneficiará a pequeños, medianos y grandes productores, los cuales podrán acceder a cupos de crédito con vigencia de hasta dos años, y el pago se hará según el ciclo productivo, es decir, se adaptará al periodo de la cosecha y la comercialización.

El monto del crédito estará de acuerdo con la capacidad de pago y el flujo de caja. Se cobrará una tasa de interés desde DTF + 2.5, y el banco garantiza la agilidad de la aprobación de las cartas, que no superará los 14 días. De esta forma, un productor podrá obtener financiación para varios ciclos productivos utilizando el mismo cupo de crédito. Por ejemplo, un cultivador de papa podrá realizar hasta tres ciclos productivos con un sólo trámite de crédito.

Esto representa una ventaja en relación con la agilidad y disponibilidad con la cual se obtienen los recursos para iniciar o continuar con sus ciclos de producción.

4. Discusión de resultados

En este apartado se evalúan los indicadores de desempeño obtenidos como resultado de las simulaciones correspondientes a la aplicación de las políticas anteriormente descritas. La evaluación de los diferentes indicadores establecidos en el modelo de simulación se interpreta relacionando las siguientes convenciones:

Tabla 1. Relación de convenciones para la identificación de políticas evaluadas

Convención	Política
P1	Escenario actual
P2	Política de importación directa de agroquímicos
P3	Política de crédito rotativo para compra de insumos
P4	Integración de las políticas propuestas por el gobierno (P2, P3)
P5	Política de planificación del cultivo
P6	Política de implementación del MIP
P7	Integración de las políticas propuestas por los autores (P5, P6)
P8	Integración total de políticas evaluadas (P2, P3 , P5, P6)

4.1. Rendimiento en cosecha por unidad de área

Al observar la Figura 7, que relaciona los valores arrojados por la simulación de las diferentes políticas evaluadas, para el indicador “Rendimiento en cosecha por unidad de área”, se encuentra que la política P1 es la que brinda un menor rendimiento por hectárea de papa sembrada, puesto que —según los resultados— después del cuarto ciclo productivo su tendencia es decreciente a un ritmo acelerado.

Los resultados obtenidos evidencian que en el escenario actual, es decir en P1, los papicultores del municipio de Villapinzón no atienden al requerimiento específico por cantidad de cada tipo de fertilizante empleado en el cultivo. Es por ello que P1 muestra durante el primer ciclo productivo sucedido en el año 2014 un rendimiento de 18.240 kilogramos por hectárea, frente a un rendimiento que disminuye a 15.857 kilogramos para el quinto ciclo productivo, y frente a un rendimiento final de 8.421 kilogramos para el año 2020.

Por otro lado, se evidencia que las demás políticas presentan un rendimiento similar durante todos los ciclos productivos, comenzando en el primer ciclo con rendimientos de 18.240 kilogramos de tubérculo por hectárea y finalizando el último con rendimientos de 17.160 kilogramos de tubérculo aproximadamente.

4.2. Porcentaje de producto deficiente al momento de cosechar

La Figura 8 permite corroborar que por medio de las políticas P3 y P4 se pierde el 100 % de la producción en el segundo ciclo productivo evaluado. Es muy importante ver que a pesar de que la densidad de ocupación de larvas de algunas plagas presentes en las políticas P1 y P2 no consideraba un incremento tan elevado como en el caso de las políticas P3 y P4, sí logra desestabilizar el sistema y causar pérdida total de la producción en estos ciclos productivos.

A nivel general se observa además que las políticas P1, P2, P3, P4 y P5 muestran una pérdida del 56,73 % de la producción en el primer ciclo productivo, y por ello es que el modelo de simulación en cada caso queda limitado a la posterior siembra de una hectárea de terreno. Lo anterior sucede como consecuencia de que la pérdida referida sobrepasa el umbral de daño económico que puede soportar el sistema.

Se destacan las intervenciones logradas a través de las políticas P6, P7 y P8, en donde el porcentaje de producto deficiente al momento de cosechar se mantiene por debajo del 5 % durante todos los ciclos productivos.

