

## EDITORIAL

CÉSAR AUGUSTO GARCÍA UBAQUE  
DIRECTOR

## INVESTIGACIÓN

### Efecto de la utilización de harina de *Lens culinaris* como extensor en las características físicas y aceptabilidad de una salchicha

Effect of the use of *Lens culinaris* flour as an extender in the physical characteristics and acceptability of a sausage  
JOSÉ DAVID TORRES GONZÁLEZ, KEVIN JOSÉ GONZÁLEZ MORELO, DIOFANOR ACEVEDO CORREA, JOSÉ DEL CARMEN JAIMES MORALES

### Modelación y simulación computacional del proceso de evaporación osmótica

Modeling and computational simulation of the osmotic evaporation process  
FREDDY FORERO LONGAS, ADRIANA PATRICIA PULIDO DÍAZ, SERGIO ANDRÉS CABRERA NAVARRO

### Análisis comparativo de la carbonización de cuesco de palma de aceite en reactores de lecho fijo

Comparative analysis of the carbonization of oil palm kernel shells in fixed bed reactors  
DAVID FRANCISCO FLÓREZ RAMOS, JIMMY BARCO BURGOS, SONIA LUCÍA RINCÓN PRAT

### Conciliación de inventarios *top-down* y *bottom-up* de emisiones de fuentes móviles en Bogotá, Colombia

Conciliation of *top-down* and *bottom-up* inventories to estimate mobile source emissions in Bogota, Colombia  
LUIS GABRIEL CARMONA APARICIO, MAURICIO ALEXANDER RINCÓN PÉREZ, ANDRÉS MAURICIO CASTILLO ROBLES, BORIS RENÉ GALVIS REMOLINA, HUGO ENRIQUE SÁENZ PULIDO, RODRIGO ALBERTO MANRIQUE FORERO, JORGE EDUARDO PACHÓN QUINCHE

### Stiffness of a granular base under optimum and saturated water contents

Rigidez de una base granular bajo humedad óptima y saturada  
FAUSTO ANDRÉS MOLINA GÓMEZ, JAVIER FERNANDO CAMACHO-TAUTA, OSCAR JAVIER REYES-ORTIZ

### A comparative study of target detection algorithms in hyperspectral imagery applied to agricultural crops in Colombia

Un estudio comparativo de algoritmos de detección de objetivos en imágenes hiperespectrales aplicados a cultivos agrícolas en Colombia  
ARIOLFO CAMACHO VELASCO, CÉSAR AUGUSTO VARGAS GARCÍA, HENRY ARGUELLO FUENTES, ARIOLFO CAMACHO VELASCO, CÉSAR AUGUSTO VARGAS GARCÍA, HENRY ARGUELLO FUENTES

11 **Análisis de vulnerabilidad de sistemas de potencia incluyendo incertidumbre en las variables con lógica difusa tipo 2** 100  
Analysis of power system vulnerability considering uncertainty in variables using fuzzy logic type 2  
JULIÁN ALEXÁNDER MELO RODRÍGUEZ, CAMILO ANDRÉS CORTÉS GUERRERO

## ESTUDIO DE CASO

15 **Sistema de control domótico de bajo costo: un respaldo a la generación ecológica de energía eléctrica en Colombia** 120  
Low cost home automation system: a support to the ecological electricity generation in Colombia  
ELMER ALEJANDRO PARADA PRIETO, MARIO JOAQUÍN ILLERA BUSTOS SERGIO BASILIO SEPÚLVEDA MORA, DINAEL GUEVARA IBARRA, BYRON MEDINA DELGADO

## REVISIÓN DE TEMA

**Técnicas inteligentes en la asignación de espectro dinámica para redes inalámbricas cognitivas** 133  
Smart techniques in the dynamic spectrum allocation for cognitive wireless networks  
CAMILA SALGADO, HANS MÁRQUEZ, VÍCTOR GÓMEZ

**Generación de mapas de ruido (industrial) desde sistemas de información geográfica. Un acercamiento desde la literatura** 152  
Generation of maps of noise (industrial) from geographic information systems. An approach from the literature  
JAIRO ACERO CALDERÓN, MARCELA JAIMES BECERRA, GUSTAVO ANDRÉS ROMERO DUQUE

**Instrucciones para los autores** 152

**Instructions for authors** 174

**SUSCRIPCIÓN** 183

**SIGN UP** 184

Tecnura

p-ISSN: 0123-921X  
Volumen 20 - Número 49  
Julio-Septiembre 2016

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Facultad Tecnológica



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Revista Tecnura • Volumen 20 – Número 49 • Julio – Septiembre de 2016  
p-ISSN: 0123-921X • e-ISSN: 2248-7638 • Bogotá D.C. Colombia

# Tecnura

Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Facultad Tecnológica

Modelación y simulación computacional del proceso de evaporación osmótica

A comparative study of target detection algorithms in hyperspectral imagery applied to agricultural crops in Colombia

Análisis de vulnerabilidad de sistemas de potencia incluyendo incertidumbre en las variables con lógica difusa tipo 2

Técnicas inteligentes en la asignación de espectro dinámica para redes inalámbricas cognitivas

ISSN 0123-921X



9 770123 921001

# **Tecnura**

Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Facultad Tecnológica

Vol. 20 No. 49

Julio - Septiembre de 2016

p-ISSN: 0123-921X

e-ISSN: 2248-7638



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

**Revista *TECNURA***  
**Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento**  
**Universidad Distrital Francisco José de Caldas**  
**Facultad Tecnológica**

p-ISSN: 0123-921X - e-ISSN: 2248-7638

**EDITOR**

Ph.D. Ing. César Augusto García Ubaque  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

**COMITÉ EDITORIAL**

Ph.D. Ing. Electo Eduardo Silva  
Universidad Federal de Itajuba, Brasil

Ph.D. Ing. Manuel Karim Sapag  
Universidad Nacional de San Luis, Argentina

Ph.D. Ing. José Antonio Velásquez Costa  
Universidad Ricardo Palma, Perú

Ph.D. Ing. Johan José Sánchez Mora  
Universidad Simón Bolívar, Venezuela

Ph.D. Ing. Mario Ricardo Arbulu Saavedra  
Universidad de La Sabana, Colombia

Ph.D. Ing. Edgar Francisco Vargas  
Universidad de Los Andes, Colombia

Ph.D. Ing. Jorge Mario Gómez  
Universidad de Los Andes, Colombia

Ph.D. Ing. Ingrid Patricia Páez Parra  
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Ph.D. Ing. César Augusto García Ubaque  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D(c). Ing. César Augusto Hernández Suárez  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

**COMITÉ CIENTÍFICO**

Ph.D. Ing. Enrique Rodríguez de la Colina  
Universidad Autónoma Metropolitana, México

Ph.D. Ing. Alfonso Prieto Guerrero  
Universidad Autónoma Metropolitana, México

Ph.D. Ing. Fernando Martirena  
Universidad Central de Las Villas, Cuba

Ph.D. Ing. Juan Antonio Conesa  
Universidad de Alicante, España

Ph.D. Ing. Steven M. LaValle  
University of Illinois, Estados Unidos

Ph.D. Ing. Graciela Perera Olivares  
Youngstown University, Estados Unidos

Ph.D. Ing. Clara Inés Buritica  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

**EVALUADORES**

Ph.D. Ana Cecilia Villa Parra  
Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

Ph.D. Andrés Ramiro Delgadillo Vega  
Universidad De Castilla - La Mancha, España

Ph.D. Carlos Andrés Ramos Paja  
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Ph.D. Dayana Milena Agudelo Castañeda  
Universidad de la Costa, Colombia

Ph.D. Francisco Santamaría Piedrahita  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D. Hector Javier Fuentes Lopez  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D. Hely Noé Torrealba  
Fundación CIEPE, Venezuela

Ph.D. Jorge Gomez Rojas  
Universidad del Magdalena, Colombia

Ph.D. Lenin Alexander Bulla Cruz  
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Ph.D. Luis Guasch Pesquer  
Universidad Rovira i Virgili, España

Ph.D. Piedad Margarita Montero Castillo  
Universidad de Cartagena, Colombia

Ph.D. Ramón Giraldo Henao  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D. Roger Aguedo de Hombre Morgado  
Instituto de Investigaciones para la Industria Alimentaria, Cuba

M.Sc. Luis Leonardo Camargo Ariza  
Universidad del Magdalena, Colombia  
M.Sc. Luz Helena Camargo Casallas  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

M.Sc. Kai Whiting  
Universidade de Lisboa, Inglaterra

Esp. Giovanni Sánchez Prieto  
Universidad de San Buenaventura, Colombia

**ASISTENTES DE LA REVISTA TECNURA**

M.Sc. Hans Raúl Márquez Ramos  
M.Sc. Diego Armando Giral Ramírez

**COORDINACIÓN EDITORIAL**

Diony Constanza Pulido Ortega  
Centro de investigaciones y desarrollo tecnológico-CIDC  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

# Tecnura

Vol. 20 No. 49

Julio - Septiembre de 2016

## REVISTA *TECNURA*

La revista *Tecnura* es una publicación institucional de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de carácter científico-tecnológico, arbitrada mediante un proceso de revisión entre pares de doble ciego. La periodicidad de la conformación de sus comités Científico y Editorial está sujeta a la publicación de artículos en revistas indexadas internacionalmente por parte de sus respectivos miembros.

## PERIODICIDAD

Es una publicación de carácter científico-tecnológico con periodicidad trimestral, que se publica los meses de enero, abril, julio y octubre. Su primer número apareció en el segundo semestre del año 1997 y hasta la fecha ha mantenido su regularidad.

## COBERTURA TEMÁTICA

Las áreas temáticas de interés de la revista *Tecnura* están enfocadas a todos los campos de la ingeniería, como la electrónica, telecomunicaciones, electricidad, sistemas, industrial, mecánica, catastral, civil, ambiental, entre otras. Sin embargo, no se restringe únicamente a estas, también tienen cabida los temas de educación y salud, siempre y cuando estén relacionados con la ingeniería. La revista publicará únicamente artículos de investigación científica y tecnológica, de reflexión y de revisión.

## MISIÓN

La revista *Tecnura* tiene como misión divulgar resultados de proyectos de investigación realizados en el área de la ingeniería, a través de la publicación de artículos originales e inéditos, realizados por académicos y profesionales pertenecientes a instituciones nacionales o extranjeras del orden público o privado.

## PÚBLICO OBJETIVO

La revista *Tecnura* está dirigida a docentes, investigadores, estudiantes y profesionales interesados en la actualización permanente de sus conocimientos y el seguimiento de los procesos de investigación científico-tecnológica, en el campo de la ingeniería.

## INDEXACIÓN

*Tecnura* es una publicación de carácter académico indexada en el Índice Bibliográfico Nacional Publindex (IBN) de Colciencias (Colombia) en la categoría A2, en los índices regionales Scielo Colombia (Colombia) y Redalyc (México); además de las siguientes bases bibliográficas: INSPEC del Institution of Engineering and Technology (Inglaterra), Fuente Académica Premier de EBSCO (Estados Unidos), CABI (Inglaterra), IndexCorpernicus (Polonia), Informe Académico de Gale Cengage Learning (México), Periódica de la Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (España) y Dialnet de la Universidad de la Rioja (España); también hace parte de los siguientes directorios: Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal Latindex (México); Índice Bibliográfico Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (España), DOAJ (Suecia), Ulrich de Proquest (Estados Unidos).

## FORMA DE ADQUISICIÓN

La revista *Tecnura* se puede adquirir a través de compra, canje o suscripción.

## SUSCRIPCIÓN

El precio unitario de la revista es de 10000 pesos (el precio no incluye el valor del envío). La suscripción anual tiene un costo de 45000 pesos para Colombia, 40 USD para América Latina y el Caribe, 60 USD para otras regiones (el precio incluye el valor del envío). Para suscribirse utilice el formato ubicado al final de la revista.

## REPRODUCCIÓN

Se autoriza la reproducción total o parcial de los artículos de esta revista para uso académico o interno de las instituciones citando la fuente y el autor. Las ideas expresadas se publican bajo la exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento del Comité Editorial de la revista.

## DIRECCIÓN POSTAL

Enviar a Ing. Cesar Augusto García Ubaque,  
Ph.D. Director y Editor Revista *Tecnura*  
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305.  
Facultad Tecnológica  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Transversal 70B No. 73A-35 sur  
Teléfono: 571-3238400, extensión: 5003  
Celular: 57-3153614852  
Bogotá, D.C., Colombia  
Correo electrónico:  
[tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co](mailto:tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co), [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com)  
Tecnura en internet:  
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

## DISEÑO ORIGINAL

Julián Hernández-Taller de Diseño

## CORRECCIÓN DE ESTILO PARA ESPAÑOL

Fernando Carretero Padilla

## CORRECCIÓN DE ESTILO PARA INGLES

Edward Valderrama Briñas

## DIAGRAMACIÓN Y DISEÑO DE CUBIERTA

Julián Hernández-Taller de Diseño

## IMPRESIÓN

Imprenta Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Formato: 21.5 x 28 cm  
Papel: Bond 75g  
Fuente: Optima LT Std  
Tiraje: 400 ejemplares



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

**Tecnura**  
**Technology And Culture, Affirming Knowledge**  
**District University Francisco José De Caldas**  
**Faculty Of Technology**

**EDITOR**

Ph.D. Ing. Cesar Augusto García Ubaque  
District Francisco José de Caldas University, Colombia

**EDITORIAL COMMITTEE**

Ph.D. Ing. Electo Eduardo Silva  
Universidad Federal de Itajuba, Brasil

Ph.D. Ing. Manuel Karim Sapag  
Universidad Nacional de San Luis, Argentina

Ph.D. Ing. José Antonio Velásquez Costa  
Universidad Ricardo Palma, Perú

Ph.D. Ing. Johan José Sánchez Mora  
Universidad Simón Bolívar, Venezuela

Ph.D. Ing. Mario Ricardo Arbulu Saavedra  
Universidad de la Sabana, Colombia

Ph.D. Ing. Edgar Francisco Vargas  
Universidad de los Andes, Colombia

Ph.D. Ing. Jorge Mario Gomez  
Universidad de los Andes, Colombia

Ph.D. Ing. Ingrid Patricia Páez Parra  
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Ph.D. Ing. Cesar Augusto García Ubaque  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D (c). Ing. Cesar Augusto Hernández Suárez  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

**SCIENTIFIC COMMITTEE**

Ph.D. Ing. Enrique Rodríguez de la Colina  
Universidad Autónoma Metropolitana, México

Ph.D. Ing. Alfonso Prieto Guerrero  
Universidad Autónoma Metropolitana, México

Ph.D. Ing. Fernando Martirena  
Universidad Central de Las Villas, Cuba

Ph.D. Ing. Juan Antonio Conesa  
Universidad de Alicante, España

Ph.D. Ing. Steven M. LaValle  
University of Illinois, Estados Unidos

Ph.D. Ing. Graciela Perera Olivares  
Youngstown University, Estados Unidos

Ph.D. Ing. Clara Inés Buritica  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

**EVALUATORS**

Ph.D. Ana Cecilia Villa Parra  
Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

Ph.D. Andrés Ramiro Delgadillo Vega  
Universidad De Castilla - La Mancha, España

Ph.D. Carlos Andrés Ramos Paja  
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Ph.D. Dayana Milena Agudelo Castañeda  
Universidad de la Costa, Colombia

Ph.D. Francisco Santamaría Piedrahita  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D. Hector Javier Fuentes Lopez  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D. Hely Noé Torrealba  
Fundación CIEPE, Venezuela

Ph.D. Jorge Gomez Rojas  
Universidad del Magdalena, Colombia

Ph.D. Lenin Alexander Bulla Cruz  
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Ph.D. Luis Guasch Pesquer  
Universidad Rovira i Virgili, España

Ph.D. Piedad Margarita Montero Castillo  
Universidad de Cartagena, Colombia

Ph.D. Ramón Giraldo Henao  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D. Roger Aguedo de Hombre Morgado  
Instituto de Investigaciones para la Industria Alimentaria, Cuba

M.Sc. Luis Leonardo Camargo Ariza  
Universidad del Magdalena, Colombia  
M.Sc. Luz Helena Camargo Casallas  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

M.Sc. Kai Whiting  
Universidade de Lisboa, Inglaterra

Esp. Giovanni Sánchez Prieto  
Universidad de San Buenaventura, Colombia

**TECNURA JOURNAL ASSISTANTS**

M.Sc. Hans Raúl Márquez Ramos  
M.Sc. Diego Armando Giral Ramírez

**EDITORIAL COORDINATION**

Diony Constanza Pulido Ortega  
Centro de investigaciones y desarrollo tecnológico - CIDC  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

# Tecnura

Vol 20 No. 49

July - September de 2016

## TECNURA JOURNAL

Tecnura Journal is an institutional scientific-technological publication from the Faculty of Technology at District University Francisco José de Caldas, arbitrated by means of a double-blinded peer review process. The periodicity for its Scientific and Editorial committees line-up is subject to the publication of articles in internationally indexed magazines by its own members.

## PERIODICITY

Tecnura journal is a scientific-technological publication with quarterly periodicity, published in January, April, July and October. Its first edition appeared in the second term, 1997 and its editions have normally continued from that year and on.

## THEMATIC COVERAGE

The thematic areas of interest at Tecnura journal are focused on all fields of engineering such as electronical, telecommunications, electrical, computer, industrial, mechanical, cadastral, civil, environmental, etc. However, it is not restricted to those, there is also room for education and health topics as well, as long as they are related to engineering. The journal will only publish scientific and technological research, reflection and review articles.

## MISSION

Tecnura journal is aimed at publishing research project results carried out in the field of engineering, through the publishing of original and unpublished articles written by academics and professionals from national or international public or private institutions.

## TARGET AUDIENCE

Tecnura journal is directed to professors, researchers, students and professionals interested in permanent update of their knowledge and the monitoring of the scientific-technological research processes in the field of engineering.

## INDEXING

Tecnura is an academic publication indexed in the Índice Bibliográfico Nacional Publindex (IBN) from Colciencias (Colombia) in the category A2, in the Regional Index Scielo Colombia (Colombia) and Redalyc (México); as well as the following bibliographic databases: INSPEC of the Institution of Engineering and Technology (England), Fuente Académica Premier of EBSCO (United States), CABI (England), Index Copernicus (Poland), Informe Académico of Gale Cengage Learning (México), Periódica of the Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (Spain) and Dialnet of the Universidad de la Rioja (Spain); it is also part of the following directories: Online Regional Information System for Scientific journals from Latin America, Caribbean, Spain and Portugal Latindex (México), bibliographic index Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (Spain), DOAJ (Sweden), Ulrich of Proquest (United States).

## FORM OF ACQUISITION

Tecnura journal is available through purchase, exchange or subscription.

## SIGN UP

The unit price of the journal is 6 USD (the price does not include shipping). The annual sign up is 28 USD for Colombia; 40 USD in Latin America and the Caribbean; 60 USD in other regions (the price includes shipping). To sign up, use the format located at the end of the journal.

## REPRODUCTION

The total or partial reproduction of the articles of this journal is authorized for academic or internal purpose of the institutions citing the source and the author. Ideas expressed are published under exclusive responsibility of the authors and they do not necessarily reflect the thought of the editorial committee of the journal.

## POSTAL ADDRESS

Send to Engr. Cesar Augusto García Ubaque, Ph.D. Director and Editor Revista Tecnura  
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305.  
Faculty of Technology  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Transversal 70B No. 73A - 35 sur  
Telephone Number: 571 - 3238400, extension: 5003  
Cell phone Number: 57 - 3153614852  
Bogotá D.C., Colombia  
E-mail:  
[tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co](mailto:tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co), [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com)  
Tecnura on internet: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

## ORIGINAL DESIGN

Julián Hernández - Taller de Diseño

## STYLE CORRECTION IN SPANISH

Fernando Carretero Padilla

## STYLE CORRECTION IN ENGLISH

Edward Valderrama Briñas

## LAYOUT AND TITLE PAGE DISEGN

Julián Hernández - Taller de Diseño

## PRINTED BY

Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas Press  
Format: 21.5 x 28 cm  
Paper: Bond 75g  
Font: Optima LT Std  
Printing: 400 copies

## DECLARACIÓN DE ÉTICA Y BUENAS PRÁCTICAS

El comité editorial de la revista *Tecnura* está comprometido con altos estándares de ética y buenas prácticas en la difusión y transferencia del conocimiento, para garantizar el rigor y la calidad científica. Es por ello que ha adoptado como referencia el Código de Conducta que, para editores de revistas científicas, ha establecido el Comité de Ética de Publicaciones (COPE: Committee on Publication Ethics) dentro de los cuales se destaca:

### Obligaciones y responsabilidades generales del equipo editorial

En su calidad de máximos responsables de la revista, el comité y el equipo editorial de *Tecnura* se comprometen a:

- Aunar esfuerzos para satisfacer las necesidades de los lectores y autores.
- Propender por el mejoramiento continuo de la revista.
- Asegurar la calidad del material que se publica.
- Velar por la libertad de expresión.
- Mantener la integridad académica de su contenido.
- Impedir que intereses comerciales comprometan los criterios intelectuales.
- Publicar correcciones, aclaraciones, retractaciones y disculpas cuando sea necesario.

### Relaciones con los lectores

Los lectores estarán informados acerca de quién ha financiado la investigación y sobre su papel en la investigación.

### Relaciones con los autores

*Tecnura* se compromete a asegurar la calidad del material que publica, informando sobre los objetivos y normas de la revista. Las decisiones de los editores para aceptar o rechazar un documento para su publicación se basan únicamente en la relevancia del trabajo, su originalidad y la pertinencia del estudio con relación a la línea editorial de la revista.

La revista incluye una descripción de los procesos seguidos en la evaluación por pares de cada trabajo recibido. Cuenta con una guía de autores en la que se presenta esta información. Dicha guía se actualiza regularmente y contiene un vínculo a la presente declaración ética. Se reconoce el derecho de los autores a apelar las decisiones editoriales. Los editores no modificarán su decisión en la aceptación de envíos, a menos que se detecten irregularidades o situaciones extraordinarias. Cualquier cambio en los miembros del equipo editorial no afectará las decisiones ya tomadas, salvo casos excepcionales en los que confluyan graves circunstancias.

### Relaciones con los evaluadores

*Tecnura* pone a disposición de los evaluadores una guía acerca de lo que se espera de ellos. La identidad de los evaluadores se encuentra en todo momento protegida, garantizando su anonimato.

### Proceso de evaluación por pares

*Tecnura* garantiza que el material remitido para su publicación será considerado como materia reservada y confidencial mientras que se evalúa (doble ciego).

### Reclamaciones

*Tecnura* se compromete responder con rapidez a las quejas recibidas y a velar para que los demandantes insatisfechos puedan tramitar todas sus quejas. En cualquier caso, si los interesados no consiguen satisfacer sus

reclamaciones, se considera que están en su derecho de elevar sus protestas a otras instancias.

### Fomento de la integridad académica

*Tecnura* asegura que el material que publica se ajusta a las normas éticas internacionalmente aceptadas.

### Protección de datos individuales

*Tecnura* garantiza la confidencialidad de la información individual (por ejemplo, de los profesores y/o alumnos participantes como colaboradores o sujetos de estudio en las investigaciones presentadas).

### Seguimiento de malas prácticas

*Tecnura* asume su obligación para actuar en consecuencia en caso de sospecha de malas prácticas o conductas inadecuadas. Esta obligación se extiende tanto a los documentos publicados como a los no publicados. Los editores no sólo rechazarán los manuscritos que planteen dudas sobre una posible mala conducta, sino que se consideran éticamente obligados a denunciar los supuestos casos de mala conducta. Desde la revista se realizarán todos los esfuerzos razonables para asegurar que los trabajos sometidos a evaluación sean rigurosos y éticamente adecuados.

### Integridad y rigor académico

Cada vez que se tenga constancia de que algún trabajo publicado contiene inexactitudes importantes, declaraciones engañosas o distorsionadas, debe ser corregido de forma inmediata.

En caso de detectarse algún trabajo cuyo contenido sea fraudulento, será retirado tan pronto como se conozca, informando inmediatamente tanto a los lectores como a los sistemas de indexación.

Se consideran prácticas inadmisibles, y como tal se denunciarán las siguientes: el envío simultáneo de un mismo trabajo a varias revistas, la publicación duplicada o con cambios irrelevantes o parafraseo del mismo trabajo, o la fragmentación artificial de un trabajo en varios artículos.

### Relaciones con los propietarios y editores de revistas

La relación entre editores, editoriales y propietarios estará sujeta al principio de independencia editorial. *Tecnura* garantizará siempre que los artículos se publiquen con base en su calidad e idoneidad para los lectores, y no con vistas a un beneficio económico o político. En este sentido, el hecho de que la revista no se rija por intereses económicos, y defienda el ideal de libre acceso al conocimiento universal y gratuito, facilita dicha independencia.

### Conflicto de intereses

*Tecnura* establecerá los mecanismos necesarios para evitar o resolver los posibles conflictos de intereses entre autores, evaluadores y/o el propio equipo editorial.

### Quejas/denuncias

Cualquier autor, lector, evaluador o editor puede remitir sus quejas a los organismos competentes.

## CODE OF ETHICS AND GOOD PRACTICE

The editorial board of *Tecnura* journal is committed to ethics high standards and good practice for knowledge dissemination and transfer, in order to ensure rigour and scientific quality. That is why it has taken as reference the Code of Conduct, which has been established by the Committee on Publication Ethics (COPE) for scientific journal editors; outlining the following:

### General duties and responsibilities of the editorial board

As most responsible for the journal, *Tecnura* committee and the editorial board are committed to:

- Joining efforts to meet the readers and authors' needs.
- Tending to the continuous improvement of the Journal.
- Ensuring quality of published material.
- Ensuring freedom of expression.
- Maintaining the academic integrity of their content.
- Prevent commercial interests compromise intellectual standards.
- Post corrections, clarifications, retractions and apologies when necessary.
- Relations with readers
- Readers will be informed about who has funded research and their role in the research.

### Relations with authors

*Tecnura* is committed to ensuring the quality of published material, informing the goals and standards of the journal. The decisions of publishers to accept or reject a paper for publication are based solely on the relevance of the work, originality and pertinence of the study with journal editorial line.

The journal includes a description of the process for peer evaluation of each received work, and has an authors guide with this information. The guide is regularly updated and contains a link to this code of ethics. The journal recognizes the right of authors to appeal editorial decisions. Publishers will not change their decision in accepting or rejecting articles, unless extraordinary circumstances or irregularities are detected. Any change in the editorial board members will not affect decisions already made, except for unusual cases where serious circumstances converge.

### Relations with evaluators

*Tecnura* makes available to reviewers a guide to what is expected from them. Reviewers' identity is protected at all times, ensuring anonymity.

### Peer review process

*Tecnura* ensures that material submitted for publication will be considered private and confidential issue while being reviewed (double blind).

### Claims

*Tecnura* is committed to respond quickly to complaints and ensure that dissatisfied claimant can process all

complaints. In any case, if applicants fail to satisfy their claims, the journal considers that they have the right to raise their protests to other instances.

### Promoting Academic Integrity

*Tecnura* ensures that the published material conforms to internationally accepted ethical standards.

### Protection of individual data

*Tecnura* guarantees the confidentiality of individual information (e.g. participant teachers and/or students as collaborators or subjects of study in the presented research).

### Tracking malpractice

*Tecnura* accepts the obligation to act accordingly in case of suspected malpractice or misconduct. This obligation extends both to publish and unpublished documents. The editors not only reject manuscripts with doubts about possible misconduct, but they are considered ethically obligated to report suspected cases of misconduct. From the journal every reasonable effort is made to ensure that works submitted for evaluation are rigorous and ethically appropriate.

### Integrity and academic rigour

Whenever evidence that a published work contains significant misstatements, misleading or distorted statements, it must be corrected immediately.

In case of any work with fraudulent content is detected, it will be removed as soon as it is known, and immediately informing both readers and indexing systems.

Practices that are considered unacceptable and as such will be reported: simultaneous sending of the same work to various journals, duplicate publication with irrelevant changes or paraphrase of the same work, or the artificial fragmentation of a work in several articles.

### Relations with owners and journal editors

The relation between editors, publishers and owners will be subject to the principle of editorial independence. *Tecnura* will ensure that articles are published based on their quality and suitability for readers, and not for an economic or political gain. In this sense, the fact that the journal is not governed by economic interests, and defends the ideal of universal and free access to knowledge, provides that independence.

### Conflict of interest

*Tecnura* will establish the necessary mechanisms to avoid or resolve potential conflicts of interest between authors, reviewers and/or the editorial board itself.

### Complaints / allegations

Any author, reader, reviewer or editor may refer their complaints to the competent authorities.

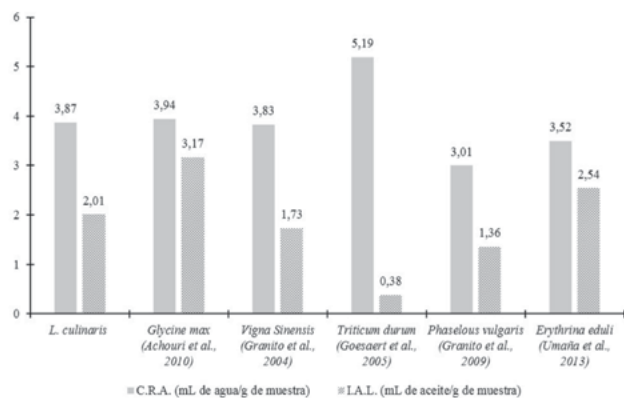


# Contenido

## EDITORIAL

11

## INVESTIGACIÓN

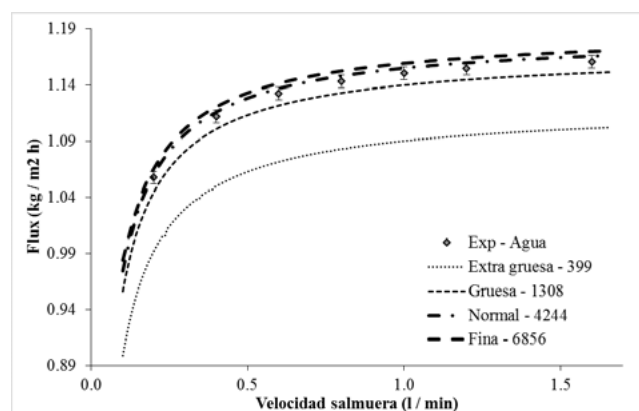


### Efecto de la utilización de harina de *Lens culinaris* como extensor en las características físicas y aceptabilidad de una salchicha

15

Effect of the use of *Lens culinaris* flour as an extender in the physical characteristics and acceptability of a sausage

JOSÉ DAVID TORRES GONZÁLEZ, KEVIN JOSÉ GONZÁLEZ MORELO, DIOFANOR ACEVEDO CORREA, JOSÉ DEL CARMEN JAIMES MORALES

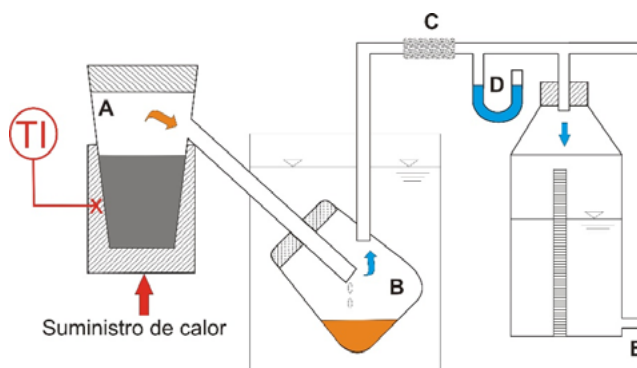


### Modelación y simulación computacional del proceso de evaporación osmótica

29

Modeling and computational simulation of the osmotic evaporation process

FREDDY FORERO LONGAS, ADRIANA PATRICIA PULIDO DÍAZ, SERGIO ANDRÉS CABRERA NAVARRO

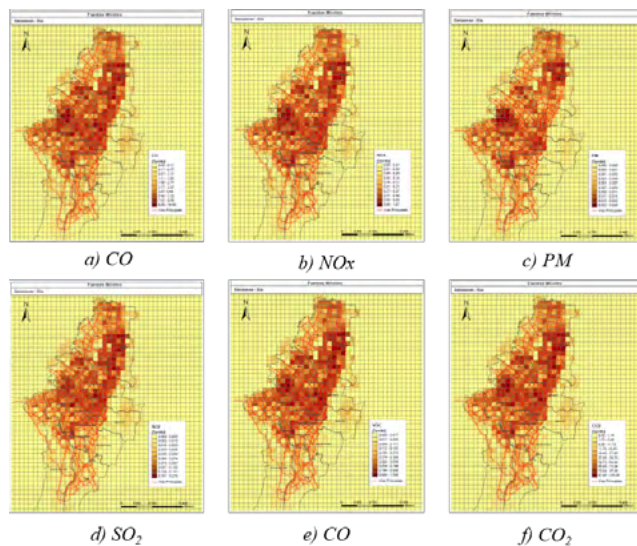


### Análisis comparativo de la carbonización de cuesco de palma de aceite en reactores de lecho fijo

45

Comparative analysis of the carbonization of oil palm kernel shells in fixed bed reactors

DAVID FRANCISCO FLÓREZ RAMOS, JIMMY BARCO BURGOS, SONIA LUCÍA RINCÓN PRAT

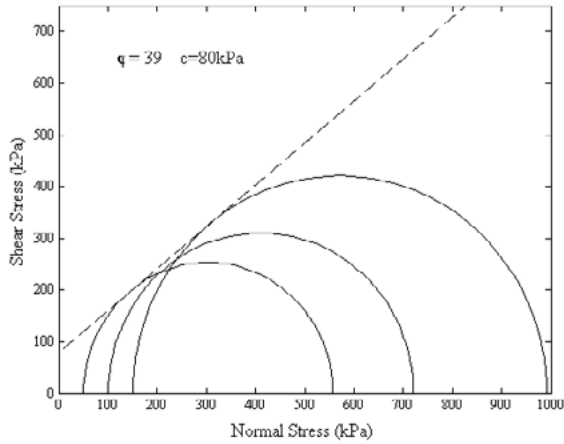


### Conciliación de inventarios top-down y bottom-up de emisiones de fuentes móviles en Bogotá, Colombia

59

Conciliation of top-down and bottom-up inventories to estimate mobile source emissions in Bogota, Colombia

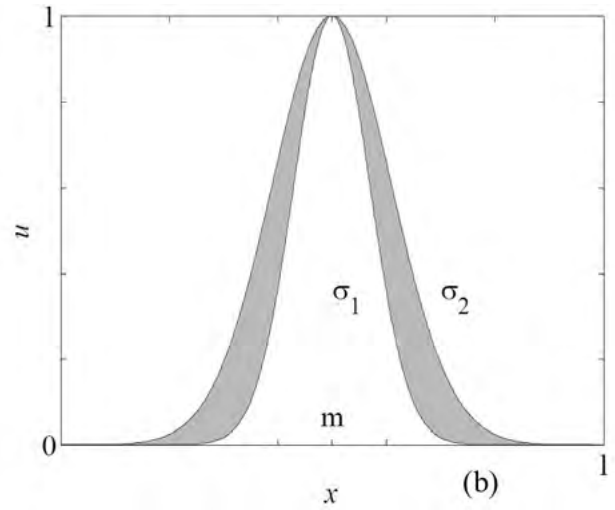
LUIS GABRIEL CARMONA APARICIO, MAURICIO ALEXANDER RINCÓN PÉREZ, ANDRÉS MAURICIO CASTILLO ROBLES, BORIS RENÉ GALVIS REMOLINA, HUGO ENRIQUE SÁENZ PULIDO, RODRIGO ALBERTO MANRIQUE FORERO, JORGE EDUARDO PACHÓN QUINCHE



**Stiffness of a granular base under optimum and saturated water contents** 75

Rigidez de una base granular bajo humedad óptima y saturada

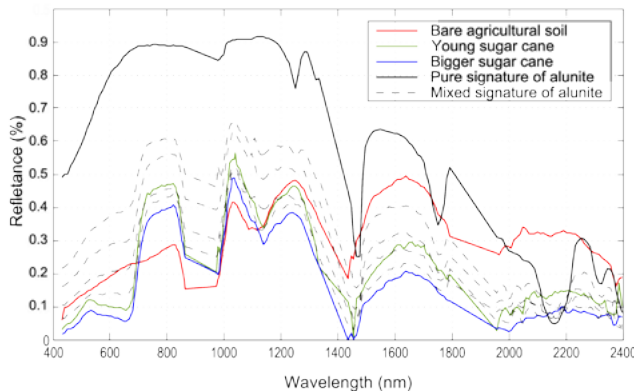
FAUSTO ANDRÉS MOLINA GÓMEZ, JAVIER FERNANDO CAMACHO-TAUTA, OSCAR JAVIER REYES-ORTIZ



**Análisis de vulnerabilidad de sistemas de potencia incluyendo incertidumbre en las variables con lógica difusa tipo 2** 100

Analysis of power system vulnerability considering uncertainty in variables using fuzzy logic type 2

JULIÁN ALEXÁNDER MELO RODRÍGUEZ, CAMILO ANDRÉS CORTÉS GUERRERO

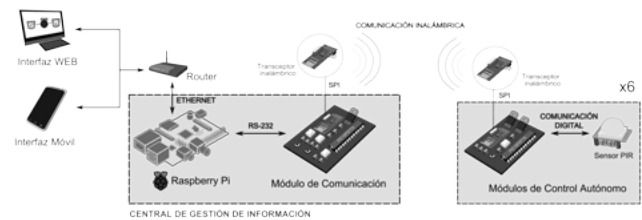


**A comparative study of target detection algorithms in hyperspectral imagery applied to agricultural crops in Colombia** 86

Un estudio comparativo de algoritmos de detección de objetivos en imágenes hiperespectrales aplicados a cultivos agrícolas en Colombia

AROLF CAMACHO VELASCO, CÉSAR AUGUSTO VARGAS GARCÍA, HENRY ARGUELLO FUENTES, ARIOLFO CAMACHO VELASCO, CÉSAR AUGUSTO VARGAS GARCÍA, HENRY ARGUELLO FUENTES

**ESTUDIO DE CASO**



**Sistema de control domótico de bajo costo: un respaldo a la generación ecológica de energía eléctrica en Colombia** 120

Low cost home automation system: a support to the ecological electricity generation in Colombia

ELMER ALEJANDRO PARADA PRIETO, MARIO JOAQUÍN ILLERA BUSTOS SERGIO BASILIO SEPÚLVEDA MORA, DINAEL GUEVARA IBARRA, BYRON MEDINA DELGADO

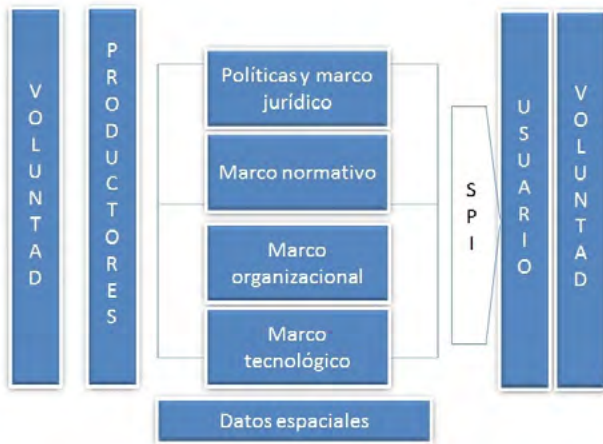
## REVISIÓN DE TEMA

### Técnicas inteligentes en la asignación de espectro dinámica para redes inalámbricas cognitivas **133**

Smart techniques in the dynamic spectrum allocation for cognitive wireless networks

CAMILA SALGADO, HANS MÁRQUEZ, VÍCTOR GÓMEZ

---



### Generación de mapas de ruido (industrial) desde sistemas de información geográfica. Un acercamiento desde la literatura **152**

Generation of maps of noise (industrial) from geographic information systems. An approach from the literature

JAIRO ACERO CALDERÓN, MARCELA JAIMES BECERRA, GUSTAVO ANDRÉS ROMERO DUQUE

---

Instrucciones para los autores **152**

Instructions for authors **174**

SUSCRIPCIÓN **183**

SIGN UP **184**

A propósito de la creación del nuevo programa de Maestría en Ingeniería Civil, con énfasis en Construcción y Hábitat de la Facultad Tecnológica, es importante mencionar algunos aspectos que fueron tenidos en cuenta para su formulación.

El mundo actual presenta desafíos para todo tipo de actividades y de saberes. Las tecnologías y las técnicas que se han desarrollado y que dan un impulso sin precedentes al desarrollo de la especie humana, también han impuesto un gran número de retos, entre ellos, cambiar el modo de vida del grueso de la población a nivel mundial, en un sinnúmero de aspectos, en pro de garantizar un desarrollo responsable y digno.

En 1972 con la cumbre de Estocolmo de las Naciones Unidas, se puso de manifiesto por primera vez la preocupación acerca de los efectos del actuar del hombre sobre su medio ambiente; y de las responsabilidades que tiene el ser humano como constructor de su propio entorno. En 1987 con el documento "Nuestro Futuro Común" producto de la primera reunión de la "Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo" se definió el concepto de desarrollo sostenible como: *"la satisfacción de las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades"*<sup>1</sup>. En 1992 con la cumbre de la tierra en Rio de Janeiro, se promulgó "La Declaración de Rio sobre Medio Ambiente y desarrollo", en la que, entre otros aspectos, se describe la importancia del intercambio tecnológico y la investigación, la necesidad de superar la pobreza como requisito fundamental del desarrollo sostenible, y la importancia de la protección del medio ambiente en cada aspecto del desarrollo de un país.

Los rasgos de responsabilidad ambiental implícitos en el desarrollo sostenible, pueden pasar desapercibidos en espectros importantes del desarrollo como lo la economía y las realidades sociales. Con la cumbre de Johannesburgo de las Naciones Unidas en el

2002 se hizo visible el espectro social del desarrollo sostenible, *"En esta cumbre se reconoció que la base para alcanzar el desarrollo sostenible pasaba por solventar el problema de la pobreza y aminorar la brecha que separa ricos y pobres"*<sup>2</sup>, del mismo modo y en concordancia con la evolución del concepto, se establecieron como pilares del desarrollo sostenible el desarrollo económico, la conservación del medio ambiente y la equidad social.

La Ingeniería Civil como disciplina generadora de conocimientos y soluciones en diversos campos de interés del hombre como la vivienda, el saneamiento básico, la gestión de riesgos y el territorio, tiene gran incidencia en el desarrollo y en el impacto en diversos sectores del medio ambiente humano, no solo tiene un impacto directo en la parte ecológica del mismo, también puede afectar sectores como la economía, la política, incluso la estructura social de una nación.

Según la Organización Internacional del Trabajo en el informe "La industria de la construcción en el siglo XXI: su imagen, perspectivas de empleo y necesidades en materia de calificaciones", la industria de la construcción constituye en países en vía de desarrollo un sector importante que brinda y genera empleo y oportunidades laborales para una gran parte de la población vulnerable de estos países en tanto que *"tiene la capacidad de absorber a los excluidos, proporciona empleo a los que tienen pocos estudios o calificaciones, muchos de ellos procedentes de las capas más pobres de la sociedad"*<sup>3</sup>, así mismo, en países desarrollados tiene un crecimiento dinámico y constituye un porcentaje importante de la inversión lo que lo convierte en un sector importante de la industria.

---

1 NACIONES UNIDAS. Desarrollo sostenible: antecedentes [en línea]: Colombia. [fecha de consulta: 20 de agosto de 2015]. Disponible en: <<http://www.un.org/es/ga/president/65/issues/sustdev.shtml>>

2 ÁNGEL VEGA, José Luis. Responsabilidad social y los principios del desarrollo sostenible como fundamentos teóricos de la información social de la empresa. ESIC. España. 2009. Página 105, Evolución del concepto de desarrollo sostenible.

3 ORGANIZACION INTERNACIONAL DEL TRABAJO, programa de actividades sectoriales. La industria de la construcción en el siglo XXI: su imagen, perspectivas de empleo y necesidades en materia de calificaciones. [en línea]: Colombia. [fecha de consulta: 24 de Agosto de 2015]. Disponible en: <<http://www.ilo.org/public/spanish/standards/relm/gb/docs/gb283/pdf/tmcitr.pdf>>

En la Cumbre del Milenio Celebrada en Nueva York en el año 2000 se firmó la declaración del milenio<sup>4</sup>. Con base en ésta se formularon los objetivos del milenio que son:

- Reducir a la mitad la pobreza
- Lograr la enseñanza primaria universal
- Promover la igualdad entre los sexos
- Reducir la mortalidad infantil
- Mejorar la salud materna
- Combatir el VIH/SIDA, el paludismo y otras enfermedades
- Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente
- Fomentar una asociación mundial para el desarrollo
- Estos ocho objetivos del milenio, agrupan 18 metas y cerca de 40 indicadores. Fueron trazados en el año 2000, con la meta de ser alcanzados en el año 2015. Fueron concebidos como objetivos comunes a todas las naciones y el gran objetivo que enmarcaba a los demás era reducir la pobreza.

Es evidente, que los diversos campos de la Ingeniería Civil juegan un rol decisivo en el cumplimiento de los objetivos del milenio, esto se hace evidente cuando la ONU afirma en materia de vivienda<sup>5</sup>, que el mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes de los tugurios implica, más que un mejoramiento físico de la vivienda, un acceso a condiciones económicas, sociales y ambientales. Estas condiciones para el mejoramiento de la calidad de vida de las poblaciones marginadas pueden asociarse a planes de urbanismo y mejoramiento, inversión en mobiliario urbano entre otros. Según el programa de las naciones unidas para los asentamientos humanos<sup>6</sup>, para el año 2000, cerca de 940 millones de personas

vivían en alojamientos precarios, cerca del 13% de estas personas se encontraban en zonas de América latina, dichas zonas según el mismo informe, se caracterizaban por viviendas deterioradas en el centro del núcleo urbano y viviendas informales en la periferia y zonas de riesgo con un acceso inadecuado a servicios básicos. La precariedad de una vivienda se determina, según la ONU<sup>7</sup>, con base en 5 indicadores que son:

- Acceso a fuentes mejoradas de agua potable
- Acceso a sistemas de saneamiento mejorados
- Área suficiente para vivir
- Durabilidad de la vivienda
- Tenencia segura (protección del estado frente a desalojos forzosos)

La Ingeniería Civil como área responsable de dar respuestas a problemáticas sentidas como la vivienda de interés social, el saneamiento básico, la planificación urbana entre otros, tiene gran importancia en la mejora de las realidades de la nación. Es por ello que el nuevo Proyecto Curricular de Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Construcción y Hábitat, se concibe como una alternativa de educación posgradual incluyente y de calidad, basada en la necesidad de continuar con la formación de los egresados de los diferentes programas de Ingeniería Civil, Arquitectura y afines, a un nivel posgradual. Adicionalmente, el la misión de nuestra facultad, formar profesionales, con bases sólidas que estén en capacidad de llevar a cabo, de forma autónoma, competente y ética, diferentes procesos de adaptación tecnológica, producción académica, e investigaciones originales, tanto en la industria como en la academia, para contribuir así a su desarrollo personal, familiar y de la sociedad en general.

CÉSAR AUGUSTO GARCÍA-UBAQUE  
Director

4 PROGRAMA DE DESARROLLO PARA LAS NACIONES UNIDAS EN COLOMBIA. Objetivos del milenio ¿que son los ODM? [en línea]: Colombia. [fecha de consulta: 13 de julio de 2015]. Disponible en: <<http://www.pnud.org.co/sitio.shtml?apc=h-a-1—&s=a&m=a&e=A&c=02010#.VaUQfl-qkqkq>>

5 NACIONES UNIDAS. Objetivos del desarrollo del milenio: una mirada desde América Latina y el Caribe. 2005. Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente. Página 179.

6 PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LOS ASENTAMIENTOS HUMANOS (NACIONES UNIDAS-HÁBITAT), citado por NACIONES UNIDAS. Objetivos del desarrollo del milenio: una mirada desde América Latina y el Caribe. 2005. Panorama regional del Medio ambiente construido. Página 192.

7 UN-HABITAT. Global Report On Human Settlements 2003: Slums of the World: The face of urban poverty in the new millennium citado por ÁLVAREZ de ANDRÉS, Eva. Análisis de la situación actual de la habitabilidad precaria en el mundo y alcance de los Objetivos de Desarrollo del Milenio [en línea]: España. [fecha de consulta: 14 de julio de 2015]. Disponible en: <[www.2015ymas.org/documentos\\_ver.asp?id=41](http://www.2015ymas.org/documentos_ver.asp?id=41)>

On purpose of Technological Faculty new Master's program in Civil Engineering with emphasis in Construction and Habitat, it is important to mention some aspects that were considered for their formulation.

Today's world presents challenges for all kinds of activities and knowledge. Developed technologies and techniques give an unprecedented boost to human growth; and have also imposed changes in lifestyle for the bulk of the population worldwide, in different ways towards ensuring a responsible and dignified development.

In 1972 with United Nations Stockholm Summit, was revealed for the first time concern about the effects and responsibilities of the human being as a builder of their own environment. In 1987 with the document "Our Common Future" product of the first meeting of the "World Commission on Environment and Development", the concept of sustainable development was defined: *"satisfying the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs"*<sup>8</sup>. In 1992 with the Earth Summit in Rio de Janeiro, "The Rio Declaration on Environment and Development", describes the importance of technological exchange and research; and was enacted the need to overcome poverty as a fundamental requirement for sustainable development, and the importance of environmental protection in every aspect of any country development.

The features of environmental responsibility implicit in sustainable development can go unnoticed in important development spectra as the economy and social realities. With United Nations Johannesburg Summit in 2002 became visible the social spectrum of sustainable development, *"The summit recognized that the basis for achieving sustainable development passed by solving the problem of poverty and reduce the gap between rich and poor"*<sup>9</sup>. In the same way

and in accordance with the evolution concept, UN established as pillars of sustainable development: economic development, environmental conservation and social equity.

The Civil Engineering as a generator discipline of knowledge and solutions in many fields of human interest (housing, basic sanitation, risk management and territory), has great influence on the development and impact on various sectors of human environment; not only direct impacts on the ecological aspects, but also in areas such economy, politics, and even the social structure of a nation.

According to the International Labour Organization in the report "The construction industry in the twenty-first century: its image, employment prospects and needs grading" the construction industry in developing countries is an important sector that provides and creates jobs and employment opportunities for a large proportion of vulnerable population while *"has the ability to absorb the excluded, provides employment for those with little education or skill, many of them from the more layers poorest in society"*<sup>10</sup>, also in developed countries has a dynamic growth and is an important percentage of the investment making it an important sector of the industry.

At the Millennium Summit held in New York in 2000, the Millennium Declaration<sup>11</sup> was signed. Based on this the millennium goals are formulated:

- Halve Poverty
- Achieve universal primary education
- Promote gender equality
- Reduce child mortality
- Improve maternal health
- Combat HIV / AIDS, malaria and other diseases

---

8 NACIONES UNIDAS. Desarrollo sostenible: antecedentes [en línea]: Colombia. [fecha de consulta: 20 de agosto de 2015]. Disponible en: <<http://www.un.org/es/ga/president/65/issues/sustdev.shtml>>

9 ÁNGEL VEGA, José Luis. Responsabilidad social y los principios del desarrollo sostenible como fundamentos teóricos de la información social de la empresa. ESIC. España. 2009. Página 105, Evolución del concepto de desarrollo sostenible.

10 ORGANIZACION INTERNACIONAL DEL TRABAJO, programa de actividades sectoriales. La industria de la construcción en el siglo XXI: su imagen, perspectivas de empleo y necesidades en materia de calificaciones. [en línea]: Colombia. [fecha de consulta: 24 de Agosto de 2015]. Disponible en: <<http://www.ilo.org/public/spanish/standards/relm/gb/docs/gb283/pdf/tmctir.pdf>>

11 PROGRAMA DE DESARROLLO PARA LAS NACIONES UNIDAS EN COLOMBIA. Objetivos del milenio ¿que son los ODM? [en línea]: Colombia. [fecha de consulta: 13 de julio de 2015]. Disponible en: <<http://www.pnud.org.co/sitio.shtml?apc=h-a-1—&s=a&m=a&e=A&c=02010#.VaUQfl-qkqk>>

- Ensure environmental sustainability
- Promote a world association for development

These eight goals, grouped 18 targets and about 40 indicators. They were drawn in 2000, with the goal to be achieved by 2015. They were conceived as common objectives of all nations and the great goal framing others was to reduce poverty.

It is evident that the various fields of Civil Engineering play a decisive role in meeting the Millennium Development Goals, this becomes evident when the UN says about housing<sup>12</sup>, that improving the quality of life of the inhabitants of the slum involves more than a physical improvement of housing, access to economic, social and environmental conditions. These conditions for improving the quality of life of marginalized populations may be associated with urban planning and improvement, investment in urban equipment, among others. According to the UN program for human settlements<sup>13</sup>, in 2000, about 940 million people lived in precarious housing; about 13% of these people were in Latin America. According to the same report, these areas were characterized by dilapidated housing in the center of the village and informal housing in the periphery and risk areas with inadequate access to basic services. The precariousness of housing is determined, according to the UN<sup>14</sup>, in five indicators:

- Access to improved water
- Access to improved sanitation
- Sufficient area to live
- Housing durability of
- Tenure Security (state protection against forced evictions)

Civil Engineering responsible for giving answers to problems as social housing, basic sanitation and urban planning, among others; has great importance in improving the realities of the nation. That is why the new Curriculum Project of Master in Civil Engineering with emphasis on Construction and Housing is conceived as an alternative of post gradual education based on the need to continue with training of graduates of Civil engineering, Architecture and related. Additionally, the mission of our Faculty: train professionals, with solid bases that are able to carry out, independently, competent and ethically, different processes of technological adaptation, academic production, and original research, both in industry and in academia, thus contributing to their personal, family and society development.

CÉSAR AUGUSTO GARCÍA-UBAQUE  
Director

---

12 NACIONES UNIDAS. Objetivos del desarrollo del milenio: una mirada desde América Latina y el Caribe. 2005. Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente. Página 179.

13 PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LOS ASENTAMIENTOS HUMANOS (NACIONES UNIDAS-HÁBITAT), citado por NACIONES UNIDAS. Objetivos del desarrollo del milenio: una mirada desde América Latina y el Caribe. 2005. Panorama regional del Medio ambiente construido. Página 192.