4.3. Ingresos brutos

Gráficamente se evidencia que el comportamiento de los ingresos es muy similar al aplicar las políticas P1, P2, P3, P4, P5, P6 y P7, en donde a partir del segundo ciclo productivo se presentan ingresos brutos inferiores a los \$12.000.000, que son insuficientes para generar utilidad en cada ciclo productivo. De acuerdo con la Figura 9, sobresale de esta manera la política P8, que proporciona ingresos superiores a los \$67.000.000 durante cada uno de los diferentes ciclos productivos.

Es muy importante aclarar en este resultado la dependencia que existe entre los ingresos brutos y el área destinada para siembra en el ciclo productivo, pues existe una relación directamente proporcional que permite ver que cuanto más área sea sembrada, mayores serán los ingresos a obtener en el ejercicio. El comportamiento que muestran las políticas P1, P2, P3, P4, P5, P6 y P7 no es más que la consecuencia de que el sistema determine que el papiculator debe sembrar la cantidad mínima de terreno establecida (equivalente a una hectárea), como derivación de los resultados negativos que se llegan a obtener.

4.4. Margen bruto o utilidad bruta

En cuanto al margen bruto o utilidad bruta, se comprueba que las políticas P1, P2, P3, P4, P5 y P6 no proporcionan en la mayoría de los ciclos productivos cierta utilidad. Dicha situación se puede observar de forma más práctica en la Figura 10, donde se evidencia que las políticas propuestas por el gobierno no solucionan de forma completa el problema de insostenibilidad económica que está viviendo el sector papiculator en la actualidad.

Sin embargo, se observa que la simulación de la política P7 proporciona para la mayoría de los ciclos productivos una utilidad bruta positiva, y la simulación de la política P8 proporciona para la totalidad de los ciclos productivos utilidad bruta positiva. Como el fin último de la simulación es poder garantizar al campesino papicultor la posibilidad de obtener una utilidad positiva a partir del ejercicio de esta actividad agrícola, se considera que tan sólo las políticas P7 y P8 clasifican dentro del margen de opciones a aplicar al sector.

Vale la pena resaltar que el margen bruto o utilidad bruta sólo descuenta los costos directos de producción a los ingresos brutos, por lo cual este es aún un análisis parcial de alternativas.

4.5. Resultado operacional

De acuerdo con la Figura 11, se define que la política P8 es la única que le proporciona al sistema verdaderos ingresos en el desarrollo de la actividad agrícola objeto de estudio. Mediante del análisis de este indicador se descarta que la política P7 sea conveniente, pues a diferencia del análisis realizado sobre la utilidad bruta, aquí se contemplan tanto los costos directos como los costos indirectos del ciclo productivo, y el resultado que finalmente se obtiene no define montos favorables. Las demás políticas planteadas y simuladas en el desarrollo del proyecto, aunque contribuyen de alguna manera a disminuir las pérdidas monetarias que se reflejan en la simulación del escenario actual, a reducir el impacto de las plagas sobre los cultivos y a sobrellevar la variabilidad de los precios pagados al productor, no generan ninguna clase de utilidad a los papicultores y ponen en evidencia que es necesario el funcionamiento simultáneo de diversas políticas que apunten a diferentes aspectos para mejorar sus condiciones económicas.

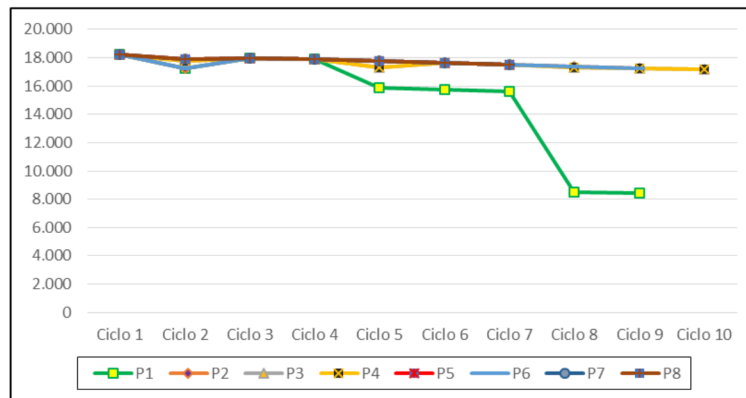


Figura 7. Comparación de rendimiento en cosecha por unidad de área.