14 UN-HABITAT. Global Report On Human Settlements 2003: Slums of the World: The face of urban poverty in the new millennium citado por ÁLVAREZ de ANDRÉS, Eva. Análisis de la situación actual de la habitabilidad precaria en el mundo y alcance de los Objetivos de Desarrollo del Milenio [en línea]: España. [fecha de consulta: 14 de julio de 2015]. Disponible en: <[www.2015ymas.org/documentos\\_ver.asp?id=41](http://www.2015ymas.org/documentos_ver.asp?id=41)>



## Efecto de la utilización de harina de *Lens culinaris* como extensor en las características físicas y aceptabilidad de una salchicha

### Effect of the use of *Lens culinaris* flour as an extender in the physical characteristics and acceptability of a sausage

José David Torres González<sup>1</sup>, Kevin José González Morelo<sup>2</sup>, Diofanor Acevedo Correa<sup>3</sup>, José del Carmen Jaimes Morales<sup>4</sup>

**Fecha de recepción:** 10 de febrero de 2016

**Fecha de aceptación:** 15 de mayo de 2016

**Cómo citar:** Torres González, J. D., González Morelo, K. J., Acevedo Correa, D., & Jaimes Morales, J. D. C. (2016). Efecto de la utilización de harina de *Lens culinaris* como extensor en las características físicas y aceptabilidad de una salchicha. *Revista Tecnura*, 20(48), 15-28. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.3.a01

#### Resumen

**Objetivo:** En esta investigación se utilizó harina de *Lens culinaris* variedad verdina como extensor carnico y se analizó su efecto en las características físicas y aceptabilidad de una salchicha.

**Metodología:** Se obtuvo la harina, analizaron las características bromatológicas, el índice de absorción de lípidos (IAL) y la capacidad de retención de agua (CRA). Se elaboraron las salchichas y añadiéndole un 5% de la harina, posteriormente al producto terminado se le evaluaron los parámetros bromatológicos, microbiológicos, texturales y sensoriales por triplicado.

**Análisis estadístico:** Se utilizó un diseño experimental completamente al azar, realizando tres replicas de la formulación con harina de *L. culinaris* y se efectuaron análisis de varianza para hallar las diferencias estadísticas.

**Resultados:** El contenido de proteína de la harina fue 35,89% mientras que el de fibra 11,82%. La

capacidad de retención de agua y el índice de absorción de lípidos para la harina fueron de 3,87 mL agua/g muestra y 2,01 mL de aceite/g muestra. El producto final presentó recuentos microbianos que estuvieron dentro de lo establecido por las Normas Técnicas Colombianas. La harina influyó positivamente en la aceptabilidad de las salchichas y fue favorable en todos los parámetros de textura, lo cual fue similar a lo obtenido en salchichas comerciales.

**Conclusiones:** La harina de *L. culinaris* representa una alternativa como materia prima no cárnica en la elaboración de productos con interesantes valores proteicos. Estos resultados pueden incentivar la utilización de la harina de lenteja de la variedad verdina en productos alimenticios de consumo masivo.

**Financiamiento:** Grupo de Investigación Nutrición Salud y Calidad Alimentaria, Universidad de Cartagena.

**Palabras clave:** Alimento, funcionalidad, nutrición, proteína

<sup>1</sup> Ingeniero de Alimentos, magíster en Ciencias Agroalimentarias, estudiante de doctorado en Ingeniería Química y Bioprocesos. Santiago de Chile, Chile. Contacto: [jtorresg3@unicartagena.edu.co](mailto:jtorresg3@unicartagena.edu.co)

<sup>2</sup> Ingeniero de Alimentos, auxiliar de investigación grupo de Investigación Nutrición, Salud y Calidad Alimentaria. Cartagena, Colombia. Contacto: [kevinjonza@hotmail.com](mailto:kevinjonza@hotmail.com)

<sup>3</sup> Ingeniero de Alimentos, especialista en Ciencia y Tecnología de Alimentos, doctor en Ingeniería. Docente de la Universidad de Cartagena. Cartagena, Colombia. Contacto: [diofanor3000@gmail.com](mailto:diofanor3000@gmail.com)

<sup>4</sup> Ingeniero de Alimentos, magíster en Ciencia y Tecnología de Alimentos, candidato a doctor en Ciencias. Docente de la Universidad de Cartagena. Cartagena, Colombia. Contacto: [jjaimemor@yahoo.es](mailto:jjaimemor@yahoo.es)



## Abstract

**Objective:** The objective of this research was to use *Lens culinaris* flour, verdina variety, as a meat extender, and to analyze its effect on the physical characteristics and acceptability of a sausage.

**Methodology:** The bromatological characteristics, oil absorption index (OAI) and water holding capacity (WHC) were analyzed on the obtained flour. The sausage was prepared, it was added 5% of flour to it; then, the bromatological, microbiological, textural, and sensory parameters per triplicate of the finished product were evaluated.

**Statistical Analysis:** An experimental design was used completely at random, making three replicates of the formulation, and analysis of variances was performed to find statistical differences.

**Results:** The protein content of the flour was 35.89 % while the fiber was 11.82%. The water holding

capacity and the lipid index absorption were 3.87 mL water/g sample, and 2.01 ml of oil/g sample. The final product showed that microbial counts were within the provisions of the Colombian Technical Standards. Flour positively influenced the acceptability of sausages and was favorable in all texture parameters, which were similar to those obtained in commercial sausages.

**Conclusions:** *L. culinaris* flour represents a non-meat alternative raw material in the manufacture of products with a good protein source. These results may encourage the use of Lentil flour with verdina variety of food products consumers.

**Financing:** the Nutrition, Health and Food Quality Research Group, University of Cartagena.

**Keywords:** Food, functionality, nutrition, protein.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad ha surgido un gran interés por el uso de nuevas fuentes de proteínas, debido al aumento exponencial de la población, lo que a su vez genera un déficit creciente a escala mundial de productos proteicos (Liu *et al.*, 2008). Con el fin de satisfacer esta demanda, se han realizado numerosas investigaciones tendientes a encontrar nuevas tecnologías que faciliten un mayor aprovechamiento de las fuentes de proteínas existentes (Boye *et al.*, 2010). Colombia se encuentra entre los países de mayor biodiversidad de alimentos y materias primas vegetales; sin embargo, la desnutrición sigue siendo uno de los grandes problemas que afecta la salud de la población, en especial la falta de proteínas en la dieta de los niños, que se manifiesta con problemas de crecimiento, enfermedades y pérdidas en el desarrollo cerebral (Restrepo *et al.*, 2010). Según la última encuesta de situación nutricional en Colombia, la deficiente ingesta de proteínas alcanza el 36,6 % lo cual significa que lo recomendado (0,91 g/kg de peso

no está satisfecha en un gran sector de la población (Restrepo *et al.*, 2010; Sánchez-Zapata *et al.*, 2011; Montero *et al.*, 2015). Estas deficiencias son más marcadas en los grupos poblacionales de escasos recursos, debido al elevado costo y la poca disponibilidad de los productos proteicos en cualquier etapa del año (Benjumea, Estrada y Álvarez, 2006). Las leguminosas tienen un elevado contenido proteico (20-45 %) y pueden ser considerados como un complemento natural a los cereales, ya que contienen cantidades adecuadas de lisina (Olmedilla, Ferré-Rovir, Asencio-Vegas y Matín-Pedrosa, 2010). Algunas leguminosas, como la soya, frijól común, Zaragoza, garbanzo, cacahuete, habas y arvejas, pueden producir flatulencias, y otras como *lupinus* y el frijól mucuna, contienen principios tóxicos que normalmente son eliminados al someterlas a cocción por ebullición (Boye *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2010).

Las lentejas (*Lens culinaris*) son legumbres que crecen en vainas, la cual contiene semillas en su interior; son bastante pequeñas, planas y son similares a los guisantes (Joshi, Adhikari, Panozzo

y Aldred, 2010). Existen cientos de variedades de lentejas que difieren principalmente por sus propiedades fisicoquímicas y en el color (Gharibzahedi, Emam-Djomeh, Razavi y Jafari, 2014); se pueden encontrar en amarillo, naranja, rojo, verde, marrón y negro, hoy en día se consumen en todo el mundo. Algunos estudios revelan que las lentejas reducen el colesterol (Oroian, 2015) debido a la fibra soluble que se une a este, por lo cual se reducen los niveles en la sangre (Gharibzahedi *et al.*, 2014). Las lentejas son ricas en fósforo, también tienen una alta cantidad de vitaminas B1, B2, B3, B5, B6, B9, A, C, K, E, además de grandes cantidades de minerales como potasio, hierro, calcio, yodo, zinc, sodio, y de componentes como fibra, proteínas, carbohidratos (Oroian, 2015).

Con el propósito de disminuir los costos de producción en la formulación de los productos cárnicos, se han introducido algunas sustancias denominadas extensores, con el propósito de sustituir una parte de la carne que se emplea y así ofrecer el aporte proteico y funcional adecuado (Utrilla, García-Ruiz y Soriano, 2014). Sin embargo, no es recomendable la utilización excesiva de los extensores, porque esto puede influir negativamente en la calidad y aceptabilidad del producto final (Rodríguez, Amorrortu y Álvarez, 2011; Guavita, 2012). Por ende es necesario establecer proporciones adecuadas para cada derivado cárnico a elaborar (Utrilla, García-Ruiz y Soriano, 2014). Las harinas, concentrados y aislados de cereales y legumbres son ejemplos de extensores cárnicos más usados en la industria alimentaria (Achouri *et al.*, 2010). Cabe resaltar que el uso de extensores, además de proporcionar proteínas de alto valor biológico, sustituyen parcialmente la proteína cárnica y otros nutrimentos asociadas a esta (Boye *et al.*, 2010; Jaimes *et al.*, 2015). Los extensores cárnicos tienen propiedades funcionales como la retención de agua, la emulsificación de las grasas, absorción de lípidos y la gelificación (Olmedilla-Alonso, Jiménez-Colmenero y Sánchez-Muniz, 2013). Así la presencia de uno u otro extensor no solo ayuda en la parte económica a la fórmula, sino que

además concede rendimiento al proceso y al producto como tal (Arief *et al.*, 2014; Marchetti, Andrés y Califano, 2014).

Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue utilizar harina de *Lens culinaris* variedad verdina, como extensor cárnico, y analizar su efecto en las características bromatológicas, microbiológicas, texturales y aceptabilidad de un producto cárnico tipo salchicha.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Obtención de la muestra

Se tomó una muestra de 4000 g de *L. culinaris* adquiridas de un supermercado local de la ciudad de Cartagena de Indias (Bolívar, Colombia). Esta cantidad fue suficiente para la obtención de la harina, realizar las pruebas y elaborar las salchichas. Las semillas se seleccionaron teniendo en cuenta que estuvieran sanas (enteras y sin picaduras de gorgojo); se secaron utilizando una incubadora a 40 °C (incubadora Thermolyne). Luego molidas en un molino tradicional, el producto se pasó por un tamiz de malla No. 40 hasta obtener una harina fina (Jaimes, Restrepo y Acevedo, 2014).

### Evaluación de la composición de la harina

#### Análisis bromatológicos

A la harina se le realizaron determinaciones de humedad (No. 952,08), grasa cruda (No. 948,15), cenizas (No. 942,05), proteína cruda según el método de Kjeldahl con factor 6,25 (No. 995,04), fibra (No. 962,09) siguiendo la metodología propuesta por la AOAC (2005). Una vez obtenidos todos estos valores, la diferencia se tomó como el porcentaje de carbohidratos totales a través de la ecuación (1). Las calorías (kcal/100 g) se determinaron de manera similar a lo realizado por Alvis, Vélez y Rada-Mendoza (2008) mediante la relación de los porcentajes de proteínas, grasa y carbohidratos presentada en la ecuación (2). La harina de *Lens culinaris* fue comparada con resultados de

otras investigaciones donde utilizaron diferentes harinas de leguminosas y cereales.

$$\text{Carbohidratos} = 100 - (\% \text{ de humedad}) + (\% \text{ de proteína}) + (\% \text{ de grasa}) + (\% \text{ de ceniza}) \quad (1)$$

$$\text{Calorías (kcal/100 g)} = (4 \times \% \text{ de proteína}) + (9 \times \% \text{ de grasa}) + (4 \times \% \text{ de carbohidratos}) \quad (2)$$

### Propiedades funcionales a la harina de *L. culinaris*

#### *Índice de absorción de lípidos (IAL)*

Representa la cantidad de aceite por 100 g de harina. Se determinó agregando un exceso de aceite (3 ml) a la muestra (0,5 g) en tubos graduados de centrífuga; posteriormente se agitó por 1 minuto; luego se colocó a 24 °C durante 30 minutos y se centrifugó a 3200 revoluciones por minuto y se midió el volumen de aceite excedente. La densidad del aceite fue de 0,86 g/ml. Se calculó el índice de absorción de lípidos (% de IAL) mediante la ecuación (3) (Bermúdez, 1994; Granito, Pérez y Suhey, 2009).

$$\% \text{ de IAL} = (\text{ml aceite absorbido/gramos de muestra}) \times 100 \quad (3)$$

#### *Capacidad de retención de agua (CRA)*

Expresa la cantidad de agua retenida por 100 g de harina. Se cuantificó, colocando 0,5 g de muestra en un tubo de centrífuga, agregando un exceso de agua (3 ml). Se agitó por 1 minuto. Los tubos se centrifugaron a 3200 revoluciones por minuto, después de haberse mantenido a 24 °C por 30 minutos; para medir el volumen de agua no retenida, se empleó la ecuación (4) (Bermúdez, 1994; Granito, Pérez y Suhey, 2009).

$$\% \text{ de CRA} = (\text{ml de agua retenida/gramos de muestra}) \times 100 \quad (4)$$

### Elaboración de la salchicha

Se utilizó carne de res y de cerdo que se compró y trasladó a las instalaciones del Grupo de Investigación Nutrición, Salud y Calidad Alimentaria, de la Facultad de Ingeniería en la Universidad de Cartagena, donde se pesó y, posteriormente, se separó de la grasa y de otros componentes como el hueso y la piel. La carne fue picada en una picadora de discos de 5 mm de espesor, y se colocó en una máquina *Cutter*, con el fin de disminuir el tamaño de partícula. En esta etapa de procesamiento se agregó la mitad del hielo a procesar, los condimentos y la sal, teniendo en cuenta los porcentajes establecidos por las Normas Técnicas Colombianas (Hleap y Velasco, 2012).

Posteriormente la grasa fue agregada, al igual que la otra mitad del hielo y la harina *L. culinaris*. La pasta se retiró de la máquina *Cutter*, una vez que esta adquirió homogeneidad. El mezclado se realizó por 15 minutos y la temperatura de la masa final del proceso no fue mayor a 15 °C para evitar que las proteínas se desnaturalizaran y, por ende, perdieran su capacidad de retener agua.

Una vez obtenida la emulsión, se efectuó el embutido, el cual se llevó a cabo en una embutidora hidráulica, utilizando tripas naturales. El amarrado se hizo manualmente y en el cual se garantizó un peso de 60 gramos, correspondiente al peso comercial; las salchichas fueron sometidas a escaldado, donde se efectuó la coagulación de las proteínas. Esta etapa tecnológica se realizó en un tanque de cocción rectangular, con agua corriente a temperatura de 95±1 °C, hasta que la temperatura medida con una termocupla en una salchicha tomada aleatoriamente alcanzó los 72±1 °C. Para disminuir la temperatura de las salchichas y lograr una coagulación correcta; estas fueron sometidas a un choque térmico, para lo cual se utilizó una mezcla de agua y hielo a temperatura de 10±2 °C, durante aproximadamente cinco minutos. Las salchichas se almacenaron y refrigeraron a 4 °C. En la tabla 1 se detalla la formulación utilizada para elaborar las salchichas con harina de *L. culinaris*.

**Tabla 1.** Formulación empleada para elaborar salchichas con harina de *L. culinaris*

Ingredientes	Formulación (g)	(%)
Carne de res	480	48,0
Carne de cerdo	120	12,0
Grasa	200	20,0
Hielo	135	13,5
Harina de <i>L. culinaris</i>	50	5,0
Consomé de pollo	2	0,16
Cebolla en polvo	1	0,10
Pimienta blanca molida	3	0,30
Glutamato monosódico	1	0,10
Ajo en polvo	1	0,10
Sal	2	0,24
Humo líquido	5	0,50
Total	1000	100,0

**Fuente:** elaboración propia.

## Evaluación de las características y aceptabilidad de las salchichas

### Análisis bromatológicos

Estos se realizaron de manera similar a los efectuados a la harina, en cuanto al contenido de humedad, cenizas, proteínas, grasa, fibra y carbohidratos (AOAC, 2005). Las muestras de salchichas se mantuvieron a 15 °C, todos los ensayos se realizaron por triplicado empleando diez gramos en cada caso.

### Análisis sensorial

Se llevó a cabo por 20 panelistas semientrenados, en una habitación apropiada para tal fin. Los miembros indicaron cuánto les gustaba o disgustaba el producto, para lo cual se utilizó una escala hedónica de 5 puntos (excelente, buena, neutral, regular, mala) en cuanto a las características de olor, color, sabor, dureza y aceptabilidad general, similar a lo realizados por Hleap, Gutiérrez, Rivera (2010), y Granados, Guzmán y Acevedo (2013). Los datos de cada panelista se recogieron en una planilla para su análisis posterior; los análisis fueron comparados con los realizados a una salchicha comercial, elaborada con harina de soya.

### Análisis microbiológicos

Se realizaron pruebas de conteo total de aerobios mesófilos, coliformes totales y fecales, *Staphylococcus coagulasa* positivos, *Salmonella* y *Escherichia coli* a las salchichas escaldadas, según la metodología indicada por la Norma Técnica Colombiana (Icontec, 2008). Las determinaciones se hicieron por triplicado empleando 15 g en cada caso y los datos se expresaron como Log<sub>10</sub> de UFC/g.

### Análisis de perfil de textura (TPA)

De acuerdo con la metodología planteada por Montero, Acevedo, Arnedo y Miranda (2015) y Torres, Acevedo y Tirado (2015). Se cortaron las salchichas elaboradas con harina de *L. culinaris*, en rodajas de 1,5 cm de espesor y se dejaron en reposo por un lapso de una hora dentro de una bolsa de polietileno, con el fin de evitar la pérdida de humedad de las muestras. Se utilizó un texturómetro marca TA.TX2i® Plus Stable Micro System, acoplado al programa *Texture Expert Exceed*, versión 2.64. Se realizó una doble compresión uniaxial a 75 % de deformación (estrés normal) y a una velocidad de cabeza de 2 mm/s, con un tiempo de espera de 5 segundos entre las compresiones. Se determinaron los siguientes parámetros de textura: dureza (N), adhesividad (N), cohesividad (adimensional), elasticidad (adimensional) y masticabilidad (kg). Estos análisis al igual que los sensoriales y bromatológicos se compararon con los obtenidos de una salchicha comercial elaborada con harina de soya.

### Análisis estadístico

En esta investigación se empleó un diseño experimental completamente al azar (DCA) debido a que todos los análisis respectivos fueron hechos en laboratorio bajo condiciones controladas de temperatura y humedad ambiente. La formulación de la salchicha con harina de *L. culinaris* fue realizada tres veces, es decir, se tuvieron tres réplicas del experimento. Todos los análisis pertenecientes a cada réplica se realizaron por triplicado y se

registró el promedio aritmético y su desviación estándar. El procesamiento de la información obtenida se llevó a cabo con el programa estadístico *Statgraphics Centurion*® versión 16.0 en Windows 10, en el cual se determinó la existencia o no de diferencias estadísticamente significativas de cada uno de los parámetros evaluados en los ensayos, a través de un análisis de varianza (ANOVA) completamente aleatorio y mediante comparaciones múltiples, empleando el test HSD de Tukey con un nivel de significancia del 5 % ( $p \leq 0,05$ ).

## RESULTADOS

En la tabla 2 se muestra la composición bromatológica obtenida de la harina de *L. culinaris*. Esta fue comparada con valores reportados por otros autores en harinas leguminosas y cereales, utilizados comúnmente en la elaboración de embutidos cárnicos. El contenido de humedad de la harina *L. culinaris* fue de  $6,38 \pm 0,61$  %, sin encontrarse diferencias estadísticamente significativas ( $p > 0,05$ ) con respecto a la harina de soya  $5,98 \pm 0,59$  %, la

cual es muy frecuente en la elaboración de productos cárnicos. Por su parte, las harinas de fríjol ( $12,01 \pm 0,31$  %), trigo ( $12,11 \pm 0,33$  %) y quinua ( $11,74 \pm 0,01$  %) mostraron los mayores porcentajes de humedad, siendo diferente estadísticamente ( $p < 0,05$ ) respecto a la harina de *L. culinaris*.

El contenido de proteínas para la harina de soya fue de  $34,81 \pm 0,39$  % mientras que para la harina de lentejas, variedad verdina, fue de  $35,89 \pm 0,26$  % y no hubo diferencias significativas entre estos valores, lo que lleva a considerar la importancia de la harina de lentejas para la elaboración de productos proteicos. Es pertinente resaltar la importancia de desarrollar investigaciones donde se indique el valor biológico y el tipo de proteínas presentes en dicha harina. En cuanto al contenido lipídico se observó mucha variabilidad de los valores reportados en los diferentes tipos de harinas, respecto a la de lenteja ( $p < 0,05$ ), debido a que las de chachafruto, fríjol, trigo y quinua, aquí mencionadas, fueron desengrasadas durante su elaboración, según los respectivos investigadores. La harina de la leguminosa promisorio *tarwi*,

**Tabla 2.** Composición bromatológica de la harina de *L. culinaris* y comparación con algunas leguminosas y cereales utilizados en la elaboración de salchichas

Componentes harinas (*)	Humedad (%)	Proteínas (%)	Lípidos (%)	Fibra (%)	Cenizas (%)	Carbohidratos (%)	Calorías (kcal/100g)
Lentejas	$6,38 \pm 0,61$ a	$35,89 \pm 0,26$ d	$1,25 \pm 0,07$ b	$11,82 \pm 0,30$ c	$3,01 \pm 1,34$ c	$53,47 \pm 8,38$ b	374,53a
Soya (Delgado y Albarracín, 2012)	$5,98 \pm 0,59$ a	$34,81 \pm 0,39$ d	$9,54 \pm 0,07$ d	$7,59 \pm 0,42$ b	$4,68 \pm 0,23$ cd	$44,99 \pm 7,67$ b	405,06e
Chachafruto (Delgado y Albarracín, 2012)	$9,01 \pm 0,60$ c	$22,81 \pm 0,28$ b	$0,70 \pm 0,01$ a	NA	$5,35 \pm 0,52$ e	$62,14 \pm 1,87$ d	346b
Tarwi (Castañeda et al., 2009).	$7,72 \pm 0,42$ b	$44,31 \pm 0,37$ e	$16,50 \pm 0,54$ e	$7,11 \pm 0,35$ b	$3,34 \pm 0,72$ c	$28,13 \pm 0,34$ a	438f
Fríjol (Granito et al., 2009).	$12,01 \pm 0,31$ d	$26,24 \pm 0,36$ c	$1,66 \pm 0,51$ b	$3,33 \pm 0,62$ a	$3,62 \pm 0,38$ c	$56,47 \pm 1,23$ c	387d
Trigo (Goesaert et al., 2005).	$12,11 \pm 0,33$ d	$12,21 \pm 0,34$ a	$1,12 \pm 0,08$ b	$3,62 \pm 0,81$ a	$0,84 \pm 0,02$ a	$73,72 \pm 1,65$ e	348b
Quinua (Delgado y Albarracín, 2012)	$11,74 \pm 0,01$ d	$11,84 \pm 0,64$ a	$2,05 \pm 0,01$ c	NA	$1,74 \pm 0,05$ b	$72,63 \pm 0,08$ e	356,33c

\*Valores expresados en 100 g de base seca—Superíndices diferentes en una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ).

Fuente: elaboración propia.

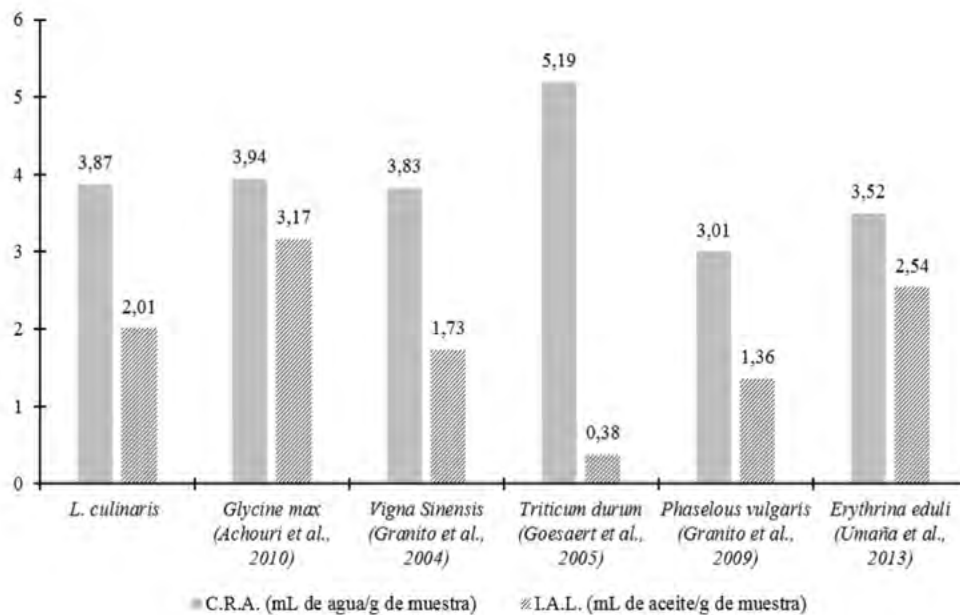
mostró la mayor cantidad de lípidos ( $16,50 \pm 0,54$  %) (Castañeda *et al.*, 2009), seguida por la harina de soya, diferencia que fue significativa respecto a lo hallado en la harina de lentejas ( $p < 0,05$ ), la cual estuvo dentro de las más bajas. Estos resultados pueden incentivar la utilización de la harina de lenteja de la variedad verdina en productos alimenticios de consumo masivo bajos en grasa; aun así es importante la identificación y la cuantificación de los tipos de ácidos grasos que se encuentran en esta harina.

El contenido más alto de fibra lo presentó la harina de *L. culinaris* ( $11,82 \pm 0,53$  %), seguido por la harina de soya ( $7,59 \pm 0,42$  %), la cual es utilizada en productos cárnicos de consumo tradicional, así como en galletas y demás productos de molinería que se comercializan. Así se resalta la importancia del contenido elevado en fibra, lo que podría llevar a que se utilice la harina *L. culinaris*, variedad verdina, en este tipo de productos que brinden al consumidor los beneficios que aporta la fibra en la dieta.

En la harina de lentejas también se encontró un buen contenido de cenizas ( $3,01 \pm 1,34$  %) comparable con la harina de soya ( $4,68 \pm 0,23$  %) ( $p > 0,05$ ), por lo cual sería necesario un estudio más detallado en cuanto al análisis de estos elementos, en esta variedad de lentejas verdes. Por otra parte, se observó un valor superior al de la soya en cuanto el contenido de carbohidratos, sin embargo, por ser harina proteica posee un contenido medio de carbohidratos ( $53,47 \pm 8,38$  % y  $44,99 \pm 7,67$  %), en comparación con la harina de trigo ( $73,72 \pm 1,65$  %), la quinua ( $72,63 \pm 0,08$  %) y el chachafruto ( $62,14 \pm 1,87$  %) (Goesaert *et al.*, 2005; Delgado y Albarracín, 2012).

En la figura 1 se encuentran los datos obtenidos del IAL = Índice de Absorción de Lípidos y capacidad de retención de agua (CRA), los cuales, a su vez, fueron comparados con otras investigaciones.

La capacidad de retención de agua de las harinas se relaciona en gran medida con el tamaño de las partículas, con la cantidad de grupos hidroxilos libres capaces de interactuar con el agua externa y con



**Figura 1.** Propiedades funcionales de la harina de *L. culinaris* y otras de uso común en la elaboración de productos cárnicos tipo salchicha

**Fuente:** elaboración propia.

la cantidad de fibra soluble de las mismas (Achouri *et al.*, 2010; Umaña, Lopera y Gallardo, 2013).

El valor promedio de CRA reportado para la harina de trigo fue significativamente mayor al de la harina *L. culinaris* ( $p < 0,05$ ); esta diferencia puede ser atribuida a un mayor contenido de carbohidratos, ya que los azúcares libres tienden a hidratarse con mayor facilidad y a un menor tamaño de las partículas en estas harinas, pues teóricamente cuanto menor sea este, la facilidad de hidratación aumenta, debido a la superficie de contacto que se tiene (Goesaert *et al.*, 2005; Granito *et al.*, 2009). Una de las características que posee la CRA como propiedad funcional en productos cárnicos radica en su relación con las proteínas, macromoléculas que tienen la capacidad de interactuar con el agua formando puentes de hidrógeno por los grupos polares que estos compuestos tienen, proporcionando la capacidad de hidratación, hinchamiento, solubilidad, viscosidad y gelación (De la Torre-Gutiérrez, Chel-Guerrero, Betancur-Ancona, 2008).

En su estudio, Liu *et al.* (2008) indicaron que la CRA de una muestra de harina no es necesariamente una función de su contenido proteico, y que la presencia de componentes no proteicos puede también influir sobre esta. Por su parte, Oshodi y Ekperigin (1989) demostraron que el tratamiento térmico húmedo desnaturaliza las proteínas; debido a este efecto, incrementa la accesibilidad a dicha proteína y, en consecuencia, a los aminoácidos polares, los cuales tienen una gran afinidad por el agua, produciéndose un incremento en la CRA. Valores de absorción de agua mayores a 300 % (3,0g de agua/g de muestra) pueden favorecer la textura de productos de panadería (Achouri *et al.*, 2010) y además esta propiedad es importante en una variedad de alimentos cárnicos en los cuales se requiere retener agua durante su elaboración (Ambrosiadis, Soutos, Abraham y Bloukas, 2004). Por tanto, la harina de *L. culinaris*, cuyo valor de CRA superó el mencionado, puede representar una alternativa importante para enriquecer mezclas de harinas en la elaboración galletas, tortas, panes, así como en la preparación de productos cárnicos.

El IAL, que se relaciona con el número de cadenas laterales no polares de las proteínas que se enlazan con cadenas hidrocarbonadas de grasa (Granito, Pérez y Suhey, 2009), es una propiedad importante en la formulación de embutidos cárnicos, en productos de panadería y sopas. Los lípidos pueden interactuar de diferentes maneras con las proteínas, básicamente a través de puentes hidrófobos (Achouri *et al.*, 2010; Boye *et al.*, 2010).

En productos cárnicos emulsionados, las proteínas de soya promueven la absorción y retención de grasa, por tanto se disminuyen las pérdidas durante la cocción y se mantiene la estabilidad dimensional. El IAL de la harina de *L. culinaris* fue de 2,01 ml de aceite/g de muestra; menor a lo reportado para la harina de *Glycine max* (3,17 ml de aceite/g de muestra), pero mayor a la harina de *Vigna Sinensis* (1,73 ml de aceite/g de muestra), *Triticum durum* (0,38 ml de aceite/g de muestra) y *Phaselous vulgaris* (1,36 ml de aceite/g de muestra) y muy similar a la harina de *Erthrina edulis* (2,54 ml de aceite/g de muestra), lo cual es un indicador de que puede ser empleada en productos cárnicos, porque promueve la absorción y retención de grasa, lo que en consecuencia, podría ayudar a disminuir las pérdidas durante el escaldado y a mantener la estabilidad de la emulsión (Marchetti, Andrés y Califano, 2014). La habilidad para absorber y retener dichos compuestos es un indicativo de la capacidad que tienen las proteínas para enlazar agua, que influye drásticamente en la textura y las propiedades sensoriales de los productos a consumir (Goesaert *et al.*, 2005). La absorción de aceite es atribuida a la retención física de la grasa por atracción capilar y al enlace que se forma con la cadena apolar proteica, de allí que la hidrofobicidad de las proteínas ejerza un papel importante sobre la absorción de la grasa (Jaimes, Restrepo y Acevedo, 2014). El conocimiento de la absorción de aceite es importante en la ingeniería de alimentos, ya que determina características del producto, como el sabor, la palatabilidad y la vida útil (Oshodi y Ekperigin, 1989).

En la tabla 3 se esquematizan los resultados de los análisis bromatológicos obtenidos de la salchicha con harina de *L. culinaris* y la salchicha comercial elaborada con harina de soya.

**Tabla 3.** Composición bromatológica de la salchicha con harina de *L. culinaris*, respecto a una comercial

Componente (g/100g)*	Salchicha con <i>L. culinaris</i>	Salchicha comercial
Humedad	57,81±0,82a	59,43± 0,02a
Ceniza	3,71±0,09a	3,65± 0,17a
Proteína	18,33±0,66a	17,98± 0,09a
Grasa	16,13±0,44a	16,36± 0,09a
Carbohidratos	2,82±0,09a	2,80± 0,03a
Fibra	0,97±0,040	ND

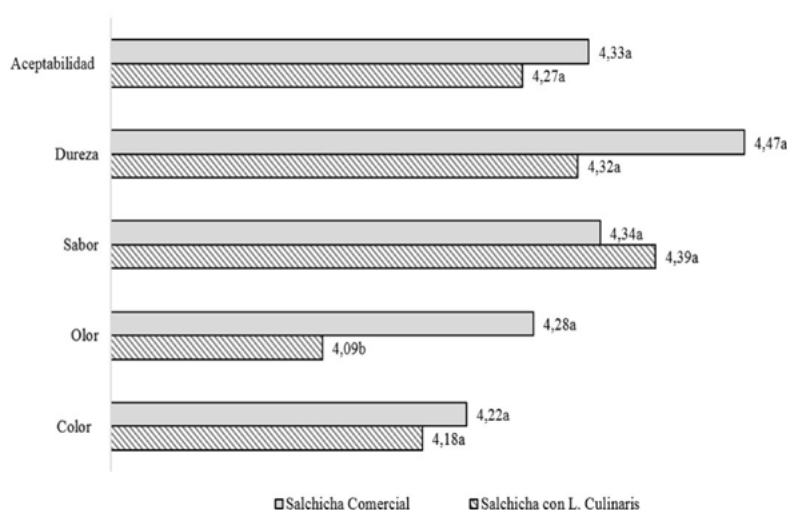
\*Letras diferentes en una misma fila indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ); ND = no detectada.

**Fuente:** elaboración propia.

En relación al contenido de proteínas para las salchichas en estudio y la salchicha patrón, no se observaron diferencias estadísticas (18,33±0,66 y 17,98±0,09), debido, posiblemente, a que las harinas de ambas leguminosas poseían un contenido de proteína similar.

Con respecto a la grasa de las salchichas evaluadas, el contenido se encontró dentro de los rangos reportados por otros autores como Dzudie, Scher y Hardy (2002), destacando en la salchicha con *L. culinaris* de 16,13±0,44 y la salchicha comercial de 16,36± 0,09g/100g de muestra. En relación al contenido de carbohidratos, no se observaron diferencias significativas con la salchicha patrón (2,82±0,09 y 2,80±0,03 %). En cuanto al contenido de fibra dietética total, en la salchicha comercial no se registró, y en las salchichas con harina de *L. culinaris* fue de 0,97±0,04. La fibra en productos cárnicos es deseable porque el sabor es neutro y retiene agua, lo cual conserva la frescura del producto. Astaíza, Ruíz y Elizalde (2010) estudiaron la harina de quinua en pastas alimenticias, de lo cual lograron resultados satisfactorios en cuanto a calidad, composición nutricional y disminución de costos. Las proteínas se han utilizado en la elaboración de productos cárnicos con el fin de aumentar el rendimiento, las propiedades ligantes de agua, grasa y el valor nutritivo, así como cambiar las propiedades funcionales (Zhang *et al.*, 2010).

En la figura 2, se muestran los resultados de los análisis sensoriales de las salchichas elaboradas con harina de *L. culinaris*, en cuanto a olor, sabor,



**Figura 2.** Aceptabilidad de las salchichas elaboradas con harina de *L. culinaris*, respecto a una salchicha comercial

**Fuente:** elaboración propia.



color, textura y aceptabilidad, y se compararon con una salchicha comercial. Cada característica representa los valores promedios de las calificaciones hechas por los panelistas. Se observa que la formulación con harina *L. culinaris* presentó en general buena aceptación general, con lo que se sobrepasó el umbral mínimo de aceptación de 3,0. La percepción del color y la dureza en la salchicha comercial fue ligeramente mayor que la salchicha con *L. culinaris*, sin embargo esta diferencia no fue estadísticamente significativa ( $p > 0,05$ ).

Al compararse el olor entre las muestras analizadas, se observó que el promedio para ambos productos sobrepasó la calificación de 4,0, siendo este puntaje ligeramente más alto en las salchichas comerciales, respecto a las elaboradas con harina de *L. culinaris* ( $p < 0,05$ ). Los panelistas indicaron una mejor percepción del sabor en las salchichas elaboradas con harina de lentejas, lo cual indica que la adición de este producto fue favorable en la calidad organoléptica de los embutidos. En la tabla 4 se detallan los datos obtenidos de los recuentos microbiológicos de las muestras de salchichas con *L. culinaris*, comparadas con los requisitos mínimos establecido en la NTC 1325.

En la formulación utilizada, todos los valores de los análisis microbiológicos estuvieron por debajo de lo establecido en las Normas Técnicas Colombianas (Icontec, 2008).

Los valores de las unidades formadoras de colonias cuantificadas en los análisis de las salchichas

fueron, posiblemente de los microorganismos procedentes de la materia prima, condimentos o especias usados que podían contener esporas que no se vieron afectadas por el proceso térmico y que pueden ser causantes del deterioro de los productos finales, si estos no se almacenan adecuadamente. Los coliformes totales se encuentran en el medio ambiente, por tal razón es normal encontrarlos en muchos productos, como los embutidos cárnicos (Granados *et al.*, 2013). En el presente estudio los niveles de estos fueron bajos.

Las materias primas que se utilizaron fueron manejadas bajo normas de calidad para evitar al máximo la contaminación microbiana; los aditivos y demás especias fueron manipulados teniendo la formulación, para así no producir un exceso de estos. Investigaciones realizadas por Hleap, Gutiérrez y Rivera (2010) y Arief *et al.* (2014), llegaron a la conclusión de que para obtener un bajo conteo de microorganismos, se debe recurrir a materias primas frescas y a un buen manejo sanitario, a su vez adecuadas temperaturas en los diferentes tratamientos térmicos, además se debe realizar un rápido enfriamiento del producto y utilizar un empaque apropiado.

En la tabla 5 se muestran los valores obtenidos de los parámetros mecánicos de textura, comparados con la salchicha comercial cuyos componentes se esquematizan en la tabla 3. En los productos cárnicos se considera la dureza, uno de los factores más importantes que determinan la calidad

**Tabla 4.** Análisis microbiológicos a la salchicha con *L. culinaris* y comparación con la normatividad

Parámetros evaluados	Valores NTC 1325 (Log 10 UFC/g)	Salchicha con harina de <i>L. culinaris</i> (Log 10 UFC/g)
Aerobios mesófilos	<4,47a	<4,18b
Coliformes totales	<2,69a	<2,05b
Coliformes fecales	0,00	0,00
<i>Staphylococcus aureus</i> coagulasa positivo	<2,00a	<1,47b
<i>Escherichia coli</i>	Ausencia	Negativo
<i>Salmonella</i> 25/g	Ausencia	Negativo

**Fuente:** elaboración propia.

(Torres, González, Acevedo, 2015). En cuanto al análisis del perfil de textura, la salchicha comercial presentó una mayor dureza con  $31,90 \pm 3,15$  N en comparación con la salchicha elaborada con harina de *L. culinaris* ( $29,9 \pm 3,80$  N); sin embargo esta diferencia no fue estadísticamente significativa ( $p > 0,05$ ). En los embutidos son distintos los resultados de los TPA, ya que depende del tipo de carne utilizada, así como de las materias primas empleadas en la elaboración como grasa, ligantes u extensores (Herrero *et al.*, 2008). Investigaciones como la realizada por Cortes *et al.* (2010), indican que las salchichas elaboradas únicamente con carne de pollo, fueron menos duras que las fabricadas con carne de pavo, así mismo estos autores concluyen que la incorporación de extensores modifica la dureza de los productos cárnicos.

Por su parte la adhesividad de la salchicha con *L. culinaris* se encontró dentro del rango reportado por otros autores (Granados, Guzmán y Acevedo, 2013; Herrero *et al.*, 2008), y respecto a la salchicha comercial no hubo diferencias significativas ( $p > 0,05$ ), lo cual se le atribuye al contenido de humedad similar en estos dos productos.

La cohesividad representa la fuerza con la que están unidas las partículas de un alimento, o el límite hasta el cual se puede deformar un material antes de romperse, es adimensional (Torres, González-Morelo, Acevedo, 2015). La cohesividad de la salchicha realizada con harina de *L. culinaris* fue

de  $0,28 \pm 0,07$ , lo cual no presentó diferencias estadísticamente significativas respecto a la salchicha comercial ( $0,32 \pm 0,08$ ), es decir, se requirió menos fuerza para quebrantar los enlaces de la estructura pertenecientes a la matriz de la salchicha elaborada en esta investigación, resultados que coinciden con los reportados por Montero *et al.* (2015) en la elaboración de un embutido tipo salchicha al cual se le incorporó pasta de ajonjolí y plasma sanguíneo. La elasticidad es el parámetro mecánico de textura que indica qué tanto se ha deformado la estructura de un producto cuando se somete a una fuerza de compresión; así mismo, mide cuánta estructura original del alimento se ha roto, es adimensional, ya que es una longitud dividida por otra (Torres, González-Morelo y Acevedo, 2015). Los resultados obtenidos en esta investigación, señalan que la salchicha con *L. culinaris* fue un producto elástico al igual que el producto control, el cual no presentó diferencias significativas entre los valores hallados ( $p > 0,05$ ).

La masticabilidad representa el trabajo necesario para desintegrar un alimento hasta que esté listo para ser deglutido (Herrero *et al.*, 2008; Montero *et al.*, 2015). En esta investigación se encontró que la masticabilidad para la salchicha comercial fue ligeramente mayor al compararse con la salchicha elaborada con harina de *L. culinaris*; sin embargo no hubo diferencias significativas entre los dos promedios ( $p > 0,05$ ).

**Tabla 5.** Análisis de perfil de textura de salchichas con harina de *L. culinaris* y salchicha comercial

Parámetros texturales*	Salchicha con harina de <i>L. culinaris</i>	Salchicha comercial	Análisis de Varianza
			p-valor
Dureza (N)	$29,97 \pm 3,80a$	$31,90 \pm 3,15a$	0,33
Adhesividad (N)	$-0,29 \pm 0,06a$	$-0,23 \pm 0,08a$	0,09
Cohesividad (adimensional)	$0,28 \pm 0,07a$	$0,32 \pm 0,08a$	0,27
Elasticidad (adimensional)	$0,92 \pm 0,02a$	$0,95 \pm 0,01a$	0,43
Masticabilidad (kg)	$7,72 \pm 1,29a$	$10,28 \pm 2,87a$	0,35

\*Letras diferentes en una misma fila indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ )

**Fuente:** elaboración propia.

En general, el comportamiento de los parámetros texturales para la salchicha elaborada con *L. culinaris* en esta investigación fue similar al reportado por Sánchez-Zapata *et al.* (2011) en un producto cárnico cocido tipo *bologna* elaborado con pasta de dátil. Los resultados de esta investigación pueden ayudar a entender los cambios en los parámetros de textura de productos cárnicos en los que se adicione este tipo de harina de lenteja de la variedad verdina.

## CONCLUSIONES

El contenido de proteína de la harina fue 35,89 %, mientras que el de fibra fue 11,82 %, valores relativamente altos si se comparan con algunas de leguminosas utilizadas para la elaboración de embutidos cárnicos. Los valores de capacidad de retención de agua y absorción de aceite de la harina de lentejas fueron de 3,87 ml agua/g de harina y 2,01 ml de aceite/g de muestra, estos estuvieron dentro de lo reportados en harinas de leguminosas de uso común. En las salchichas elaboradas con harina de lentejas no se presentaron valores bromatológicos estadísticamente diferentes respecto a las salchichas comerciales, los recuentos microbianos estuvieron dentro de lo reportado por las normas técnicas colombianas. La harina de lenteja influyó positivamente en la aceptabilidad de las salchichas, lo cual fue similar a los obtenidos en las salchichas comerciales, elaboradas con harina de soya. La utilización de harina de *L. culinaris* fue favorable en todos los parámetros de textura de las salchichas. Es posible el uso de la harina *L. culinaris* para obtener salchichas de buena calidad y se plantea como una alternativa para la industria alimentaria, en la elaboración de nuevos productos que puedan suplir las necesidades de la población más vulnerable.

## FINANCIAMIENTO

Este estudio fue financiado por los autores en el año 2015, en el desarrollo de actividades de

investigación del Grupo Nutrición, Salud y Calidad Alimentaria (NUSCA), adscrito a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cartagena; a su vez se resalta que el manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaran que no existe ningún conflicto de interés que ponga en riesgo la validez de los resultados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achouri, A.; Boye, J.I.; Belanger, D.; Chiron, T.; Yaylayan, V.A. y Yeboah, F.K. (2010). Functional and molecular properties of calcium precipitated soy glycinin and the effect of glycation with  $\kappa$ -carrageenan. *Food Research International*, 43(5), 494-504.
- Alvis, A.; Vélez, C.A. y Rada-Mendoza, M. (2008). Composición de ñames frescos cultivados en Colombia y sometidos al freído por inmersión. *Información Tecnológica*, 19(1), 3-10.
- Ambrosiadis, J.; Soutos, N.; Abraham, A. y Bloukas, J.G. (2004). Physicochemical, microbiological and sensory attributes for the characterization of Greek traditional sausages. *Meat Science*, 66(2), 279-87.
- AOAC International. (2005). *Official methods of analysis of AOAC International*. Recuperado de: [http://www.aoac.org/aoac\\_prod\\_imis/AOAC/Publications/Official\\_Methods\\_of\\_Analysis/AOAC\\_Member/Pubs/OMA/AOAC\\_Official\\_Methods\\_of\\_Analysis.aspx?hkey=5142c478-ab50-4856-8939-a7a491756f48](http://www.aoac.org/aoac_prod_imis/AOAC/Publications/Official_Methods_of_Analysis/AOAC_Member/Pubs/OMA/AOAC_Official_Methods_of_Analysis.aspx?hkey=5142c478-ab50-4856-8939-a7a491756f48)
- Arief, I.; Wulandari, Z.; Aditia, E.L.; Baihaqi, M. y Noraimah, H. (2014). Physicochemical and Microbiological Properties of Fermented Lamb Sausages Using Probiotic *Lactobacillus plantarum* IIA-2C12 as Starter Culture. *Procedia Environmental Sciences*, 20(1), 2-6.
- Astaíza, M.; Ruíz, L. y Elizalde, A. (2010). Elaboración de pastas alimenticias enriquecidas a partir de harina de quinua (*Chenopodium quinoa wild.*) y zanahoria (*Daucus carota*). *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 8(2), 43-53.
- Benjumea, M.V.; Estrada, A. y Álvarez, M.C. (2006). Dualidad de malnutrición en el hogar antioqueño

- (Colombia): bajo peso en los menores de 19 años y exceso de peso en los adultos. *Revista Chilena de Nutrición*, 33(1), 32-42.
- Bermúdez, S. (1994). Preparación y determinación de propiedades funcionales de concentrados proteicos de haba (*Vicia faba*). *Revista Colombiana de Química*, 23(1), 4-8.
- Boye, J.I.; Aksay, S.; Roufik, S.; Ribéreau, S.; Mondor, M.; Farnworth, E. Y Rajamohamed, S.H. (2010). Comparison of the functional properties of pea, chickpea and lentil protein concentrates processed using ultrafiltration and isoelectric precipitation techniques. *Food Research International*, 43(2), 37-46.
- Castañeda, B.; Manrique, R.; Gamarra, F.; Jáuregui, A.M. y Ramos, F. (2009). Formulación y elaboración preliminar de un yogur mediante sustitución parcial con harina de tarwi (*Lupinus mutabilis sweet*). *Medicina Naturista*, 3(1), 5-12.
- Cortes, M.; Quezada, E.; Nieto, M.; Alfaro, R.; Güemes, N.; Hernández, J. y Soto, S. (2010). Textura de salchichas elaboradas con mezclas de carne de pavo y pollo. *Salud Pública y Nutrición*, 20(1), 1-4.
- Delgado, N. y Albarracín, W. (2012). Microestructura y propiedades funcionales de harinas de quinua (*Chenopodium Quinoa W*) y chachafruto (*Erythrina edulis*): potenciales extensores cárnicos. *Vitae*, 9(1), S430-S432.
- De la Torre-Gutiérrez, L.; Chel-Guerrero, L.A. y Bentancur-Ancona, D. (2008). Functional properties of square banana (*Musa balbisiana*) starch. *Food Chemistry*, 106(3), 38-44.
- Dzudie, T.; Scher, J. y Hardy, J. (2002). Common bean flour as an extender in beef sausages. *Journal of Food Engineering*, 52(2), 143-147.
- Gharibzahedi, S.M.T.; Emam-Djomeh, Z.; Razavi, S.H. y Jafari, S.M. (2014). Mechanical behavior of lentil seeds in relation to their physicochemical and microstructural characteristics. *International Journal of Food Properties*, 17(3), 545-558.
- Goesaert, H.; Brijs, K.; Veraverbeke, W.S.; Courtin, C.M.; Gebruers, K. y Delcour, J.A (2005). Wheat flour constituents: how they impact bread quality, and how to impact their functionality. *Trends in Food Science & Technology*, 6(3), 12-30.
- Granito, G.J.; Pérez, D. y Suhey, P. (2009). Valor nutricional y propiedades funcionales de *Phaseolus Vulgaris* procesada: un ingrediente potencial para alimentos. *Interciencia*, 34(2), 64-70.
- Granados, C., Guzmán, L.E., Acevedo, D. (2013). Análisis proximal, sensorial y de textura de salchichas elaboradas con subproductos de la industria procesadora de atún (*scombridae thunnus*). *Información Tecnológica*, 24(6), 29-34.
- Guavita, M.J.M. (2012). Gestión del análisis de peligros y puntos críticos de control. *Tecnura: Tecnología y Cultura Afirmando el Conocimiento*, 16(33), 189-202.
- Herrero, A.M.; De la Hoz, L.; Ordóñez, J.A.; Herranz, B.; De Ávila, M.R. y Cambero, M.I. (2008). Tensile properties of cooked meat sausages and their correlation with texture profile analysis (TPA) parameters and physico-chemical characteristics. *Meat Science*, 80(3), 690-696.
- Hleap, J.I.; Gutiérrez, A. y Rivera, L.J. (2010). Análisis microbiológico y sensorial de productos elaborados a partir de surimi de carduma (*Cetengraulis mysticetus*) y plumuda (*Opisthonema spp.*). *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 8(4), 57-65.
- Hleap, J.I. y Velasco, V.A. (2012). Parámetros físico-químicos durante el almacenamiento de salchichas elaboradas a partir de tilapia roja (*Oreochromis sp.*). *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 10(1), 42-50.
- Jaimes, J.D.C.; Restrepo, D. y Acevedo, D. (2014). Preparación y determinación de las propiedades funcionales del concentrado proteico de trupillo (*Prosopis juliflora*). *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 12(1), 144-52.
- Jaimes, J.D.C.; Torres, J.D. y Severiche, C.A. (2015). Análisis de la calidad de un producto carnico escaldado elaborado con harina de *Prosopis juliflora*. *Ingenium*, 9(26), 21-28.
- Joshi, M.; Adhikari, B.; Panozzo, J. y Aldred, P. (2010). Water uptake and its impact on the texture of lentils (*Lens culinaris*). *Journal of Food Engineering*, 100(1), 61-69.

- Liu, C.; Wang, X.; Ma, H.; Zhang, Z.; Gao, W. y Xiao, L. (2008). Functional properties of protein isolates from soybeans stored under various conditions. *Food Chemistry*, 111(1), 29-37.
- Marchetti, L.; Andrés, S.C. y Califano, A.N. (2014). Low-fat meat sausages with fish oil: Optimization of milk proteins and carrageenan contents using response surface methodology. *Meat Science*, 96(3), 297-303.
- Montero, P.M.; Acevedo, D.; Arnedo, A.J. y Miranda, N.K. (2015). Efecto de la incorporación de plasma sanguíneo y pasta de ajonjolí en la fabricación de un embutido tipo salchicha. *Información Tecnológica*, 26(6), 55-64.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec). NTC 1325. Norma colombiana sobre productos cárnicos no enlatados. Bogotá.
- Olmedilla-Alonso, B.; Farré-Rovir, R.; Asensio-Vegas, C. y Martín-Pedrosa, M. (2010). Papel de las leguminosas en la alimentación actual. *Actividad Dietética*, 14(2), 72-6.
- Olmedilla-Alonso, B.; Jiménez-Colmenero, F. y Sánchez-Muniz, F.J. (2013). Development and assessment of healthy properties of meat and meat products designed as functional foods. *Meat Science*, 95(4), 919-930.
- Oroian, M. (2015). The temperature hydration kinetics of *Lens culinaris*. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. In press, 1-7.
- Ortega-David, E.; Rodríguez, A. y Zamora-Burbano, Á. (2010). Caracterización de semillas de lupino (*Lupinus mutabilis*) sembrado en los Andes de Colombia. *Acta Agronómica*, 59(1), 111-118.
- Oshodi, A.A. y Ekperigin, M.M. (1989). Functional properties of pigeon pea (*Cajanus cajan*) flour. *Food Chemistry*, 34(3), 187-91.
- Restrepo, S.L.; Mancilla, L.P.; Parra, B.E.; Manjarrés, L.M.; Zapata, N.J.; Restrepo-Ochoa, P.A. y Martínez, M. I. (2010). Evaluación del estado nutricional de mujeres gestantes que participaron de un programa de alimentación y nutrición. *Revista Chilena de Nutrición*, 37(2), 18-30.
- Rodríguez, V.; Amorrortu, I. y Álvarez, M.J. (2011). Setting parameters in the cold chain. *Tecnura*, 15(30), 71-81.
- Sánchez-Zapata, E.; Fernández-López, J.; Peñaranda, M.; Fuentes-Zaragoza, E.; Sendra, E.; Sayas, E. y Pérez-Alvarez, J.A. (2011). Technological properties of date paste obtained from date by-products and its effect on the quality of a cooked meat product. *Food Research International*, 44(7), 2401-2407.
- Torres, J.D.; Acevedo, D. y Tirado, D.F. (2015). Análisis de la calidad bromatológica, microbiológica, sensorial y de textura de bollos de mazorca cocidos en ebullición. *Revista RECITEIA*, 14(2), 7-16.
- Torres, J.D.; González-Morelo K. y Acevedo D. (2015). Análisis del perfil de textura en frutas, productos cárnicos y quesos. *Revista RECITEIA: Revisiones de la Ciencia, Tecnología e Ingeniería de los Alimentos*, 14(2), 63-75.
- Umaña, J.; Lopera, S. y Gallardo, C. (2013). Caracterización de harinas alternativas de origen vegetal con potencial aplicación en la formulación. *Alimentos Hoy*, 22(29), 33-46.
- Utrilla, M.C.; García-Ruiz, A. y Soriano, A. (2014). Effect of partial reduction of pork meat on the physicochemical and sensory quality of dry ripened sausages: Development of a healthy venison salchichon. *Meat Science*, 98(4), 85-91.
- Zhang, W.; Xiao, S.; Samaraweera, H.; Lee, E.J. y Ahn, D.U. (2010). Improving functional value of meat products. *Meat Science*, 86(1), 15-31.