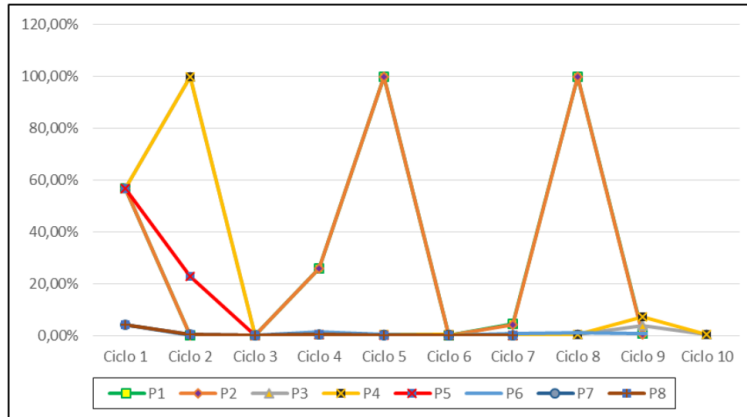


Figura 8. Comparación del porcentaje de producto deficiente al momento de cosechar.

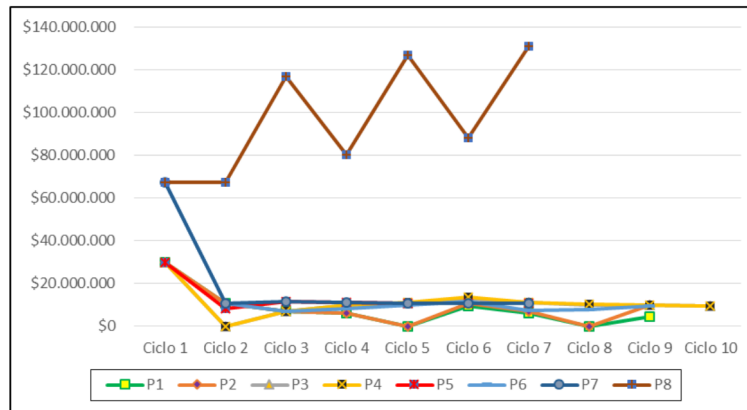


Figura 9. Comparación de ingresos brutos.

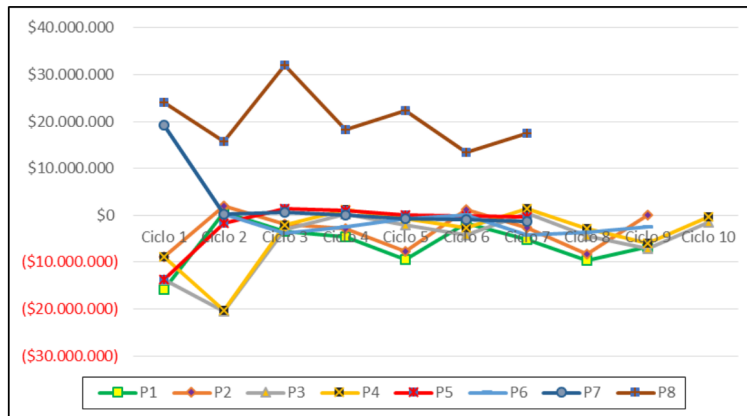


Figura 10. Comparación del margen bruto o utilidad bruta.

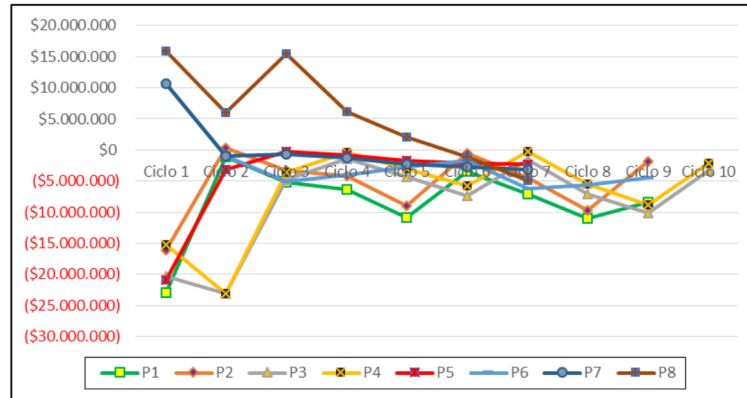


Figura 11. Comparación del resultado operacional.