## Modelación y simulación computacional del proceso de evaporación osmótica

### Modeling and computational simulation of the osmotic evaporation process

Freddy Forero Longas<sup>1</sup>, Adriana Patricia Pulido Díaz<sup>2</sup>, Sergio Andrés Cabrera Navarro<sup>3</sup>

**Cómo citar:** Forero Longas, F., Pulido Diaz, A. P., & Cabrera Navarro, S. A. (2016). Modelación y simulación computacional del proceso de evaporación osmótica. *Revista Tecnura*, 20(49), 29-44. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.3.a02

**Fecha de recepción:** 10 de octubre de 2014

**Fecha de aceptación:** 15 de febrero de 2016

#### RESUMEN

**Contexto:** Dentro de las tecnologías de procesamiento con membranas, la evaporación osmótica es una alternativa promisoría para la transformación de frutas exóticas, generando productos concentrados que pueden ser usados en la alimentación diaria, siendo más fáciles de consumir, disminuyendo gastos de transporte e incrementando la vida útil.

**Método:** En este trabajo de investigación se estudió y desarrollo una estrategia integral para la modelación y simulación multifísica de los fenómenos de transferencia de masa y movimiento en el proceso de evaporación osmótica, por medio del software Comsol® y Matlab®, usando un enfoque de geometría axial en dos dimensiones como simplificación del módulo real y el método de elementos finitos para la solución numérica, las simulaciones fueron validadas experimentalmente en un sistema de evaporación osmótica a escala de laboratorio.

**Resultados:** Los modelos utilizados y las simulaciones generadas fueron estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ) en predecir el comportamiento del flux, teniendo en cuenta el efecto de la velocidad y temperatura de alimentación, junto con la

velocidad de la salmuera, obteniéndose correlaciones mayores al 96% entre los datos experimentales y los calculados.

**Conclusiones:** Se encontró que para las condiciones estudiadas el modelo difusional Knudsen es el más adecuado en describir la transferencia del vapor de agua a través de la membrana hidrófoba; las simulaciones desarrolladas describen de forma adecuada el proceso de evaporación osmótica, convirtiéndose en una herramienta para el desarrollo más rápido y económico de esta tecnología.

**Palabras clave:** difusión, membrana hidrófoba, transferencia de calor, transferencia de masa.

#### ABSTRACT

**Context:** Within the processing technologies with membranes, osmotic evaporation is a promising alternative for the transformation of exotic fruits, generating concentrated products that can be used in the daily diet, being easier to consume, reducing transportation costs and increasing shelf life.

**Method:** In this research, it was studied and developed a comprehensive strategy for multiphysics modeling and simulation of mass and momentum

<sup>1</sup> Ingeniero Agroindustrial, doctor en Ingeniería de Alimentos, profesor asistente de la Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. Contacto: [freddy.forero@udea.edu.co](mailto:freddy.forero@udea.edu.co)

<sup>2</sup> Ingeniera Agroindustrial, estudiante Doctorado en Ingeniería, Universidad del Valle. Cali, Colombia. Contacto: [adriana.pulido@correounivalle.edu.co](mailto:adriana.pulido@correounivalle.edu.co)

<sup>3</sup> Ingeniero Agroindustrial, coordinador Red Tecnoparque Nodo La Granja-Sena Regional Tolima. Tolima, Colombia. Contacto: [sacabrera40@misena.edu.co](mailto:sacabrera40@misena.edu.co)

transfer phenomena in the process of osmotic evaporation through Comsol® and Matlab® software. It was used an axial geometry approach in two dimensions as simplifications of real module and the finite element method for the numerical solution. The simulations were validated experimentally in an osmotic evaporation system of laboratory scale.

**Results:** The models used and the generated simulations were statistically significant ( $p < 0,05$ ) in predicting the flux behavior, taking into account the effect of flow and temperature feed together with the

brine flow, being obtained correlations above 96% between experimental and calculated data.

**Conclusions:** It was found that for the conditions studied the Knudsen diffusion model is most suitable to describe the transfer of water vapor through the hydrophobic membrane. Simulations developed adequately describe the process of osmotic evaporation, becoming a tool for faster economic development of this technology.

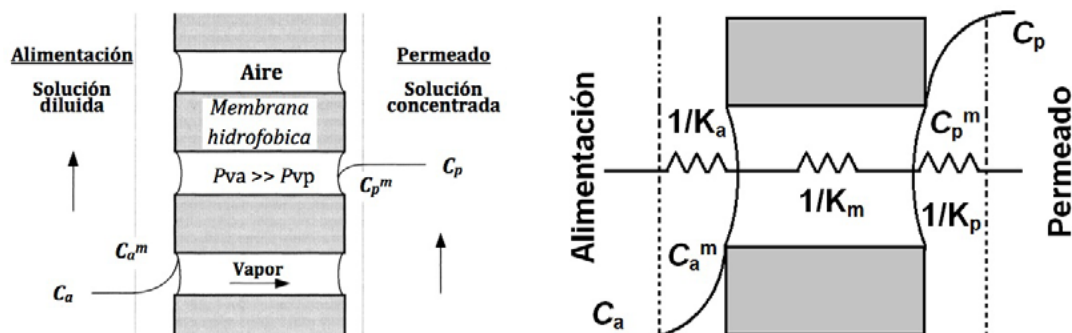
**Keywords:** diffusion, hydrophobic membrane, heat transfer, mass transfer.

## INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de membranas tienen ventajas sobre otros procesos de conservación, ya que las características del producto se mantienen mejor, se utilizan temperaturas bajas; además existen requerimientos de energía bajos, reducidas exigencias de espacio y flexibilidad para operar. Entre esta gama de operaciones con membranas, la concentración por evaporación osmótica (EO) tiene potencial para ser usada en las industrias cosmética, alimentaria, farmacéutica y química; igualmente, esta técnica ha generado mucho interés en el campo de los concentrados de jugos de frutas, vegetales, café instantáneo, leche, té y otros materiales sensibles al calor (Shaw *et al.*, 2001; Vaillant *et al.*, 2012; Valdés *et al.*, 2013), debido a que se realiza a temperatura ambiente, presión

atmosférica y condiciones isotérmicas (Bailey *et al.*, 2012; Nii, Jebson y Cussler, 2002) disminuyendo el pardeamiento no enzimático, pérdida de aromas, degradación de color y sabor.

En la concentración osmótica, el transporte de materia (figura 1A) se divide en tres fases: las etapas inicial y final son el movimiento de agua, desde el producto diluido a través de la interface y desde la zona de condensación, hacia la solución concentrada; la etapa intermedia es cuando el vapor pasa a través de la membrana (Romero, 2003; Thanedgunbaworn, Jiratananon y Nguyen, 2009). El diferencial de presión en la membrana se produce con soluciones salinas como el  $MgSO_4$ ,  $MgCl_2$ ,  $CaCl_2$ ,  $NaCl$ , y líquidos como el glicerol, que tienen alta solubilidad, baja actividad de agua y alta tensión superficial. El sistema básico para



**Figura 1.** A) Principio del proceso. B) Perfil de concentraciones y resistencia a la transferencia de materia en la EO

**Fuente:** elaboración propia.

describir la transferencia de masa está dado en la ecuación (1) donde se relaciona el flux ( $N$ ) y el diferencial de presiones, por medio de una constante ( $K$ ) que es la permeabilidad de la membrana (Alves y Coelho, 2004; Cassano *et al.*, 2003).

$$HHV = 0.312FC + 0.1534VM \quad (1)$$

$$K = \left( \frac{1}{K_a} + \frac{1}{K_m} + \frac{1}{K_p} \right)^{-1} \quad (2)$$

Como las condiciones existentes en la interface no siempre están disponibles, una representación más completa del proceso está dada por la ecuación , donde el coeficiente global  $K$  integra varias resistencias a la transferencia de masa (figura 1B).

Puesto que en los poros de la membrana existe aire, solo dos formas de difusión participan en la transferencia de agua, difusión Knudsen y molecular, según la teoría cinética de los gases (Thandgunbaworn, Jiratananon y Nguyen, 2007a). El número de Knudsen ( $Kn$ ) definido por la ecuación se usa para estimar cuál de los mecanismos de difusión es el predominante, comparando la trayectoria media libre ( $\lambda$ ) de la molécula (ecuación 4) que se difunde con el radio de los poros en la membrana (Qtaishat, Matsuura, Kruczek y Khayet, 2008).

$$Kn = \frac{\lambda}{2r} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{k_b T}{P \sqrt{2\pi\sigma^2}} \quad (4)$$

Para un tamaño de poro relativamente pequeño,  $Kn \geq 10$ , las moléculas tienden a colisionar frecuentemente con las paredes del poro y el modelo Knudsen representado por las ecuaciones y (6) es el más conveniente.

$$N = K_m^k (P_{wa} - P_{wp}) \quad (5)$$

$$K_m^k = \frac{1}{3} \frac{\varepsilon d_p}{\chi \delta} \sqrt{\frac{8M}{\pi RT}} \quad (6)$$

Cuando los poros son grandes,  $Kn \leq 0,01$ , las moléculas de gas colisionan más frecuentemente entre sí, la difusión molecular es considerada

predominante (Celere y Gostoli, 2002) y el flujo de vapor puede ser descrito por las ecuaciones , (8) y (9) donde  $P_{Alm}$  es la presión media logarítmica dentro de los poros y  $D$  (*coeficiente difusional*) es función de la temperatura y la presión.

$$N = K_m^M \frac{P_{wa} - P_{wp}}{P_{Alm}} \quad (7)$$

$$K_m^M = \frac{\varepsilon M PD}{\chi \delta RT} \quad (8)$$

$$\frac{PD}{T^0} = const \quad (9)$$

Por último, en la región de transición,  $0,01 < Kn < 10$ , los dos fenómenos se combinan y en este caso la mejor opción es utilizar un modelo mixto como el de la ecuación (10) con una permeabilidad del tipo  $K_m^{kM}$  planteada por la ecuación (11), en la cual se incluye el término  $P_{Alm}$  que tiene en cuenta el efecto del aire presente en los poros.

$$K_m^{kM} = \left[ 3 \frac{\chi \delta}{\varepsilon d_p} \sqrt{\frac{\pi RT}{8M}} + \frac{\chi \delta RT}{\varepsilon M PD} \right]^{-1} \quad (10)$$

$$\frac{1}{K_m^{kM}} = \frac{1}{K_M} + \frac{1}{P_{Alm} K_k} \quad (11)$$

El flux de vapor en las zonas de polarización del lado de la alimentación y del permeado se expresa por las ecuaciones y ; algunas investigaciones desprecian esta polarización cuando la alimentación es solo agua, y en condiciones donde se cuantifican otros parámetros de la membrana (Courel *et al.*, 2000; Courel *et al.*, 2001).

$$N = k_a (C_a - C_a^m) \quad (12)$$

$$N = k_p (C_p - C_p^m) \quad (13)$$

Al tener en cuenta la resistencia por polarización, las concentraciones en las capas límites son calculadas por el modelo presentado en las ecuaciones y , donde no se tiene en cuenta el cambio de la distribución de la capa en el módulo.

$$C_a^m = C_a \exp\left(\frac{N}{\rho_w k_a}\right) \quad (14)$$

$$C_p^m = C_p \exp\left(\frac{-N}{\rho_w k_p}\right) \quad (15)$$



En módulos de fibras huecas, se aplican modelos semiempíricos para estimar el coeficiente  $k_a$ , con lo cual el flujo de alimentación al interior de la fibra se asimila al de una tubería, con la ecuación de Sieder-Tate y las respectivas para transferencia de materia, ecuaciones y (Martínez-Díez, Florido-Díaz y Vázquez-González, 2000).

$$Si \quad Gz = Re \cdot Pr \cdot \frac{d_h}{L} \geq 100$$

$$Sh = \frac{k_a d_h}{D_w} = 1,86 \left( Re \cdot Sc \cdot \frac{d_h}{L} \right)^{1/3} \quad (16)$$

$$Gz = Re \cdot Pr \cdot \frac{d_h}{L} < 100$$

$$Gzm = Re \cdot Sc \cdot \frac{d_h}{L} \quad (17)$$

$$Sh = \frac{k_a d_h}{D_w} = 3,66 + \frac{0,085 Gzm}{1 + 0,047 Gzm^{2/3}}$$

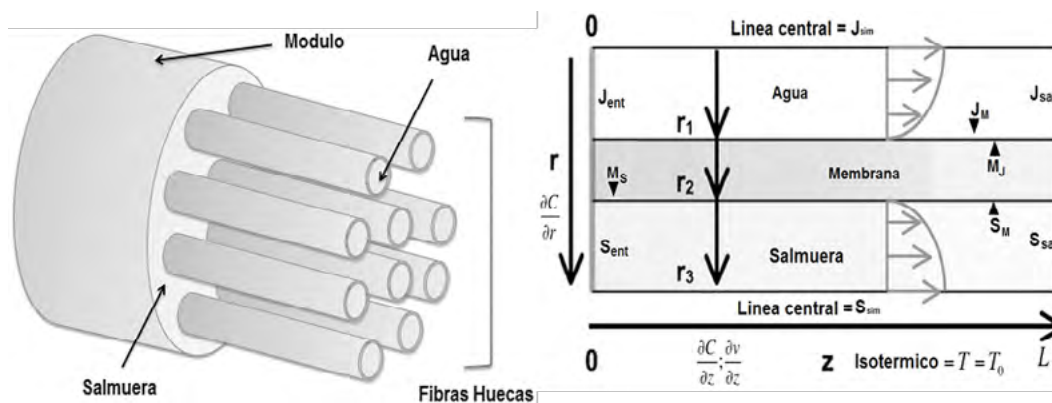
Varios estudios han generado modelos para estimar el coeficiente ( $k_p$ ) al exterior de las fibras (carcasa) (Gawronski y Wrzesinska, 2000; Lipnizki y Field, 2001; Wu y Chen, 2000). Recientemente (Thanedgunbaworn, Jiratananon y Nguyen, 2007b) se ha desarrollado una nueva ecuación, con la cual se logra describir mejor el fenómeno, hallando que el número de Reynolds es función del empaquetamiento ( $\emptyset$ ), tal como se presenta en la ecuación (19).

$$Sh = (-0,45\emptyset^2 + 0,39\emptyset - 0,04) \cdot Re^{(4,01\emptyset^2 - 4,42\emptyset + 1,55)} Sc^{0,33} \quad (18)$$

$$\emptyset = \# Fibras \times \left( \frac{d_o}{d_i} \right)^2 \quad (19)$$

## METODOLOGÍA

El módulo de fibras huecas (MFH) constituye la parte principal del sistema a modelar, cada fibra se compone de un cilindro con radio ( $r$ ) y la longitud ( $z$ ) rodeado por una membrana porosa que actúa de forma independiente, la alimentación (agua) fluye con un comportamiento laminar por dentro de la fibra (lumen), siendo introducido a  $z = 0$ , mientras que la solución de extracción (salmuera) es pasada a través de la carcasa del módulo, provocando la remoción de agua en forma de vapor desde la alimentación y que por subsecuente difusión a través de la membrana es absorbida por la salmuera. La geometría del módulo fue simplificada como se muestra en la figura 2, con el fin de facilitar el análisis y reducir el consumo de recursos computacionales, por lo que se utilizó un enfoque de simetría axial, donde se aprecian tres subdominios lumen, membrana y carcasa, que pueden ser identificados también como agua, membrana y salmuera.



**Figura 2.** Geometría general del módulo de fibras huecas (izq.), dominios y límites para la simetría de la fibra (der)

**Fuente:** elaboración propia.

El modelo de la superficie libre de Happel (Chen, Gao, Jin y Zheng, 2011) fue usado para estimar el radio  $r_3$  en el lado de la salmuera; de acuerdo con este enfoque, se considera que cada fibra en el espacio de la carcasa está rodeada por un fluido envolvente, en el cual no existe transferencia de momento, masa o calor en la superficie externa. Las fibras se consideran homogéneamente distribuidas y el flujo es puramente axial; el módulo es considerado como una serie de celdas de superficies libres, cada celda tiene solo una fibra en el centro y está rodeada de fluido uniforme, matemáticamente la superficie libre es definida por las ecuaciones (20) y (21).

$$r_3 = \left( \frac{1}{1 - \phi} \right)^{1/2} r_2 \quad (20)$$

$$1 - \phi = \frac{n r_2^2}{r_{im}^2} \quad (21)$$

Donde  $\phi$  es la fracción volumétrica de vacío y puede ser calculada usando la ecuación, para cual  $n$  es el número de fibras y  $r_{im}$  es el radio interior del módulo.

### Ecuaciones gobernantes

La ecuación (22) representa el estado estacionario para el transporte de vapor de agua en el lado del lumen ( $C_1$ ) y puede ser escrita como:

$$v_z \frac{\partial C_1}{\partial z} = D_w \left( \frac{\partial^2 C_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_1}{\partial z^2} \right) \quad (22)$$

Donde  $D_w$  es el coeficiente de auto difusión del agua (Holz, Heil y Sacco, 2000) y es descrito por la ecuación (23):

$$D_w = (1,635 \times 10^{-8}) \left( \frac{T}{215,05} - 1 \right)^{2,063} \quad (23)$$

La ecuación es la expresión para el transporte de agua ( $C_2$ ) al interior de la membrana, el cual es considerado debido solamente a la difusión.

$$D_{wa} \left( \frac{\partial^2 C_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_2}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (24)$$

En los poros de la membrana existe aire que viene mezclado con la alimentación y solo la difusión Knudsen ( $D_k$ ) y molecular ( $D_m$ ) están involucradas en la transferencia de vapor; para tener en cuenta estas dos contribuciones y obtener el valor de  $D_{wa}$  que representa el coeficiente de difusión efectivo del vapor de agua en el aire retenido dentro de los poros, se hizo uso de la aproximación de Bousquet representada por las ecuaciones (26) y (27) (Rezazazemi, Shirazian y Ashrafizadeh, 2012):

$$\frac{1}{D_{wa}} = \frac{1}{D_k} + \frac{1}{D_m} \quad (25)$$

$$\text{Donde } D_k = \left( \frac{\varepsilon d_p}{3 \tau} \right) \left( \frac{8 RT}{\pi M_w} \right)^{0,5} \quad (26)$$

$$D_m = \left( \frac{\varepsilon}{\tau} \right) (-2,775 \times 10^{-6} + 4,479 \times 10^{-8} T + 1,656 \times 10^{-10} T^2) \quad (27)$$

En las anteriores ecuaciones,  $\varepsilon$ ,  $\tau$ ,  $d_p$  son la tortuosidad, porosidad y diámetro de poro en la membrana;  $M_w$  la masa molar del agua;  $R$ , constante de los gases;  $T$ , temperatura absoluta. La ecuación (28) calcula la transferencia del vapor de agua en estado estacionario para el lado de la carcasa ( $C_3$ ) del contactor en coordenadas cilíndricas, se obtiene a través de la ley de difusión de Fick:

$$v_z \frac{\partial C_3}{\partial z} = D_{ws} \left( \frac{\partial^2 C_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_3}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_3}{\partial z^2} \right) \quad (28)$$

La difusión del agua en soluciones salinas puede ser vista como la auto difusión del agua retardada por la presencia de los iones en solución, el coeficiente de autodifusión del agua presenta un máximo valor en el límite de la dilución extrema y este tiende a cero en el límite de la sal anhidra (Suárez-Iglesias, Medina, Pizarro y Bueno, 2008). El coeficiente de difusión del agua en la salmuera ( $D_{ws}$ ) puede ser calculado con la ecuación, donde  $D_w$  es determinado con la expresión y  $x_s$  es la fracción de sal en la solución.

$$D_{ws} = D_w \left( 1 - \left( 1 + \left( \frac{\sqrt{x_b}}{0,55} \right)^{-5,52} \right)^{-0,56} \right) \quad (29)$$

## Condiciones límite

A la entrada de una fibra, se asume que el flujo está completamente desarrollado bajo un régimen laminar y se especifica un flujo parabólico según la ecuación (30), y a la salida de la fibra, la presión es la atmosférica, según se especifica en la ecuación (31).

$$z = 0 \rightarrow V_z = V_{atm} \left( 1 - \left( \frac{r}{r_1} \right)^2 \right) \quad (30)$$

$$z = L \rightarrow P = P_{atm} \quad (31)$$

La línea central interna de la fibra es una simetría axial, definida por la ecuación (32).

$$r = 0 \rightarrow \frac{\partial v_z}{\partial r} = 0 \rightarrow v_r = 0 \quad (32)$$

En la superficie de la membrana, la velocidad axial ( $v_z$ ) es establecida como cero (0) o condición de no deslizamiento, especificada por la ecuación (33). A la entrada de una fibra, la concentración inicial de agua en la alimentación (34) es  $C_{j0}$ , la cual corresponde a la inicial.

$$r = r_1 \rightarrow v_z = 0 \quad (33)$$

$$z = 0 \rightarrow C_1 = C_{j0} \quad (34)$$

La condición de frontera para el flujo convectivo asume que la masa que pasa por la frontera  $z = L$  es dominada por la convección. En otras palabras, se supone que el flujo de masa debido a la difusión a través de este límite es cero (35), la línea central de la fibra es una simetría axial (36):

$$z = L \rightarrow -D \frac{\partial C_1}{\partial z} = 0 \quad (35)$$

$$r = 0 \rightarrow \frac{\partial C_1}{\partial z} = 0 \quad (36)$$

En la superficie de la membrana para la concentración ( $C_1$ ), se establece la siguiente condición especial de flux (37), que es descrita más en detalle en las condiciones límite de la membrana.

$$r = J_M \rightarrow -D \frac{\partial C_1}{\partial z} = M(C_2 - K * C_1) \quad (37)$$

Debido a que existen discontinuidades del perfil de concentración en los límites entre los líquidos y la membrana, se deben utilizar tres variables separadas para describir la concentración en las respectivas fases; para obtener un flux continuo a través de los límites, se aplica una condición de frontera especial llamada el método *stiff-spring*, en lugar de definir las condiciones de concentración tipo Dirichlet de acuerdo con el coeficiente de partición ( $K$ ), lo que destruiría la continuidad del flujo. Por medio de las ecuaciones (38) y (39) podemos definir condiciones de flux continuo que, al mismo tiempo, fuerzan las concentraciones a los valores deseados:

$$r = M_J \rightarrow C_2 = C_1 \exp\left(\frac{N}{\rho_w k_a}\right) \quad (38)$$

$$r = M_S \rightarrow C_2 = C_3 \exp\left(\frac{N}{\rho_w k_p}\right) \quad (39)$$

Donde los coeficientes  $k_a$  y  $k_p$  se calculan a partir de las ecuaciones y . Por último, con la ecuación (40) se establece que no hay transferencia de masa en ambos bordes de la membrana:

$$z = 0 \rightarrow z = L \rightarrow -D \frac{\partial C_2}{\partial z} = 0 \quad (40)$$

Para el flujo de salmuera sobre la fibra, el modelo de superficie libre de Happel se usa para caracterizar el perfil de velocidad fuera de las fibras (41). Aunque el flujo en el módulo real de fibras huecas no está absolutamente de acuerdo con el modelo de Happel, este se ha utilizado ampliamente para contactores de membrana (Zhang, Huang, Chi y Pei, 2012).

$$z = 0 \rightarrow v_z = \left( \frac{Q_s}{(\pi \cdot r_m^2) - (n \cdot \pi (r_1 + r_2)^2)} \right) \left( 1 - \left( \frac{r}{r_3} \right)^2 \right) \times \frac{(r/r_3)^2 - (r_2/r_3)^2 + 2 \ln(r_2/r)}{3 + (r_2/r_3)^4 - 4(r_2/r_3)^2 + 4 \ln(r_2/r_3)} \quad (41)$$

A la salida de la carcasa, la presión es la atmosférica y se especifica por la ecuación (42), la línea central entre las fibras se consideró una simetría axial (43).

$$z = L \rightarrow P = P_{atm} \quad (42)$$

$$r = r_3 \rightarrow \frac{\partial v_z}{\partial r} = 0 \rightarrow v_r = 0 \quad (43)$$

En la superficie de la membrana del lado de la salmuera, la velocidad axial ( $v_z$ ) es establecida como cero y siguiendo la ecuación (44), en la entrada de la carcasa, se toma la concentración de agua ( $C_3$ ) presente en el tanque de salmuera, convenientemente convertida en unidades de presión de vapor (45).

$$r = r_2 \rightarrow v_z = 0 \quad (44)$$

$$z = 0 \rightarrow C_3 = C_{s,0} \quad (45)$$

La condición de frontera para el flujo convectivo asume que la masa que pasa por la frontera  $z =$

L es dominada por la convección, se supone que el flujo de masa debido a la difusión a través de este límite es cero (46), la línea central de la fibra es una simetría axial (47).

$$z = L \rightarrow -D \frac{\partial C_3}{\partial z} = 0 \quad (46)$$

$$r = 0 \rightarrow \frac{\partial C_1}{\partial z} = 0 \quad (47)$$

En la superficie de la membrana (lado salmuera) para la concentración ( $C_3$ ), se establece también la condición especial de flux, que se describió en las condiciones de la membrana (48).

$$r = S_M \rightarrow -D_{ws} \frac{\partial C_3}{\partial z} = M(C_2 - K * C_3) \quad (48)$$

Los modelos matemáticos que describen las propiedades físicas de los fluidos involucrados en el proceso de evaporación osmótica se resumen en la tabla 1.

**Tabla 1.** Propiedades físicas de los fluidos

Fluido	Propiedad	Modelo	Fuente
Agua	Presión vapor	$P_V = (10^{8,07-1730,63/(233,42+T)}) \times 133,32$	
	Viscosidad	$\eta = e^{-3,71 + \frac{578,91}{-137,54+T}}$	(Wang, Wang, Duan, An, & Lee, 2014)
	Densidad	$\rho_{H_2O}(\tau) = \rho_{c,H_2O} \left( 1 + B_0 \tau^{\frac{1}{3}} + B_1 \tau^{\frac{2}{3}} + B_2 \tau^{\frac{5}{3}} + B_3 \tau^{\frac{16}{3}} + B_4 \tau^{\frac{43}{3}} + B_5 \tau^{\frac{110}{3}} \right)$	
Salmuera	Presión vapor	$P_V = [(10^{8,07-1730,63/(233,42+T)}) \times 133,32] \times a_w$ $a_w = \frac{1-C}{1-0,83766C} \exp \left[ -86,68 \left( \frac{C}{6,16-5,16C} \right)^2 \right] \times \left[ (-9561,7C^3 + 2853,8C^2 - 422,4C) \times \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{298,15} \right) \right]$	(Bui, Nguyen, & Joachim, 2003)
	Viscosidad	$\mu = 0,0007934 \times \exp(0,3719 * C) \times \exp \left( \frac{2068,075}{T} \right)$	(Bui y Nguyen, 2004)
	Densidad	$\rho_{sol}(x_b, T) = \rho_{H_2O}(T) \sum_{i=0}^3 \rho_i \left( \frac{x_b}{1-x_b} \right)^i$	(Wahab y Mahiuddin, 2001)

Fuente: elaboración propia.

## Solución numérica

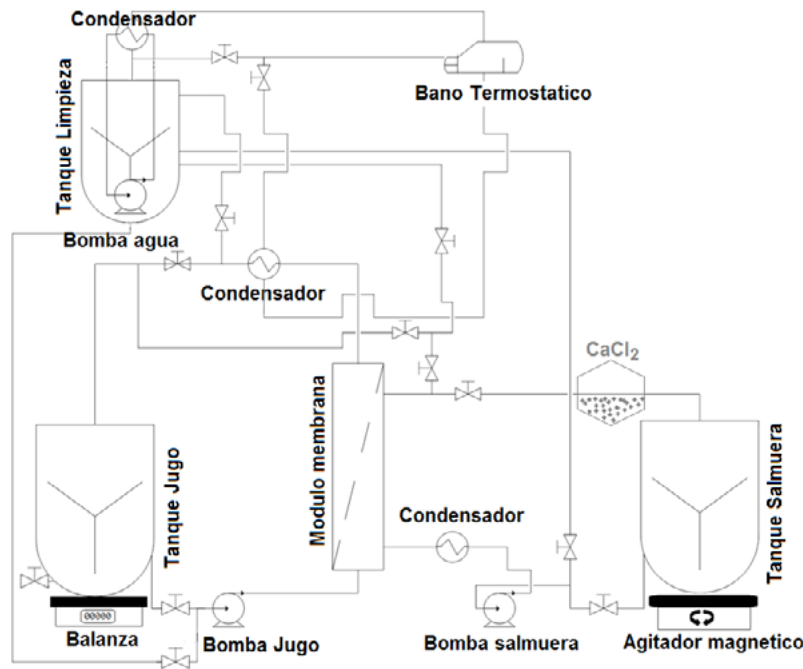
Las ecuaciones del modelo se resolvieron numéricamente desde un enfoque multifísico (Mendieta, Montaña y Noguera, 2012; Puin, Noguera y Caidedo, 2015) por medio del software *Comsol Multiphysics*® 4.2b, conjuntamente con *Matlab*® y la herramienta *LiveLink*®, este software emplea el método de elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés); se usó el solucionador *PARDISO*, la ejecución y resolución se llevó a cabo en un computador personal Intel i7 (4 GHz–16 GB de RAM). El tiempo de cálculo fue de aproximadamente 20 minutos para cada experimento, el número máximo de iteraciones se fijó en 250 y la tolerancia relativa era  $1E-6$ ; se empleó un factor de escala de 50 en la dirección *z*, debido a la gran diferencia entre el radio y la longitud de las membranas. Con el propósito de corroborar el funcionamiento del modelo se compararon estadísticamente (Statgraphics

Centurion XVI) los resultados generados por el software contra datos experimentales de evaporación osmótica en los que se usó agua destilada como alimentación, evaluando por triplicado las condiciones de proceso que se presentan en la tabla 2.

**Tabla 2.** Condiciones de proceso usadas en las simulaciones y validación experimental.

Parámetro	Valores	Unidad
Flujo alimentación	0,25 0,50 1,0 1,50	l / min
Temperatura alimentación	25 30 35 40	°C
Concentración salmuera	44	% p / v
Flujo salmuera	0,2 0,4 0,6 0,8 1,0 1,2 1,6	l / min
Temperatura salmuera	25	°C
Modelo difusión	Knudsen, Fick, Knudsen +Fick	m <sup>2</sup> / s
Densidad mallado	Extragruesa, Gruesa, Normal, Fina	# Elementos

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 3.** Diagrama del sistema de evaporación osmótica

**Fuente:** elaboración propia.

## Validación experimental

El sistema donde se evaporó osmóticamente el agua se presenta en la figura 3, fue utilizado un módulo de fibras huecas que se describe en la tabla 3, se usaron bombas peristálticas con una velocidad de flujo variable para la solución salmuera y el agua, la salmuera fue mantenida constante a concentración del 44 % p/v de cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) por medio de saturación con cloruro nuevo y actividad de agua 0,33 (Aqualab 3TE–Decagon), la relación alimentación/salmuera fue de 1:7 (l), la temperatura del agua se ajustó por medio de un baño termostático, el flux es la pérdida de agua medida cada 10 minutos.

**Tabla 3.** Características del módulo empleado en la experimentación

Característica	Módulo
Modelo	Minimodule Liquicel® 1.7×5.5
Material membrana	Polipropileno X50®
Numero fibras	7400
Diámetro poro ( $\mu\text{m}$ )	0,5
Porosidad (%)	40
Longitud fibra (m)	0,12
Diámetro interno ( $\mu\text{m}$ ) fibra ( $\mu\text{m}$ )	220
Diámetro externo ( $\mu\text{m}$ ) ( $\mu\text{m}$ )	300
Área de contacto ( $\text{m}^2$ )	0,58

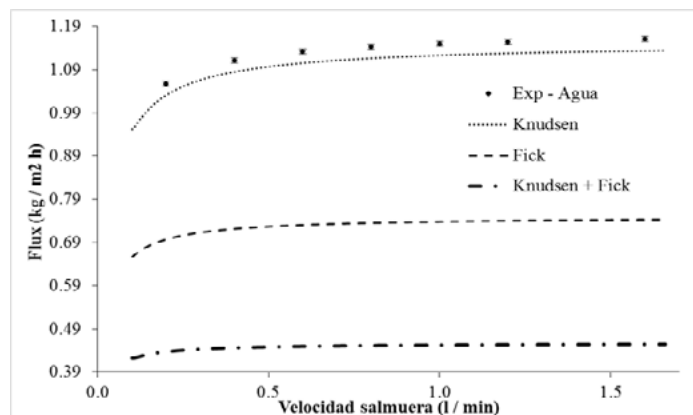
Fuente: elaboración propia.

## RESULTADOS

### Modelo difusivo

Se estableció cuál debería ser el modelo de difusión a utilizar en las posteriores simulaciones, para lo cual se desarrolló un ensayo (triplicado) bajo las siguientes condiciones: flujo “agua” 1 l/min, temperatura 25 °C,  $[\ ]_{\text{sal}}$ : 44 %, flujo salmuera 0,2 – 1,6 l/min, el tamaño de malla fue el sugerido por *Comsol*® y se estableció en “normal”. Al efectuar el Anova para comparar los tres modelos utilizados y los datos experimentales se encontraron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ), a un nivel del 95 % de confianza. Al realizar la prueba de rangos múltiples (LSD) se encontró que las predicciones generadas por *Comsol*® usando el mecanismo difusional tipo Knudsen, no presentaron diferencias significativas. En la figura 4 se presentan los flux predichos con los modelos contra los valores experimentales; el mejor ajuste, presentado por el modelo Knudsen, se explica por el pequeño tamaño de poro que tiene la membrana (0,51  $\mu\text{m}$ ), lo cual produce  $Kn \geq 10$ , en donde las moléculas tienden a colisionar frecuentemente con las paredes del poro siendo el modelo Knudsen más conveniente (Liu y Wei, 2014).

Las membranas utilizadas en el proceso de EO no hacen ninguna contribución a la selectividad, su única función es la estabilización de la interfaz



**Figura 4.** Comparación de los flux predichos por *Comsol*® usando diferentes modelos de difusividad

Fuente: elaboración propia.

entre los dos medios de contacto. Además, la propia membrana está presente como una barrera al flujo de vapor, el efecto de las características de la membrana sobre la transferencia de masa y calor ha sido estudiado por varios investigadores (Domingues, Ramos, Cardoso y Reis, 2014; Vigié *et al.*, 2013; Yang *et al.*, 2013), para tamaños de poro entre 0,05 y 0,2  $\mu\text{m}$ , el flux no muestra ser dependiente de este parámetro, en membranas con poros entre 0,2 y 0,45, se informa de ligeros aumentos en el flujo de vapor, debido principalmente a la dominancia del mecanismo difusional Knudsen. Para membranas con poros mayores a 1  $\mu\text{m}$ , se ha observado un incremento significativo en el flux de evaporación a medida que aumenta el tamaño de poro, explicado esto por la marcada influencia de la difusión molecular (Naim, Khulbe, Ismail y Matsuura, 2013; Rahbari-Sisakht, Ismail, Rana y Matsuura, 2013).

### Densidad de mallado

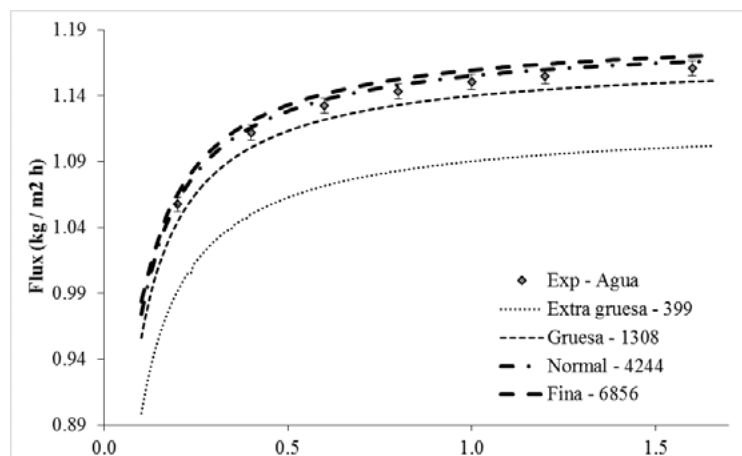
El número de elementos finitos fue el segundo criterio analizado para comprobar los cálculos. La figura 5 presenta la comparación de los flux predichos con el modelo contra los valores experimentales del flux obtenidos para unas condiciones operativas de flujo “agua” 1 l/min, temperatura 25 °C,

$\Delta_{\text{sal}}$ : 44 %, flujo salmuera 0,2 – 1,6 l/min y difusión Knudsen, se evidenció que usar un número reducido de elementos, produce resultados de flux bajos, a medida que se refina la malla los resultados se acercan cada vez más a los valores reales.

Tal como lo evidenciaron los resultados del análisis estadístico Anova y la comparación de medias, la mejor correlación se obtuvo al usar una densidad de malla *normal*, esta no presentó diferencias significativas frente a los datos experimentales, y estaba constituida por 4244 elementos finitos, con lo cual la diferencia entre el flux calculado y el experimental varió entre el 2 y 4 %. Con este nivel de mallado, el tiempo de cálculo fue de 5 minutos; seguir aumentando el número de elementos más allá de este límite, no mostró mejoramiento significativo de la calidad de los resultados; por el contrario, ocurrió una ligera sobreestimación de los mismos y se aumentaron los tiempos de convergencia.

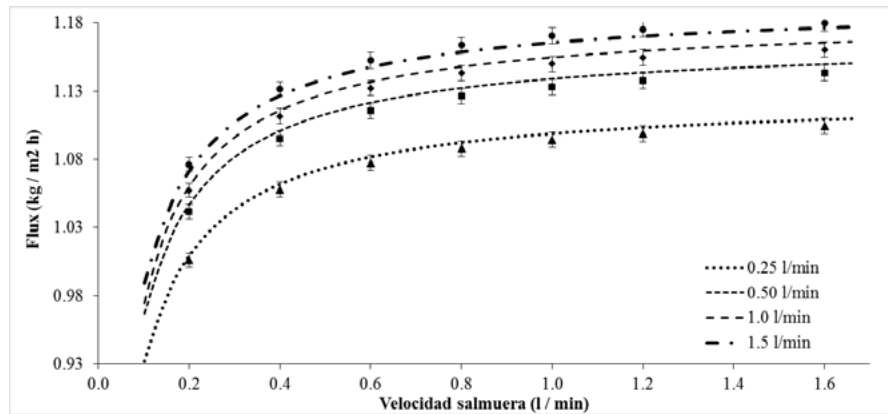
### Velocidad de alimentación

Se evaluó estadísticamente cada curva de datos del flux experimental (flujo “agua” 0,25 – 1,5 l/min, temperatura 25 °C,  $\Delta_{\text{sal}}$ : 44 %, flujo salmuera 0,2 – 1,6 l/min y difusión Knudsen) vs. calculados, por medio de una prueba de *t* para comparar las



**Figura 5.** Efecto del tamaño de malla y número de elementos finitos usados para el cálculo del flux

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 6.** Comparación del flux experimental y los calculados por *Comsol*® usando diferentes velocidades de alimentación

**Fuente:** elaboración propia.

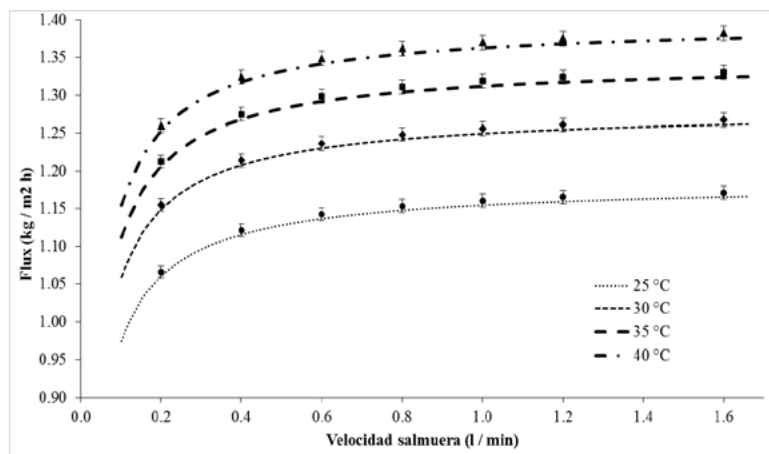
medias, a un nivel del 95 % de confianza ( $p \leq 0,05$ ), teniendo como hipótesis nula:  $media_{exp} = media_{cal}$  y la hipótesis alternativa:  $media_{exp} \neq media_{cal}$ .

Los resultados mostraron que no hubo diferencias significativas entre los datos experimentales y los calculados por *Comsol*®, para ninguna de las 4 velocidades de alimentación; esto confirma la bondad de ajuste del modelo utilizado. Como se puede apreciar en la figura 6, el flux de evaporación aumenta proporcionalmente con la velocidad de la alimentación, este incremento no es indefinido y se limita por las características estructurales

y operativas de la membrana (Domingues *et al.*, 2014).

### Temperatura de alimentación

Para el efecto de la temperatura sobre el flux de evaporación, dado en la figura 7, bajo condiciones operativas de: flujo “agua” 1 l/min, temperatura 25–40 °C,  $[\ ]_{sal}$ : 44 %, flujo salmuera 0,2 – 1,6 l/min y difusión Knudsen; es claro que el flux es exponencialmente dependiente de la temperatura. Este tipo de relación era esperada pues la presión



**Figura 7.** Comparación del flux experimental y los calculados por *Comsol*® usando diferentes temperaturas de alimentación.

**Fuente:** elaboración propia.



de vapor del agua pura presenta este mismo comportamiento (Meng, Ye, Mansouri y Chen, 2014; Zhao *et al.*, 2014).

Matemáticamente, lo anterior puede ser descrito para cualquier par de concentraciones de agua ( $j$ ) y salmuera ( $s$ ), con actividades de agua  $a_{wj}$  y  $a_{ws}$ , se tiene que el diferencial de presiones de vapor ( $P_v$ ) estaría dado por la ecuación (49).

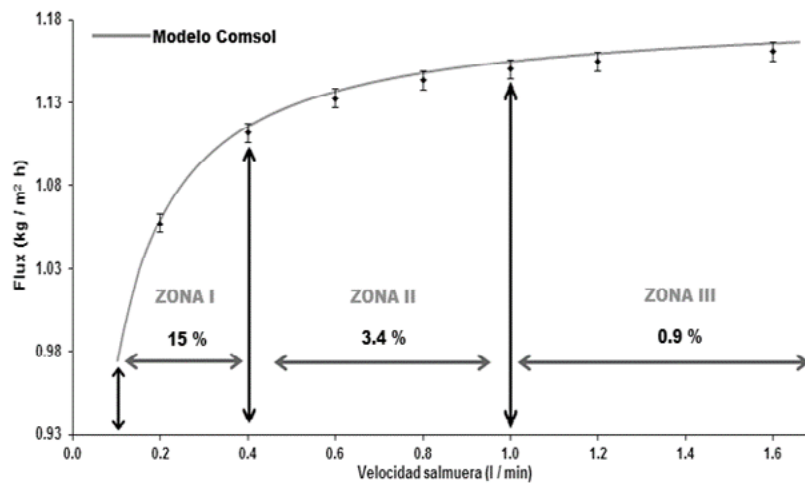
$$\Delta P_v = (a_{wj} - a_{ws}) \times P_0 = \Delta a_w \times P_0 = \Delta a_w \times \exp\left(A - \frac{B}{T - C}\right) \quad (49)$$

Donde  $A$ ,  $B$  y  $C$  son constantes de la ecuación de Antoine, y  $T$  es la temperatura de la solución; esta expresión claramente muestra la relación exponencial que se mencionó anteriormente, entre la temperatura y la fuerza impulsora del proceso (Kujawski *et al.*, 2013). Al comparar estadísticamente a un nivel del 95 % de confianza, los resultados experimentales con los predichos para las 4 temperaturas evaluadas, no se encontraron diferencias significativas, los coeficientes de correlación fueron superiores al 97 % en todos los casos; este buen nivel de ajuste por parte del modelo se puede explicar por el hecho de haber utilizado ecuaciones que describen con alto detalle, los fenómenos de transferencia y especialmente las propiedades físicas del agua y la salmuera.

## Velocidad de la salmuera

Este parámetro se mostró consistentemente a través de todas las verificaciones realizadas. Incrementar la velocidad de la salmuera provoca un mayor flux de evaporación. La figura 8 presenta las tres zonas identificadas en el comportamiento del flux: en la zona I este crecimiento es el más rápido, para velocidades entre los 0,1 y 0,4 l/min con un incremento de 15 % en el flux, la segunda zona comprendida desde 0,4 hasta 1,0 l/min presenta una fase de estabilización llegándose a un máximo de eficiencia cuando el flujo alcanza los 1,0 l/min, pasado este límite se establece un estancamiento o meseta (zona III), donde los incrementos en el flux son muy bajos (<0,9 %).

La principal explicación de este crecimiento progresivo del flux es el aumento en el coeficiente de transferencia de materia en el lado de la carcasa (Manawi *et al.*, 2014), por el aumento en la turbulencia y también el posible efecto de limpieza sobre la membrana que se ejerce al aumentar la velocidad, retirando depósitos del cloruro de calcio, que pudieran estar acumulados debido a la intrincada geometría formada por el empaquetamiento de las fibras en el módulo; este tipo de colmatación de la membrana no se evidenció durante los experimentos.



**Figura 8.** Efecto del flujo de salmuera sobre el comportamiento del flux de evaporación

Fuente: elaboración propia.

## CONCLUSIONES

El modelo difusional Knudsen fue el más adecuado en describir la transferencia del vapor de agua a través de la membrana, explicado esto por las características estructurales de la membrana que hacen predominar este modelo sobre la difusión molecular; siempre ha de verificarse de forma experimental la selección del modelo difusivo, porque este puede cambiar rápidamente de un tipo a otro con pequeños cambios en el proceso o la membrana. El uso de una geometría axial en dos dimensiones como simplificación del módulo real de evaporación osmótica es una decisión adecuada que permite reducir de forma significativa los recursos de cómputo necesarios para resolver las ecuaciones diferenciales sobre los tres dominios establecidos (agua, membrana, salmuera). Los modelos utilizados y las simulaciones generadas por *Comsol*<sup>®</sup> y *Matlab*<sup>®</sup> fueron adecuadas fenomenológicamente y estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ) en predecir el comportamiento del flux obteniéndose correlaciones mayores al 96% entre los datos experimentales y los calculados.

## FINANCIAMIENTO

Colciencias. Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación.

## NOMENCLATURA

$A$	Área ( $m^2$ )
$a$	Actividad
$C$	Concentración molar soluto ( $mol\ l^{-1}$ )
$D$	Coefficiente de difusión ( $m^2\ s^{-1}$ )
$d_h$	Diámetro hidráulico (m)
$d$	Diámetro (m)
$d_p$	Diámetro de poro (m)
$K$	Coefficiente transf masa ( $kg\ m^{-2}\ h^{-1}\ Pa^{-1}$ )
$k_b$	Constante Boltzmann ( $1.3807 \times 10^{-23}\ J\ K^{-1}$ )
$L$	Longitud (m)
$M$	Peso molecular ( $kg\ mol^{-1}$ )
$m$	Masa (kg)

$N$	Flux vapor, masa ( $kg\ m^{-2}\ h^{-1}$ ), ( $mol\ m^{-2}\ s^{-1}$ ).
$P$	Presión (Pa)
$P^*$	Presión vapor saturado (Pa)
$P_{Alm}$	Presión aire media logarítmica
$Q$	Flux de calor ( $W\ m^{-2}$ )
$R$	Constante de los gases ( $8.314\ J\ K^{-1}\ mol^{-1}$ )
$r$	Radio de poro (m)
$T$	Temperatura ( $^{\circ}C$ , K)
$x$	Fracción masa (p/p %)

### Símbolos

$\varepsilon$	Porosidad
$\delta$	Espesor (m)
$\Delta$	Diferencia
$\gamma$	Coefficiente de actividad
$\lambda$	Trayectoria media libre (m)
$\mu$	Viscosidad dinámica (Pa s)
$\chi$	Tortuosidad
$\infty$	Valor asintótico
$\emptyset$	Densidad empaquetamiento
$\rho$	Densidad ( $kg\ m^{-3}$ )
$\sigma$	Diámetro medio de colisión

### Números adimensionales

Gz	Graetz
Kn	Knudsen
Nu	Nusselt
Pr	Prandtl
Re	Reynolds
Sc	Schmidt
Sh	Sherwood

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, V.D. y Coelho, I.M. (2004). Effect of membrane characteristics on mass and heat transfer in the osmotic evaporation process. *Journal of Membrane Science*, 228(2), 159-167. DOI: 10.1016/j.memsci.2003.10.004
- Bailey, A.F.G.; Barbe, A.M.; Hogan, P.A.; Johnson, R.A. y Sheng, J. (2012). The effect of ultrafiltration on the subsequent concentration of grape juice by osmotic distillation. *Journal of Membrane Science*, 164(1-2), 195-204. DOI: 10.1016/s0376-7388(99)00209-4

- Bui, A. V.; Nguyen, H.M. y Joachim, M. (2003). Prediction of water activity of glucose and calcium chloride solutions. *Journal of Food Engineering*, 57(3), 243-248. DOI: 10.1016/s0260-8774(02)00304-7
- Bui, A.V. y Nguyen, M.H. (2004). Prediction of viscosity of glucose and calcium chloride solutions. *Journal of Food Engineering*, 62(4), 345-349. DOI: 10.1016/s0260-8774(03)00249-8
- Cassano, A.; Drioli, E.; Galaverna, G.; Marchelli, R.; Di Silvestro, G. y Cagnasso, P. (2003). Clarification and concentration of citrus and carrot juices by integrated membrane processes. *Journal of Food Engineering*, 57(2), 153-163. DOI: 10.1016/s0260-8774(02)00293-5
- Celere, M. y Gostoli, C. (2002). The heat and mass transfer phenomena in osmotic membrane distillation. *Desalination*, 147(1-3), 133-138.
- Courel, M.; Dornier, M.; Herry, J.-M.; Rios, G.M. y Reynes, M. (2000). Effect of operating conditions on water transport during the concentration of sucrose solutions by osmotic distillation. *Journal of Membrane Science*, 170(2), 281-289.
- Courel, M.; Tronel-Peyroz, E.; Rios, G.M.; Dornier, M. y Reynes, M. (2001). The problem of membrane characterization for the process of osmotic distillation. *Desalination*, 140(1), 15-25.
- Chen, B.; Gao, Z.; Jin, W. y Zheng, S. (2011). Analytical mass transfer solution of longitudinal laminar flow of Happel's free surface model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(17-18), 4000-4008. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.025
- Domingues, R.C.C.; Ramos, A.A.; Cardoso, V.L. y Reis, M.H.M. (2014). Microfiltration of passion fruit juice using hollow fibre membranes and evaluation of fouling mechanisms. *Journal of Food Engineering*, 121(0), 73-79. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.07.037
- Gawronski, R. y Wrzesinska, B. (2000). Kinetics of solvent extraction in hollow-fiber contactors. *Journal of Membrane Science*, 168(1-2), 213-222. DOI: 10.1016/s0376-7388(99)00317-8
- Holz, M.; Heil, S.R. y Sacco, A. (2000). Temperature-dependent self-diffusion coefficients of water and six selected molecular liquids for calibration in accurate 1H NMR PFG measurements. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2(20), 4740-4742.
- Kujawski, W.; Sobolewska, A.; Jarzynka, K.; Güell, C.; Ferrando, M. y Warczok, J. (2013). Application of osmotic membrane distillation process in red grape juice concentration. *Journal of Food Engineering*, 116(4), 801-808. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.033
- Lipnizki, F. y Field, R.W. (2001). Mass transfer performance for hollow fibre modules with shell-side axial feed flow: using an engineering approach to develop a framework. *Journal of Membrane Science*, 193(2), 195-208. DOI: 10.1016/s0376-7388(01)00512-9
- Liu, J. y Wei, J. (2014). Knudsen diffusion in channels and networks. *Chemical Engineering Science*, 111(0), 1-14. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2014.01.014
- Manawi, Y.M.; Khraisheh, M.A.M.M.; Fard, A.K.; Benyahia, F. y Adham, S. (2014). A predictive model for the assessment of the temperature polarization effect in direct contact membrane distillation desalination of high salinity feed. *Desalination*, 341(0), 38-49. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2014.02.028
- Martínez-Díez, L.; Florido-Díaz, F.J. y Vázquez-González, M.I. (2000). Study of Polarization Phenomena in Membrane Distillation of Aqueous Salt Solutions. *Separation Science and Technology*, 35(10), 1485-1501.
- Mendieta R., M.N.; Montaña P., R.E. y Noguera V., L.A. (2012). Diseño de una cámara de ensayos termoelectrónicos. *Revista Tecnura*, 16, 100-110.
- Meng, S.; Ye, Y.; Mansouri, J. y Chen, V. (2014). Fouling and crystallisation behaviour of superhydrophobic nano-composite PVDF membranes in direct contact membrane distillation. *Journal of Membrane Science*, 463(0), 102-112. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2014.03.027
- Naim, R.; Khulbe, K.C.; Ismail, A.F. y Matsuura, T. (2013). Characterization of PVDF hollow fiber membrane for CO<sub>2</sub> stripping by atomic force microscopy analysis. *Separation and Purification*