5. Conclusiones

Una vez evaluados los distintos escenarios de simulación que representan la totalidad de políticas expuestas en la presente investigación, se puede establecer que existen intervenciones propias a cada política que aportan mejoras sistemáticas a la dinámica económica del sector papicultor, y que aplicadas en conjunto logran mantener las condiciones en que debería darse el ejercicio productivo de la papa. Las deducciones señalan que el eslabón de producción, al verse afectado por una gran cantidad de variables que definen el resultado económico, requiere de la intervención conjunta de una serie de políticas que controlen o mitiguen el impacto de los factores endógenos y exógenos sobre los cuales el papicultor no tiene un control absoluto. Es por ello que la propuesta de integración total de políticas evaluadas determina los mejores resultados para la ejecución del modelo de simulación objeto de estudio.

De acuerdo con los resultados obtenidos a partir de la simulación de dicho escenario, se infiere que la implementación de todo el conjunto de políticas propuestas arroja como resultado la realización de siete ciclos productivos durante los siete años de estudio. Esto quiere decir que por año se está llevando a cabo un cultivo de papa.

Es necesario destacar el rol que juega la implementación del MIP en la definición del escenario factible, pues como se observa en los datos obtenidos, la población de larvas de gusano blanco —causante de las pérdidas totales en dos de los ciclos productivos del escenario actual— se mantiene en un rango mínimo de daño, y ésta es una de las condiciones que permite mejorar el desempeño del sistema.

Según los resultados, es necesario destacar que a la política de planificación del cultivo se atribuye el ingreso por venta de papa tamaño primera, sobre un precio de venta superior al precio mínimo aceptable, referido como parámetro de aprobación del modelo.

Con la implementación de la política de crédito rotativo se visualiza además que el capital con el que cuenta el papicultor en cada ciclo productivo es suficiente para efectuar el pago inmediato de servicios de arrendamiento de terreno, mano de obra, alquiler de maquinaria,

transporte y almacenamiento, con lo cual se asegura que no exista endeudamiento alguno con proveedores de estos servicios.

En materia de políticas se destaca el impacto de la política de planificación del cultivo, cuya ejecución permite controlar la influencia de la variable exógena “Precio de venta del tubérculo”, de la cual el campesino papicultor es totalmente dependiente en la actualidad.

Efectivamente, la regulación de algunos costos de producción —como los referentes a insumos agrícolas de origen importado— contribuye al mejoramiento de las condiciones económicas de los papicultores y al logro de mayores niveles de equidad social, al reducir de manera considerable la inversión total en cada ciclo productivo y por ende al mejorar la utilidad percibida en cada ejercicio económico. Pese a que la regulación de los costos de producción no constituye en sí misma la solución total al problema de insostenibilidad económica que representa al sector en la actualidad, como se ha podido constatar anteriormente, sí corresponde a una de las alternativas de solución necesarias para intervenir el sector ante la poca efectividad de las políticas públicas en la actualidad.

Es de destacar que la aplicación de las políticas propuestas por los autores no requiere de una inversión económica representativa. Estas políticas constituyen una oportunidad para que los gremios en cabeza del sector papicultor puedan generar soluciones sin depender exclusivamente de los presupuestos de inversión asignados por el gobierno.

References

- [1] J. J. Perfetti, Á. Balcázar, A. Hernández, and J. Leibovich, *Políticas para el desarrollo de la agricultura en Colombia*. Bogotá, Colombia: Fedesarrollo, 2013.
- [2] J. A. Ocampo, “Observación inédita,” E. ESPECTADOR, Ed., ed. Bogotá D.C., 2013, p. 10.
- [3] S. Kalmanovitz and E. López, *La agricultura colombiana en el siglo XX*. Bogotá D.C.: Fondo de Cultura Económica, 2006.
- [4] C. González and C. F. Jaramillo, *Competitividad sin pobreza: “Estudios para el desarrollo del campo en Colombia”*. Colombia: FONADE Editores, 1993.
- [5] E. Cruz Rodríguez, *La protesta social en el primer gobierno de Juan Manuel Santos*. Jurídicas CUC: Universidad Nacional de Colombia, 2014.
- [6] IICA, *Acuerdo marco de competitividad de la cadena agroalimentaria de la papa*. Colombia: Tercer Mundo Editores, 2000.
- [7] Archivo, “El paro ya hace sentir sus consecuencias,” in *EL ESPECTADOR*, ed, 2013.
- [8] Archivo, “Aquí si está pasando algo presidente,” in *EL ESPECTADOR*, ed. Bogotá D.C., 2013.
- [9] Archivo. (2013) La rebelión de las ruanas. *SEMANA*.
- [10] C. E. Ñustez López, *Varietades colombianas de papa*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- [11] A. d. V. Cundinamarca. *villapinzon-cundinamarca.gov.co*.
- [12] G. A. Méndez Giraldo and L. Álvarez Pomar, *Diseño de un Prototipo de diagnóstico para la pequeña y mediana empresa, PYME: enfoque mediante sistemas dinámicos*. Bogotá D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2004.
- [13] E. López Díaz-Delgado and S. Martínez Vicente, *Iniciación a la simulación dinámica: aplicaciones a sistemas económicos y empresariales*. España: Editorial Ariel, 2000.

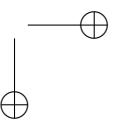
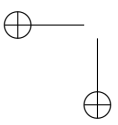
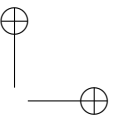
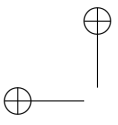
- [14] H. Camacho, L. Cámara, R. Cascante, and H. Sainz, *El enfoque de marco lógico: 10 casos prácticos*. Madrid, España: Fundación CIDEAL, 2001.
- [15] J. Parvizian and A. Karimi-Tabar. (2002), *State policies on self-sufficiency in agricultural section of Iran*. *International Conference of the System Dynamics Society*.
- [16] M. H. Moosavi Haghghi. (2009), *Combination of Econometric Methods and System Dynamics Approach to Improve the Iranian Agricultural Policies*. *International Conference of the System Dynamics Society*.
- [17] G. Ozolins, J. Roberts K., and R. Sile. (2007), *Agricultural Production and Income Dynamics in Latvia*. *International Conference of the System Dynamics Society*.
- [18] A. Acuña and J. Riojas. (2011), *Public Policies Assessment to Improve the Small Agricultural Producer Profitability*. *International Conference of the System Dynamics Society*.
- [19] L. Andrade, S. Ríos, and G. Torres. (2012), *Análisis prospectivo de la estructura agraria en Chile basado en un modelo de dinámica de sistemas*. *Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas*.
- [20] N. M. Farfan y G. Peña, “Evaluación del impacto de políticas de protección al sector papicutor en Colombia a través de la identificación de la dinámica actual del sector: caso villapinzón, Cundinamarca”. Informe Final de Trabajo de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2014.

Nidya Milena Farfán Pinzón

Nació en la ciudad de Zipaquirá (Cundinamarca), Colombia. Ingeniera Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, de Bogotá, Colombia. Actualmente se desempeña como Analista Comercial en el grupo Enel.
e-mail: nfarfan@endesacolombia.com.co

Geimar Peña Ardila

Nació en la ciudad de Bogotá D.C., Colombia. Ingeniero Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, de Bogotá, Colombia. Actualmente se desempeña como Analista de Auditoria en el grupo Enel.
e-mail: gpena@endesacolombia.com.co





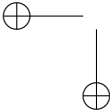
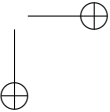
Instrucciones para los Autores

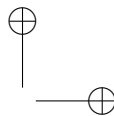
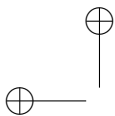
Introducción

La revista INGENIERÍA es una publicación periódica-científica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Tiene como propósito principal divulgar los resultados de investigación de la comunidad académica de la Facultad del país y del exterior. Por tal motivo, los artículos que se publican en la revista deben tener relación con el trabajo en ingeniería, en general, y con las derivaciones de la ingeniería que se desarrollan en la Universidad, en particular. Su frecuencia es semestral (dos ediciones por año). Todo artículo es evaluado de manera doble-ciega por pares revisores antes de ser calificado como candidato para publicar. El Comité Editorial, tomando en cuenta los conceptos emitidos por los evaluadores y el cumplimiento de las políticas editoriales de la Revista, decide la publicación del artículo en una edición futura. Todos los artículos presentados a la revista INGENIERÍA deben ser inéditos. No se publicarán artículos que hayan sido anteriormente publicados o que hubieren sido sometidos por el autor o los autores a otros medios de difusión nacional o internacional para su publicación.