- Technology*, 109(0), 98-106. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2013.02.036>
- Nii, S.; Jebson, R.S. y Cussler, E.L. (2002). Membrane evaporators. *Journal of Membrane Science*, 201(1-2), 149-159.
- Puin Á., H.D.; Noguera V., L.A. y Caicedo M., J.H. (2015). Análisis multifísico de un motor de reluctancia conmutada de rotor exterior usando elementos finitos. *Revista Tecnura*, 19, 151-156.
- Qtaishat, M.; Matsuura, T.; Kruczek, B. y Khayet, M. (2008). Heat and mass transfer analysis in direct contact membrane distillation. *Desalination*, 219(1-3), 272-292.
- Rahbari-Sisakht, M.; Ismail, A.F.; Rana, D. y Matsuura, T. (2013). Carbon dioxide stripping from diethanolamine solution through porous surface modified PVDF hollow fiber membrane contactor. *Journal of Membrane Science*, 427(0), 270-275. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2012.09.060>
- Rezakazemi, M.; Shirazian, S. y Ashrafizadeh, S.N. (2012). Simulation of ammonia removal from industrial wastewater streams by means of a hollow-fiber membrane contactor. *Desalination*, 285(0), 383-392. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2011.10.030>
- Romero, J. (2003). Analysis of boundary layer and solute transport in osmotic evaporation. *AIChE Journal*, 49(11), 2783-2792.
- Shaw, P.E.; Lebrun, M.; Dornier, M.; Ducamp, M.N.; Courel, M. y Reynes, M. (2001). Evaluation of Concentrated Orange and Passionfruit Juices Prepared by Osmotic Evaporation. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 34(2), 60-65.
- Suárez-Iglesias, O.; Medina, I.; Pizarro, C. y Bueno, J. L. (2008). On predicting self-diffusion coefficients in fluids. *Fluid Phase Equilibria*, 269(1-2), 80-92. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.fluid.2008.05.004>
- Thanedgunbaworn, R.; Jiratananon, R. y Nguyen, M.H. (2007a). Mass and heat transfer analysis in fructose concentration by osmotic distillation process using hollow fibre module. *Journal of Food Engineering*, 78(1), 126-135. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2005.09.023
- Thanedgunbaworn, R.; Jiratananon, R. y Nguyen, M.H. (2007b). Shell-side mass transfer of hollow fibre modules in osmotic distillation process. *Journal of Membrane Science*, 290(1-2), 105-113. DOI: 10.1016/j.memsci.2006.12.021
- Thanedgunbaworn, R.; Jiratananon, R. y Nguyen, M. H. (2009). Vapour Transport Mechanism in Osmotic Distillation Process. *International Journal of Food Engineering*, 5(5), 1-19. DOI:10.2202/1556-3758.1665
- Vaillant, F.; Jeanton, E.; Dornier, M.; O'Brien, G.M.; Reynes, M. y Decloux, M. (2012). Concentration of passion fruit juice on an industrial pilot scale using osmotic evaporation. *Journal of Food Engineering*, 47(3), 195-202.
- Valdés, H.; Romero, J.; Saavedra, A.; Plaza, A. y Bubnovich, V. (2013). Concentration of noni juice by means of osmotic distillation. *Journal of Membrane Science*, 330(1-2), 205-213.
- Viguié, J.; Savart, T.; Duru, P.; Rouch, J.C. y Remigy, J.C. (2013). Characterisation of 3D porous macrostructure of hollow fibre membranes using X-ray tomography—Effects of some spinning process conditions. *Journal of Membrane Science*, 435(0), 11-20. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2013.01.062>
- Wahab, A. y Mahiuddin, S. (2001). Isentropic Compressibility and Viscosity of Aqueous and Methanolic Calcium Chloride Solutions. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 46(6), 1457-1463. DOI:10.1021/je010072l
- Wang, X.-D.; Wang, Z.-X.; Duan, Y.-Y.; An, B. y Lee, D.-J. (2014). Efficient evaluation of thermodynamic properties of water and steam on p-h surface. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45(2), 372-379. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jtice.2013.06.016>
- Wu, J. y Chen, V. (2000). Shell-side mass transfer performance of randomly packed hollow fiber modules. *Journal of Membrane Science*, 172(1-2), 59-74. DOI: 10.1016/s0376-7388(00)00318-5
- Yang, J.; Yu, X.; Yan, J.; Tu, S.-T. y Dahlquist, E. (2013). Effects of SO<sub>2</sub> on CO<sub>2</sub> capture using a hollow fiber membrane contactor. *Applied Energy*,

112(0), 755-764. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.052>

Zhang, L.-Z.; Huang, S.-M.; Chi, J.-H. y Pei, L.-X. (2012). Conjugate heat and mass transfer in a hollow fiber membrane module for liquid desiccant air dehumidification: A free surface model approach. *International Journal of Heat and Mass*

*Transfer*, 55(13-14), 3789-3799. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.034>

Zhao, S.; Feron, P.H.M.; Xie, Z.; Zhang, J. y Hoang, M. (2014). Condensation studies in membrane evaporation and sweeping gas membrane distillation. *Journal of Membrane Science*, 462(0), 9-16. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2014.03.028>





## Análisis comparativo de la carbonización de cuesco de palma de aceite en reactores de lecho fijo

### Comparative analysis of the carbonization of oil palm kernel shells in fixed bed reactors

David Francisco Flórez Ramos<sup>1</sup>, Jimmy Barco Burgos<sup>2</sup>, Sonia Lucía Rincón Prat<sup>3</sup>

**Fecha de recepción:** 1 de abril de 2016

**Fecha de aceptación:** 15 de mayo de 2016

**Cómo citar:** Flórez Ramos, D. F., Barco Burgos, J., & Rincón Prat, S. L. (2016). Análisis comparativo de la carbonización de cuesco de palma de aceite en reactores de lecho fijo. *Revista Tecnura*, 20(49), 45-58. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.3.a03

#### RESUMEN

**Contexto:** La producción de aceite crudo de palma se ha incrementado en un 60 % en el país en los últimos 5 años. Este incremento va acompañado de la producción de cada vez mayores cantidades de residuos generados en el proceso de extracción. En este trabajo se evalúa el proceso de carbonización de cuesco de palma de aceite en diferentes reactores con miras a su aprovechamiento como fuente de energía renovable.

**Método:** La carbonización se realiza en un montaje con retorta a escala laboratorio y en dos reactores de lecho fijo a escala semi-piloto. Se comparan los rendimientos máxicos y las características fisicoquímicas de los productos utilizando la misma tasa de calentamiento y aumentando el tamaño del reactor y se estudia la influencia de la velocidad de calentamiento para la retorta.

**Resultados:** Un aumento en la tasa de calentamiento de 2,5 K/min a 7,0 K/min ocasiona un 10 % de disminución de carbonizado y un aumento de 1,5 % y 20 % de gas y productos líquidos respectivamente. Al aumentar el tamaño del reactor, aumenta

el rendimiento de carbonizado y de gas en un 6 % y 7 % respectivamente y disminuyen los productos líquidos en un 3 %.

**Conclusiones:** Al aumentar el tamaño del reactor se favorecen los efectos de transferencia de masa y calor y las reacciones secundarias. Estos efectos junto con el uso de una tasa de calentamiento baja, conllevarán a mayores rendimientos del carbonizado y a mayor rendimiento gaseoso con mayor poder calorífico.

**Palabras clave:** Carbonización, Cuesco de palma de aceite, Reactor de lecho fijo, Escalamiento.

#### ABSTRACT

**Background:** Raw palm oil production has increased 60% in the last 5 years in the country. This increase is accompanied by the production of a larger amount of residues generated during the extraction process. In this work, the carbonization of oil palm shells is assessed in different reactors in order to determine their use as a renewable energy source.

**Method:** Oil palm shells carbonization is carried out in a laboratory scale retort set-up and two semi-pilot scale fixed bed reactors. Mass yields and

- 1 Ingeniero Químico, estudiante de la maestría en Ingeniería Química, integrante del Grupo de Investigación en Biomasa y Optimización de Procesos Térmicos de la Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Contacto: [dafflorezra@unal.edu.co](mailto:dafflorezra@unal.edu.co)
- 2 Ingeniero Mecánico, magíster en Ingeniería Mecánica, integrante del Grupo de Investigación en Biomasa y Optimización de Procesos Térmicos de la Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Contacto: [jbarcobu@unal.edu.co](mailto:jbarcobu@unal.edu.co)
- 3 Ingeniera Mecánica, doctora en Ingeniería, directora del Grupo de Investigación en Biomasa y Optimización de Procesos Térmicos de la Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Contacto: [slrinconp@unal.edu.co](mailto:slrinconp@unal.edu.co)

physiochemical properties of products, are compared by increasing the size of the reactor at the same heating rate and the influence of the heating rate is studied in the retort set-up.

**Results:** An increase in the heating rate from 2,5 K/min to 7,0 K/min promotes a 10 % of reduction of char and an increase of 1,5 % and 20 % of gas and liquid products respectively. When increasing the size of the reactor, the char and gas yields increase

in 6 % and 7% respectively and liquid products decrease in 3 %.

**Conclusions:** By increasing the reactor size, mass and heat transport phenomena and secondary reactions are promoted. This phenomena along with a reduction in heating rate generates larger char yields and larger gaseous yields with higher calorific value.

**Key words:** Carbonization, Oil Palm Shells, Fixed bed reactor, Scaling.

## INTRODUCCIÓN

La biomasa es entendida como toda la materia que se puede derivar de manera directa o indirecta de la fotosíntesis de las plantas, y puede encontrarse en forma vegetal o animal. Las fuentes de biomasa para uso energético pueden ser plantaciones energéticas, residuos forestales, desechos agrícolas, desechos industriales y desechos urbanos (Campero, 2010). Cuando los enlaces entre las moléculas adyacentes de carbono, hidrógeno y oxígeno se rompen por digestión, combustión o descomposición, estas sustancias liberan su energía química almacenada (McKendry, 2002). La biomasa contribuye en cerca del 10 % de los combustibles como fuente de energía primaria a nivel mundial, siendo en promedio del 5 % en los países industrializados y cerca del 30 % en los países en vía de desarrollo (Escalante, Orduz, Zapata, Cardona y Duarte; 2008; Faaji, 2006). Desde 1971 hasta 2011 aumentó la demanda energética en Colombia en un 125 %, con una disminución notable de carbón mineral y aceite como fuentes de suministro y aumento en el suministro energético mediante biocombustibles, gas natural e hidroeléctricas (IEA, 2011a). En el mundo, el incremento de la demanda energética en el mismo periodo fue de alrededor de 140 %, para la biomasa el aumento fue del 50 % siendo la mayor participación la correspondiente a la madera (IEA, 2011b). La biomasa puede mezclarse con carbón mineral o combustibles sólidos convencionales para reducir el impacto ambiental, sin afectar

el desempeño de los hornos durante la combustión (González, García y Talero, 2014).

Los residuos agroindustriales comprenden una alternativa viable de aprovechamiento energético mediante procesos de transformación termoquímica. En las últimas dos décadas el cultivo de palma de aceite en Colombia ha crecido aceleradamente, pasando de 111.380 ha en 1990 a 403.684 ha en 2010. Esto se debe a la creciente demanda de grasas y aceites extraídos del fruto, que tienen múltiples usos, entre los que se destaca la producción de biodiesel (Fedepalma, 2013).

El cuesco constituye un residuo importante en los cultivos de palma de aceite; su adecuado uso y disposición presenta en la actualidad problemas importantes en este sector de la agroindustria en Colombia. Este material constituye entre 5 y 7 % del peso total del racimo de fruta fresca (RFF), es de consistencia dura y en su forma natural posee estructura porosa. Para 2015 la producción mundial de cuesco de palma de aceite fue de 14.800 kt; en Colombia la producción fue de 260 kt, con un potencial energético de 2677,44 TJ/año (Núñez, 2012). El cuesco se ha usado parcialmente en combustión en calderas, ya que presenta el inconveniente de que su ceniza obstruye tuberías y ductos debido al alto contenido de sodio y potasio en forma de óxidos que contiene (Abnisa, Wan Daud y Sahu, 2011). La deformación de la ceniza para cuescos inicia en promedio a temperaturas de 800 °C; para cascarillas, en cambio, la deformación empieza hacia los 1450 °C, y para carbones,

hacia los 1200 °C (Vassilev, Baxter, Andersen y Vassileva, 2013). El cuesco de palma, por su apariencia y dureza, puede ser considerado un pellet natural de material lignocelulósico, cuya densidad a granel en forma bruta y compacta, varía en el rango de 500 a 600 kg m<sup>-3</sup> y 600 a 740 kg m<sup>-3</sup>, respectivamente (Asadullah, Ab Rasid, Sharifah y Azdarpour, 2013).

La pirólisis es la degradación térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno. Este proceso genera productos líquidos, sólidos y gaseosos, cuya distribución y características dependen altamente de los parámetros de operación, como el tipo de biomasa, la temperatura máxima alcanzada, la tasa de calentamiento y el tiempo de permanencia de los productos en el reactor (Chen y Lin, 2016). El material sólido se puede emplear como combustible o materia prima para la producción de carbón activado; el producto líquido, llamado también bioaceite, se puede emplear como combustible rico en hidrocarburos; y el gas, como generador de energía mecánica o térmica, o para sintetizar productos químicos (Gómez, Klose y Rincón, 2008a). El producto líquido está formado en un 28,7 % por aromáticos conjugados con olefinas, y en un 37 % por compuestos aromáticos con radicales CH, CH<sub>2</sub> y CH<sub>3</sub> (Ugur y Sevgi, 2015; Zhongking, Dengyu, Gu, Bao y Qisheng, 2015). Para ser empleado como materia prima para producción de naftas y diésel necesita pasar por hidrogenación, y para producción de gasolina de alto octanaje requiere pasar por craqueo catalítico con zeolitas. En los procesos anteriores se disminuye el contenido de oxígeno y se remueven álcalis (McKendry, 2001).

La velocidad de calentamiento durante la pirólisis cumple un papel muy importante debido a que se relaciona con el tiempo de residencia de la fase volátil en el lecho de biomasa y, por tanto, con los rendimientos máxicos producidos. Altas velocidades favorecen los productos fluidos y bajas velocidades el producto carbonizado (Firdaus, Uemura, Osman y Yuzup, 2015; Seneca, 2007; Basu, 2010). Entre tasas de calentamiento moderadas (10–20 K/min), se han observado cambios significativos en

el rendimiento sólido (> 5 %) (Seon-Jin, Su-Hwa y Joo-Sik, 2010). La pirólisis puede ser llevada a cabo en atmósfera inerte o con concentraciones bajas de oxígeno y dióxido de carbono, aunque la eficiencia energética del material sólido tiende a disminuir con un agente externo (Uemura, Saadon, Osman y Mansor, 2015). Durante la pirólisis se descompone la hemicelulosa entre 160 y 360 °C; la celulosa entre 240 y 400 °C y la lignina entre 500 y 600 °C (Ninduangdee, Kuprianov, Young Cha y Kaewrath, 2015).

Los experimentos en laboratorio o planta piloto permiten predecir el comportamiento y la factibilidad técnica que presentará una planta industrial en condiciones similares de operación. La planta piloto es el camino más seguro hacia la certeza de invertir en una modificación de un proceso productivo, ya que genera nuevos criterios y conocimientos para avanzar en optimización, alcance, seguridad y rentabilidad (Pedroza y Anaya, 2008).

La presente investigación tiene como objetivo realizar un análisis comparativo de la operación de pirólisis de cuesco de palma en tres reactores de lecho fijo de distintos tamaños. Los tres reactores corresponden a una retorta, un reactor de lecho fijo horizontal y un reactor de lecho fijo vertical.

## METODOLOGÍA

Se llevan a cabo cuatro pruebas experimentales de pirólisis de cuesco de palma de aceite en tres montajes en operación en lote. Las condiciones experimentales de las pruebas se observan en la tabla 1.

Para todas las pruebas se utiliza cuesco de palma con tamaño de partícula entre 0,5 y 3 mm el cual se logra empleando un molino de cuchillas marca Retsch SM 100 neu. Las tasas de calentamiento utilizadas corresponden a los valores obtenidos en los reactores de lecho fijo a nivel de kilogramos de biomasa (prueba 2 y prueba 4), ya que en estos no es posible realizar un control de este parámetro como valor de entrada sino que el perfil de calentamiento es el resultado de la temperatura final establecida, la masa de materia prima y



**Tabla 1.** Condiciones experimentales de las pruebas de pirólisis realizadas

Número de prueba	Montaje	Volumen del reactor (ml)	Masa inicial de la muestra seca (g)	Tasa de calentamiento (K/min)	Temperatura máxima alcanzada (°C)	Tiempo de calentamiento total (min)
1	Retorta	163,3	45,39	2,5	550	200
2	Reactor de lecho fijo vertical	38 200,0	11 892,22	2,5	550	200
3	Retorta	163,3	81,39	7,0	590	120
4	Reactor de lecho fijo horizontal	20 106,0	4 820,11	7,0	590	120

**Fuente:** elaboración propia.

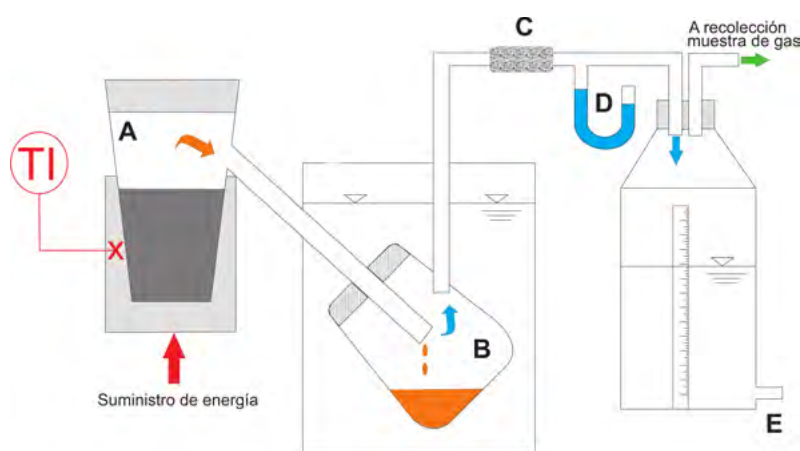
el flujo de gas de arrastre utilizados, así como, de la inercia propia de cada reactor. La retorta tiene mejor capacidad de control de temperatura por lo que se reproducen los perfiles de calentamiento previamente determinados en los reactores. A continuación se presenta una descripción de los montajes empleados y el procedimiento experimental desarrollado para la realización de las pruebas de pirólisis en cada uno.

### Pirólisis en retorta

El montaje experimental utilizado para llevar a cabo la pirólisis del cuesco de palma de aceite en retorta se presenta en la figura 1. Este se basa en la

norma ISO 647 “Determinación de rendimientos de alquitranes, agua, gas y carbonizado por destilación a baja temperatura”.

En este montaje se llevan a cabo las pruebas experimentales cuyas condiciones corresponden a las pruebas 1 y 3 de la tabla 1. El material a procesar se ubica en la retorta metálica (A). El calentamiento se realiza por medio de un mechero Bunsen de acuerdo con el perfil establecido. Los productos volátiles y gaseosos generados pasan a un Erlenmeyer (B) que se encuentra sumergido en un baño de agua con hielo causando la condensación de los alquitranes y el agua generados. Luego el gas es conducido por un filtro (C) y es recogido en un depósito de vidrio con agua a un nivel



**Figura 1.** Montaje de retorta para pirólisis de biomasa. A. Retorta metálica, B. Erlenmeyer, C. Filtro D. tubo en U. E. Depósito con agua a nivel graduado.

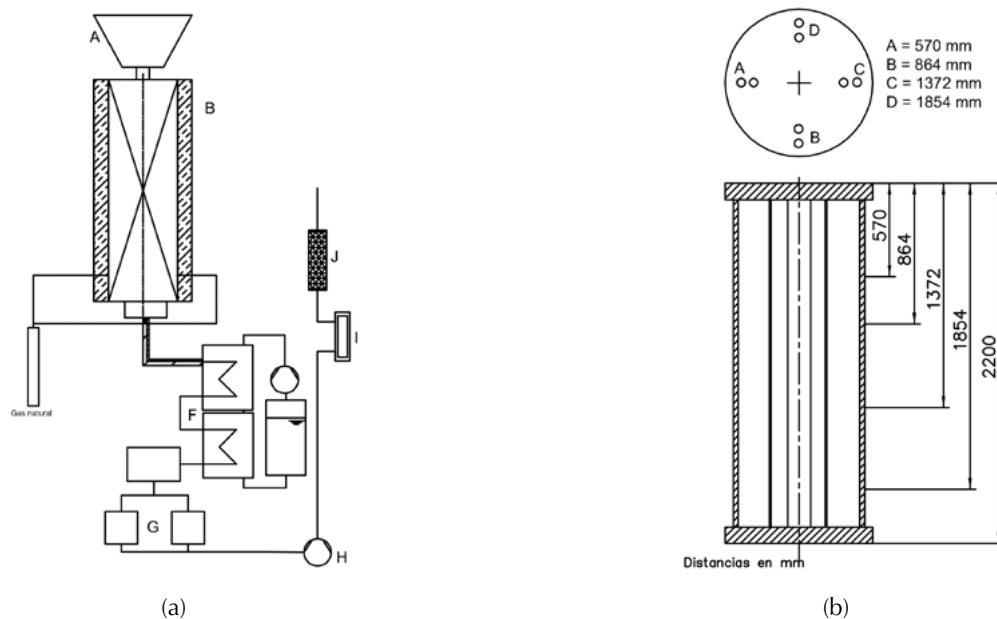
**Fuente:** elaboración propia.

graduado (E). La recolección se logra regulando la presión observada en un tubo en U (D), en el interior del depósito, mediante la evacuación coordinada de agua. Después de terminar el proceso se deja enfriar el sistema hasta temperatura ambiente y se determinan la masa de carbonizado residual, la masa del residuo líquido en el Erlenmeyer, la masa de las secciones de vidrio posteriores a este último para determinar el alquitrán adherido en las paredes y el volumen final desplazado de gas. Para calcular el volumen real de gas se utiliza un factor de corrección adicionado a la lectura en el depósito de almacenamiento de vidrio. Este factor corresponde al cambio en el volumen de material sólido en la retorta, sumado al volumen de condensado, teniendo en cuenta la temperatura alcanzada durante la operación.

Para registrar las temperaturas se usa un Data-Logger acoplado a un termopar tipo K. Durante el experimento, se toman cada 5 minutos lecturas del nivel de agua en el depósito de gas.

## Pirólisis en reactor de lecho fijo vertical

El montaje experimental se representa en la figura 2 (a). En este montaje se lleva a cabo la prueba 2, cuyas condiciones operacionales se observan en la tabla 1. El reactor es alimentado por una tolva que contiene el material a procesar (A). Como la operación se realiza en lotes, se alimenta la biomasa, luego se retira el sistema de alimentación y se sella el equipo. El lecho es cilíndrico con una longitud de 99,5 cm y un diámetro de 16 cm. Para el calentamiento, se emplean dos quemadores a gas marca Joannes Finterm modelo JM 3 de 11,9 a 37,7 kW de potencia en extremos opuestos del equipo. Se ubican termopares a 57, 86, 137 y 185 cm de la tapa superior. En cada posición axial se ubican dos termopares: uno junto a la pared del reactor y el otro a la mitad del radio del mismo, de acuerdo con la figura 2 (b). El perfil de temperaturas se registra mediante una tarjeta de adquisición de datos Agilent 34970A. La temperatura media del reactor



**Figura 2.** (a) Montaje del reactor de lecho fijo vertical para pirólisis biomasa. A. Sistema de alimentación. B. Reactor cilíndrico. F. Intercambiadores de calor. G. Filtros de aserrín para limpieza de gases. H. Bomba de vacío. I. Contador de gas. J. Chimenea. (b) Distribución de los termopares en el reactor de lecho fijo vertical.

**Fuente:** elaboración propia.

de lecho fijo vertical corresponde al promedio entre las medidas tomadas de los termoelementos B y los termoelementos C, ya que son estos los que miden la temperatura de la muestra.

A medida que se calienta la muestra los productos volátiles y gaseosos salen del reactor (B) succionados por una bomba de vacío (H). Entre el reactor y la bomba de vacío se ubican dos intercambiadores de calor de tubos concéntricos (F) en donde se condensan los alquitranes y el agua y dos filtros de aserrín (G) donde se separan los alquitranes que permanecen en el gas después de la condensación. Después de la bomba, los gases son medidos por medio de un contador de gas (I). Luego, la mezcla de gases es quemada y dirigida hacia una chimenea (J). Por último se deja enfriar el equipo a temperatura ambiente y se determina la masa de carbonizado residual, la masa de residuo líquido condensado de los intercambiadores y las secciones de manguera posteriores a estos para determinar el alquitrán adherido en las paredes. En este montaje experimental se realiza la evacuación continua del gas producido, por lo que no es posible recolectar una muestra de la cantidad total de gas producida que permita determinar su composición final.

Durante el experimento se regula un flujo de nitrógeno de entrada en  $5 \text{ l min}^{-1}$ , como gas de arrastre inerte, se regula un flujo de  $2 \text{ l min}^{-1}$  a la entrada de los frascos recolectores de alquitranes y  $0,25 \text{ l min}^{-1}$  para el depósito de almacenamiento del gas producido y recolección de muestra. Se toma el registro del volumen indicado en el contador de gas ubicado antes de la chimenea del reactor, cada 5 minutos (I). Todos los flujos se reportan a una temperatura de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $734,7 \text{ mbar}$ .