Clasificación de los artículos

La clasificación de los artículos dentro de la revista INGENIERÍA se hace de acuerdo con la categorización sugerida por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología y e Innovación COLCIENCIAS, para revistas científicas y tecnológicas indexadas. Los autores deben definir y comunicar en la carta de presentación y en la plantilla del artículo la categoría del mismo. Las categorías de los artículos están identificadas por el número de orden de la siguiente lista y sus características son:

1. Artículo de investigación científica y tecnológica: Documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.
 2. Artículo de reflexión: Documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico, recurriendo a fuentes originales.
 3. Artículo de revisión: Documento resultado de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica de por lo menos 50 referencias.
 4. Artículo cortó: Documento breve que presenta resultados originales preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica, que por lo general requieren de una pronta difusión.
 5. Reporte de caso: Documento que presenta los resultados de un estudio sobre una situación particular con el fin de dar a conocer las experiencias técnicas y metodológicas consideradas en un caso específico. Incluye una revisión sistemática comentada de la literatura sobre casos análogos.
- 
- 



6. Revisión de tema: Documento resultado de la revisión crítica de la literatura sobre un tema en particular.

La Revista INGENIERÍA dará prelación a aquellos documentos que se clasificarían en los artículos tipo 1, 2 ó 3.

Procedimiento para el envío de artículos para publicación

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

- Carta de presentación y originalidad del artículo: El formato de la presente carta puede descargarse en el siguiente enlace:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/pages/view/Formatos>.
La finalidad de la carta es certificar que el artículo es inédito, que no está sometido a otra publicación y que se aceptan las normas de publicación de la Revista.
- El artículo en formato digital utilizando la plantilla y las normas de presentación que se pueden consultar en el siguiente enlace (instrucciones a los autores):
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/pages/view/Instructivos>.
Los autores relacionarán en el correo de postulación del artículo dos posibles evaluadores que cumplan las siguientes condiciones:
 - Debe tener al menos título de maestría
 - Pertenecer a una institución diferente a la de los autores
 - Haber realizado publicaciones en los últimos tres años

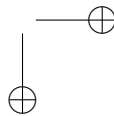
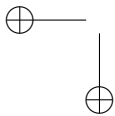
Nota: Enviar los datos de los contactos de los posibles evaluadores (nombre completo, institución y correo electrónico). Esta información también puede ser enviada a la siguiente dirección electrónica revista_ing@udistrital.edu.co

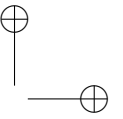
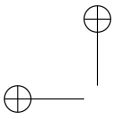
- En caso de ser aceptado, los autores del artículo se comprometen a diligenciar el formato de cesión de derechos para publicación. Se puede descargar en el siguiente enlace:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/pages/view/Formatos>

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

Aspectos a tener en cuenta

- Se considera un artículo largo cuando tiene más de diez (10) páginas con este formato. Por consiguiente se recomienda tener como límite diez (10) páginas para la elaboración de un artículo. El Comité Editorial podría solicitar a los autores reducir el tamaño del artículo cuando lo considere demasiado largo.
- Los resultados de las evaluaciones de los pares árbitros y las modificaciones que requiera el Comité Editorial serán notificados a los autores a través de la plataforma OJS y al correo electrónico del autor de correspondencia. Los autores deberán enviar nuevamente los artículos con las modificaciones sugeridas sin nombres y sin biografías. En general, este intercambio de sugerencias y modificaciones puede llegar a presentarse una o dos veces después de presentar el artículo.





- Cuando un artículo no cumple con las condiciones definidas para la revista, el Comité Editorial podría decidir no publicarlo. En este caso, el autor o los autores serán notificados de la decisión.

DERECHOS DE AUTOR

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