### Pirólisis en reactor de lecho fijo horizontal

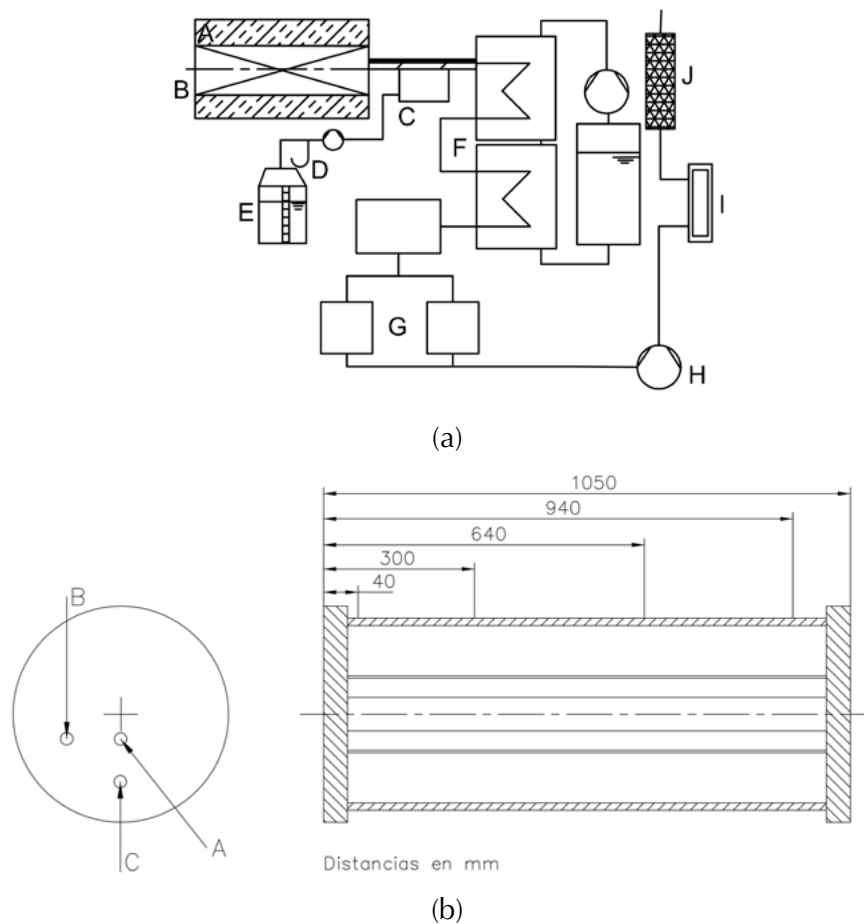
El montaje experimental utilizado se representa en la figura 3(a) En este montaje se lleva a cabo la prueba 4, cuyas condiciones operacionales se observan en la tabla 1. El reactor es alimentado manualmente y posteriormente sellado. Como el reactor está ubicado de manera horizontal, el

lecho formado por la materia prima es semicilíndrico con una longitud de  $64 \text{ cm}$  y ocupa el  $70 \%$  de la sección transversal circular de diámetro  $16 \text{ cm}$ . Para el calentamiento, se emplean dos series de resistencias eléctricas metálicas, situadas en los lados opuestos de la cámara de aislamiento del reactor, controlando el calentamiento a la tasa de  $4,8 \text{ K/min}$ . Se ubican termopares a  $4, 30, 63,5, \text{ y } 94 \text{ cm}$  de la tapa de entrada del gas de arrastre y en cada posición axial se ubican tres termoelementos a  $2,5, 4,7 \text{ y } 7 \text{ cm}$  del centro del reactor, de acuerdo con la figura 3 (b). El perfil de temperaturas se registra mediante una tarjeta de adquisición de datos Agilent 34970A, conectada a los diferentes termoelementos. La temperatura media del reactor corresponde al promedio de las medidas reportadas por los termoelementos a  $30 \text{ cm}$  y a  $94 \text{ cm}$ , en donde hacen contacto con el lecho de biomasa.

El sistema de adecuación, limpieza, evacuación y muestreo del gas es el mismo empleado para el reactor de lecho fijo vertical al que se le incorporó la posibilidad de recolectar una muestra de gas. Para esto en el ducto que comunica el reactor con los intercambiadores (F) se conecta un ducto que desvía una pequeña fracción del gas hacia un sistema de toma de muestras para posterior análisis. Este sistema cuenta con dos recipientes metálicos en serie en cada uno de los cuales se ubican tres botellas de vidrio. El primer recipiente está regulado a  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  y el segundo a  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ . La función de este sistema es condensar los volátiles contenidos en la fracción del flujo de gas que circula (C). El gas es recolectado en un depósito de vidrio con agua a un nivel graduado (E), regulando la presión en el interior mediante la evacuación coordinada de agua con la presión manométrica vista en el tubo en U (D).

### Caracterización de materia prima y productos

- Materia prima y carbonizado: Se realiza análisis próximo, determinando el contenido de humedad, contenido de ceniza y contenido de materia volátil, de acuerdo con las normas



**Figura 3.** (a) Montaje del reactor de lecho fijo horizontal para pirólisis biomasa. A. Sistema de alimentación. B. Reactor cilíndrico. C. Depósito de agua hielo con frascos para condensar alquitranes. D. Tubo en U. E. Depósito con agua a nivel graduado. F. Intercambiadores de calor. G. Filtros de aserrín para limpieza de gases. H. Bomba de vacío. I. Contador de gas. J. Chimenea. (b) Ubicación radial de termoelementos en el reactor horizontal.

**Fuente:** elaboración propia.

EN 14774-3, 14775 y 15148, respectivamente. Además, se determina la densidad granel según la norma DIN 51705 y el poder calorífico superior usando la correlación de Demirba (1997) que se presenta en la ecuación (1) y la correlación de Sheng y Azevedo (2005) que se presenta en la ecuación (2).

$$\text{HHV} = 0.312\text{FC} + 0.1534\text{VM} \quad (1)$$

$$\text{HHV} = -3.0368 + 0.2218\text{VM} + 0.2601\text{FC} \quad (2)$$

HHV corresponde al poder calorífico superior, VM al material volátil y FC al carbono fijo

- **Producto líquido:** Al producto líquido se le determina el contenido de agua empleando el montaje descrito en la norma DIN 12420. El procedimiento para determinar el contenido de agua en el producto líquido, descrito en la norma, consiste en la codestilación con xileno, mezclando 100 ml de xileno al 98,5 % (blanco previamente calibrado), con una alícuota de alquitrán de 10 ml. Luego se calienta durante 40 min a 130 °C y durante 15 min a 145 °C (hasta cuando no se observan gotas de agua en el montaje excepto en la bureta recolectora de condensado), posteriormente se suspende el calentamiento, se deja enfriar a temperatura ambiente y se lee el nivel de

la interfase agua/xileno condensado en la trampa de vapor o bureta.

- Producto gaseoso: Para las pruebas realizadas en la retorta (pruebas 1 y 3) y en el reactor de lecho fijo horizontal (prueba 4) se determina la composición del gas sometiéndolo a cromatografía de gases en un cromatógrafo marca Shimadzu modelo GC2010plus, cuyo principio de operación radica en la diferencia de conductividad térmica, tamaño molecular y punto de ignición detectada entre los compuestos. La composición permite además la estimación de propiedades físicas como densidad y fisicoquímicas como poder calorífico, mediante el cálculo de la propiedad por ley de mezclas. La ley de mezclas empleada consiste en la ponderación de las propiedades individuales de los compuestos con su respectiva composición. Ya que el montaje del reactor de lecho fijo vertical no permite la toma de muestra de gas, no fue posible tener esta información para la prueba 3. Para esta, sin embargo, es posible tener información sobre la producción instantánea de gas la cual se compara con la obtenida en la correspondiente prueba de la retorta.

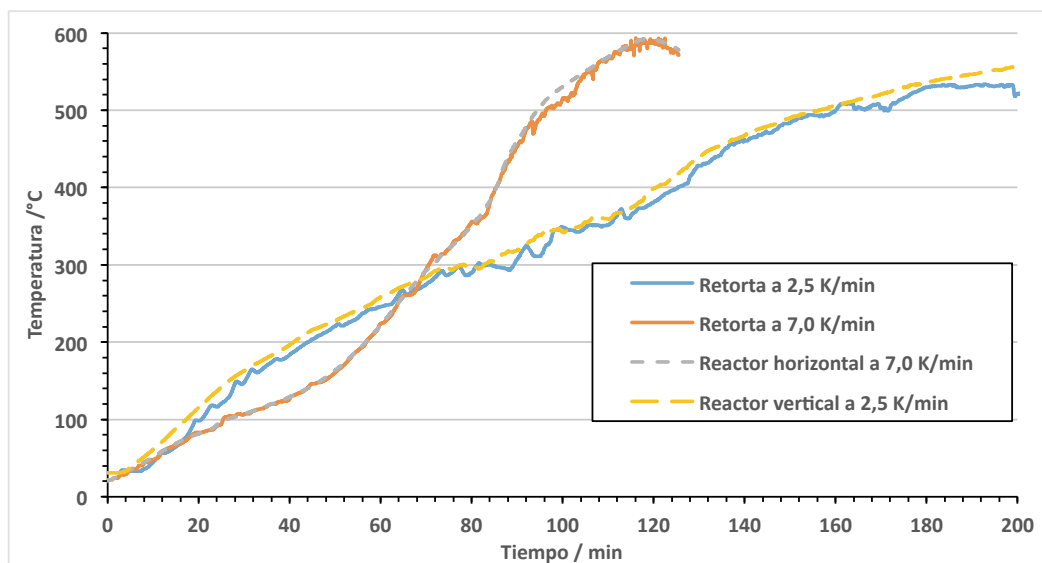
## Manejo de información experimental

Al final de cada prueba se determina la masa del carbonizado producido y el producto líquido, y se estima la cantidad de gas producido mediante un balance de materia. La masa de carbonizado remanente en el reactor, corresponde al que se extrae manualmente junto con el que se adhiere a las paredes y se retira con aire comprimido y herramienta abrasiva. La masa de producto líquido (agua y alquitrán generado por la pirólisis y agua condensada de la humedad del material), se determina sumando el líquido extraído de los recipientes de condensación y el calculado mediante el cambio de masa de los ductos o mangueras frías posteriores al reactor. Los rendimientos básicos se determinan con respecto a la masa inicial en base seca.

## RESULTADOS

### Comportamiento térmico

Los perfiles de temperatura de las diferentes pruebas se observan en la figura 4. Los perfiles de temperatura indican que fue posible reproducir



**Figura 4.** Perfiles de temperatura de las cuatro pruebas desarrolladas

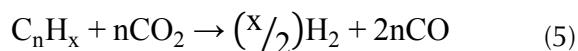
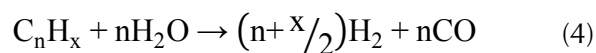
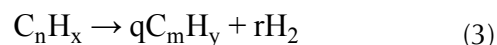
Fuente: elaboración propia.

el perfil térmico de los reactores en la retorta de manera satisfactoria. A partir de 150 °C se observa una tasa de calentamiento aproximadamente constante para los dos reactores, por lo que para cada perfil se calcula mediante regresión lineal a partir de esta temperatura. La tasas calculadas corresponden a 2,5 K/min y 7,0 K/min.

### Rendimiento másico de la carbonización en las diferentes pruebas

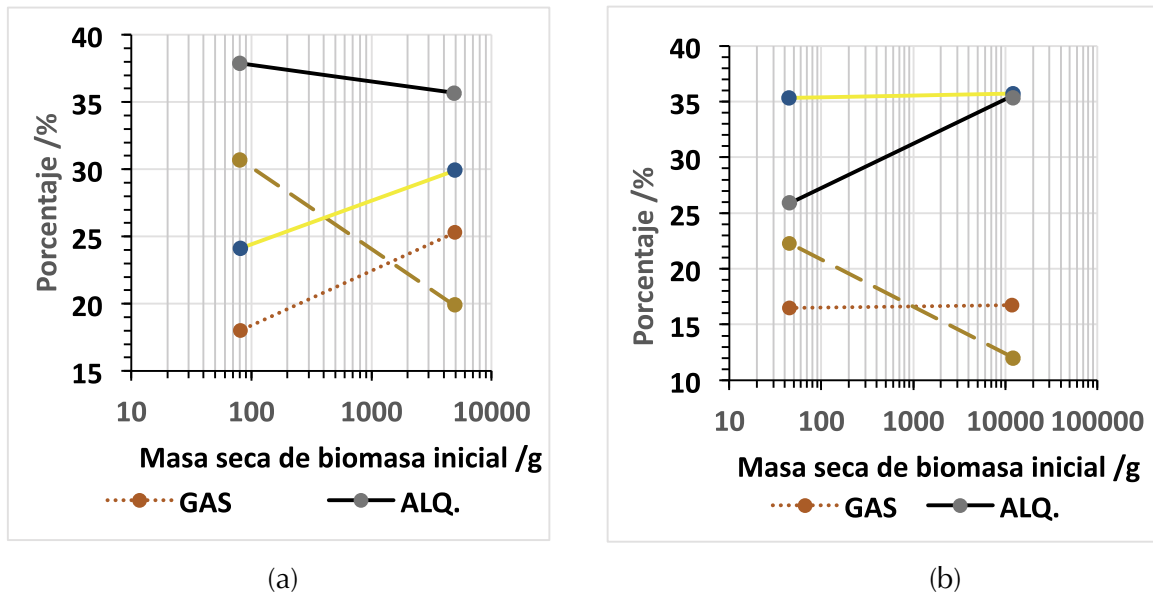
Los resultados de los rendimientos másicos para las diferentes pruebas se presentan en la figura 5 (a) para los experimentos realizados a 7 K/min y en la figura 5 (b) para los experimentos realizados a 2,5 K/min. En las figuras se puede observar la variación en los rendimientos másicos con el tamaño de la muestra inicial utilizado.

En la figura 5 (a) se observa una alta influencia de las reacciones secundarias al escalar el proceso a nivel de la retorta de 0,16 l al nivel de reactor de lecho fijo horizontal de 38,20 l. También se observa un aumento en la producción de carbonizado y de gas con un incremento en la masa inicial que se atribuyen a reacciones de recondensación de alquitranes y de craqueo respectivamente. Estas reacciones ocasionan que la fase líquida compuesta por alquitranes y agua disminuya. Los gradientes de temperatura en el lecho ocasionan que la biomasa reaccione inicialmente en la superficie y de manera progresiva en el interior de las partículas, a medida que incrementa la temperatura. De esta forma la fracción volátil proveniente del interior de la partícula cruza una capa de material ya carbonizado de la misma o de otra partícula y con una temperatura mayor, lo que promueve las reacciones secundarias. Las reacciones de craqueo se llevan a cabo principalmente por medio de craqueo térmico, reformado de vapor y reformado en seco de acuerdo con las ecuaciones (3), (4) y (5) (El-Rub, 2008). La disminución en la fracción de agua se puede deber a que la reacción de reformado de vapor, representada en la ecuación (4), se favorece en el proceso.



En la figura 5 (b), donde se comparan las fracciones másicas en la retorta y en el reactor de lecho fijo vertical, no se obtienen cambios apreciables en las fracciones de carbonizado y gas. Este comportamiento indica que la influencia de reacciones secundarias de formación de carbonizado y craqueo de alquitranes en el reactor de lecho fijo vertical es menor que en el reactor horizontal. Esto se explica por el hecho de que en el reactor de lecho fijo vertical el gas de arrastre atraviesa el lecho causando una evacuación rápida de los productos volátiles obtenidos mientras que en el reactor de lecho fijo horizontal el gas de arrastre pasa por el espacio libre del reactor en la parte superior del lecho evitando que no haya una evacuación efectiva de los productos. En la misma figura se puede observar que aunque la fracción total de productos líquidos (alquitrán + agua) permanece constante, la fracción de alquitranes es mayor para el reactor de lecho fijo vertical que para la retorta. Estas variaciones pueden deberse a una alta influencia en la relación alquitrán/agua con la tasa de calentamiento durante la pirólisis. La parte más caliente del lecho alcanza una temperatura de 500 °C en 120 min mientras que la parte más fría en 210 min. Esta diferencia ocasiona una descomposición rápida en la parte inferior del lecho que favorece la producción de alquitranes obteniéndose al final del experimento una cantidad mayor de alquitranes que para el caso de la retorta. Sin embargo, este efecto debe ser estudiado en mayor profundidad en futuras investigaciones.

La influencia de la tasa de calentamiento en la fracción final de productos puede observarse al comparar los resultados de las pruebas 1 y 3 en las figuras 5 (a) y 5 (b) donde la producción de



**Figura 5.** Variación del rendimiento másico de los productos con la masa seca de biomasa inicial. (a) Pruebas 3 y 4 realizadas a 7,0 K/min. (b) Pruebas 1 y 2 realizadas a 2,5 K/min

**Fuente:** elaboración propia.

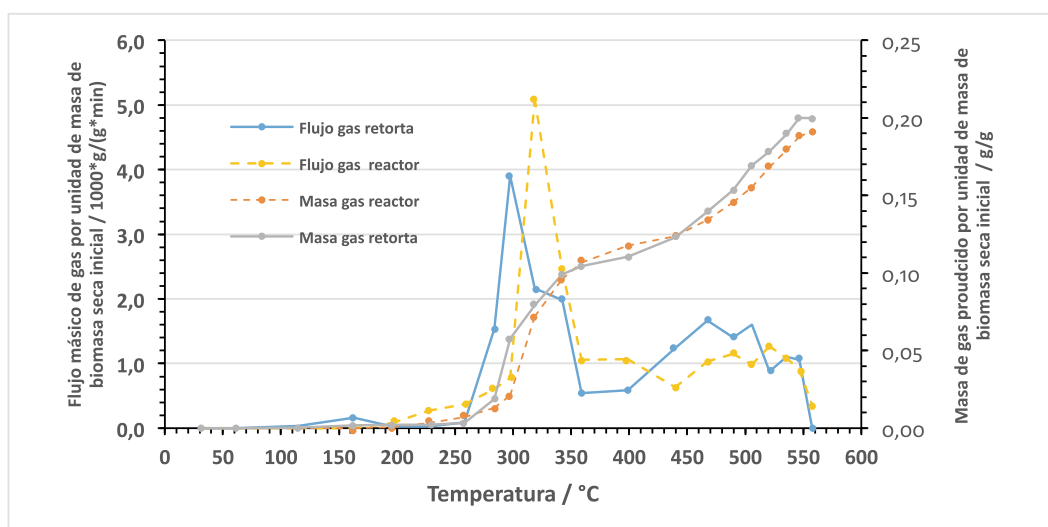
alquitranes varía de 26 % a 2,5 K/min a 38 % a 7 K/min.

Los resultados de las pruebas realizadas a 2,5 K/min para la retorta son muy próximos a los reportados en la literatura a 3 K/min por Gómez, Rincón y Klose (2010) y Suárez (2007) y los obtenidos para carbonización lenta por Kong, Loh y Bachmann (2014). El porcentaje de agua en los productos líquidos es para las pruebas con retorta a 2,5 K/min y 7 K/min 46 % y 44 % respectivamente. Para los productos líquidos obtenidos de los reactores de lecho fijo, el contenido de agua es de 36 % para el reactor de lecho fijo horizontal y 25 % para el reactor de lecho fijo vertical. Los valores reportados en literatura son muy variados ya que como se observa las fracciones dependen en gran medida de las condiciones utilizadas. Abnisa, Arami-Niya, Wan Daud, Sahu y Noor (2013) obtienen para racimo de aceite de palma un porcentaje de agua de los bioaceites producidos por pirólisis a 10 K/min hasta 500 °C de 59 %; Gómez *et al.* (2008a) reportan un valor de 50 % para el porcentaje de agua en la fracción líquida para carbonización en retorta con una tasa aproximada de 6,5 K/min.

### Producción específica de gases

En la figura 6 se representa la producción específica de gas acumulada y absoluta para las pruebas 1 y 2, realizadas a la misma tasa de velocidad en la retorta y en el reactor de lecho fijo vertical.

La producción de gas es para las dos pruebas muy similar, esto concuerda con las observaciones de la sección anterior que indican una baja influencia de las reacciones secundarias para el reactor de lecho fijo. La producción de gas es mínima antes de 250 °C. Después de esta temperatura la biomasa comienza a degradarse rápidamente y produce los mayores flujos de gas en la operación alrededor de 300 °C, la producción disminuye entre 350 °C y 400 °C seguida por un pequeño aumento hasta la temperatura final de procesamiento. Estos resultados concuerdan con los que obtuvieron Gómez *et al.* (2008b), quienes afirman que a partir de las curvas de variación de la masa de la fase sólida se reconocen de manera clara dos picos: uno alrededor de 260 °C y otro entre 335 y 365 °C. Los picos se producen principalmente por la producción de CO y CO<sub>2</sub>. La producción de



**Figura 6.** Producción de gases durante las pruebas 1 y 2 (retorta y reactor a 2,5 K/min)

**Fuente:** elaboración propia.

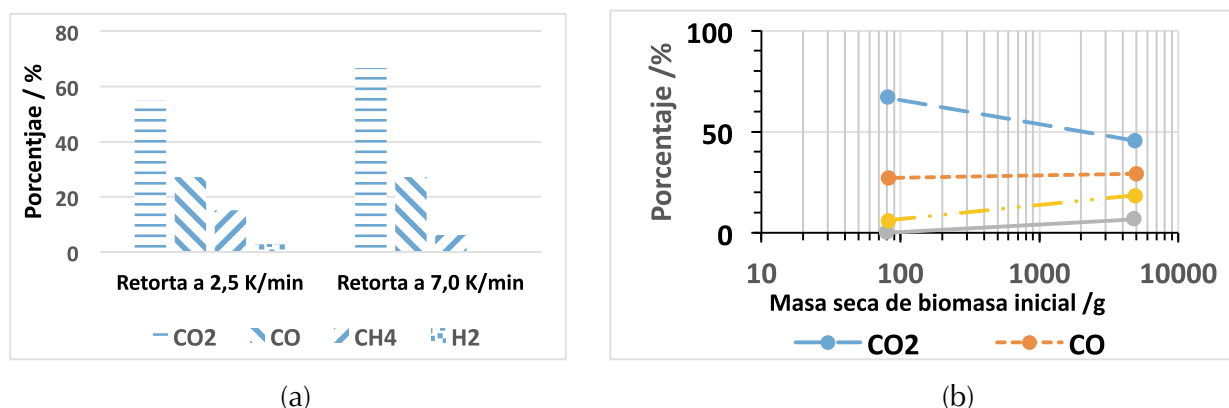
$\text{CH}_4$  es significativa entre 400 y 500 °C, mientras que la producción de  $\text{H}_2$  lo es a 700 °C. Conesa y Domene (2011) afirman que la ubicación de los picos de producción de gases con respecto a la temperatura está asociada al tipo de componente de la biomasa. Los picos pronunciados entre 250 y 300 °C se asocian a contenido de hemicelulosa, entre 300 y 400 °C al contenido de celulosa, y entre 300 y 500 °C al contenido de lignina. Milhé, Van de Steene y Haube (2013) indican en cambio que este efecto se debe a la disposición de la estructura cristalina y amorfa del carbonizado, que cambia constantemente con la temperatura.

### Composición del gas

Las muestras de gas tomadas del depósito de almacenamiento de gases para las pruebas 1, 3 y 4 se someten a cromatografía de gases para conocer la composición y determinar la densidad por ley de mezclas. En la figura 7 (a) se presentan los resultados para las dos pruebas realizadas en la retorta (pruebas 1 y 3) a 2,5 K/min y 7 K/min. En la figura 7 (b) se presenta la variación en la composición para las pruebas 3 y 4 realizadas a una tasa

de calentamiento de 7 K/min utilizando diferentes cantidades iniciales de biomasa. Las composiciones obtenidas concuerdan con valores reportados en literatura. Gómez *et al.* (2008a) reportan una composición de 28 vol. %  $\text{CO}$ , 59 vol. %  $\text{CO}_2$ , 9 vol. %  $\text{CH}_4$  y 4 vol. %  $\text{H}_2$  para el gas de pirólisis de cuesco de palma de aceite en pruebas de termogravimetría a 10 K/min. En la figura 7 (a) se observa que a mayores tasas de calentamiento se fomenta la producción de  $\text{CO}_2$  y se obtienen menores concentraciones de  $\text{CH}_4$  e  $\text{H}_2$ . La figura 7 (b) indica que a mayores tamaños de lecho se obtienen mayores concentraciones de  $\text{CH}_4$  e  $\text{H}_2$  y menores de  $\text{CO}_2$ . La concentración de  $\text{CO}$  no varía apreciablemente en el desarrollo experimental empleado. A partir de la composición se calcula la densidad de los gases. Para el gas producido en la prueba con la retorta a 2,5 K/min la densidad es de 1,42 kg/m<sup>3</sup>, mientras que para el producido a 7,0 K/min es de 1,58 kg/m<sup>3</sup>. El poder calorífico del gas varía entre 6,14 MJ/kg para el gas producido en la prueba con la retorta a 7,0 K/min y 22,62 MJ/kg para el gas producido en la prueba con el reactor horizontal a 7,0 K/min. Para la prueba en la retorta a 2,5 K/min se obtiene un gas con un poder calorífico de 15,27 MJ/kg.





**Figura 7.** (a) Variación de la composición del gas producido con la tasa de calentamiento evaluada en la retorta para las pruebas 1 y 3. (b) Variación de la composición con la masa seca de biomasa inicial a 7,0 K/min

Fuente: elaboración propia.

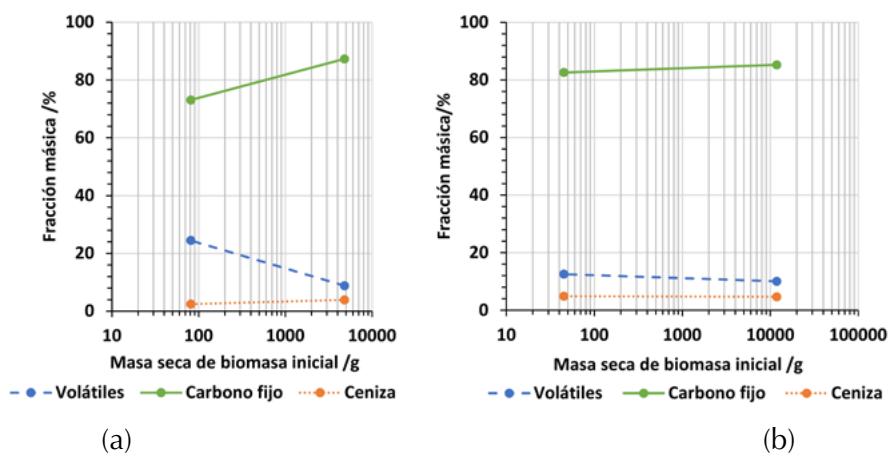
## Caracterización de productos sólidos

Los resultados del análisis próximo en base seca (humedad, contenido de volátiles y ceniza) se muestran en la figura 8. Para la materia prima se obtiene un contenido de humedad de 9 %, de materia volátil de 77 %, de ceniza de 2 % y de carbono fijo (calculado por diferencia) de 12 %. A las condiciones dadas el orden de magnitud del porcentaje de volátiles y el de carbono fijo se intercambian cuando la biomasa se transforma en carbonizado. En la figura 8 se observa una mayor

influencia en la variación del contenido de materia volátil y el carbono fijo para las pruebas realizadas en el reactor de lecho fijo horizontal que para el reactor de lecho fijo vertical, lo cual se explica por la menor influencia de la ocurrencia de reacciones secundarias en el segundo reactor, como se explicó en la sección anterior.

La densidad a granel de los carbonizados varía entre 555,3 kg/m<sup>3</sup> y 558,9 kg/m<sup>3</sup> y el poder calorífico superior entre 26,6 MJ/kg y 28,1 MJ/kg.

El carbonizado disminuye la densidad en un 4,6 %, y aumenta su poder calorífico en promedio



**Figura 8.** Variación del análisis próximo con la masa seca de biomasa inicial. (a) Pruebas 3 (retorta) y 4 (lecho fijo horizontal) a 7,0 K/min. (b) Pruebas 1 (retorta) y 2 (lecho fijo vertical) a 2,5 K/min

Fuente: elaboración propia.

en un 27,4 % con respecto a la materia prima inicial, que hacen del carbonizado un subproducto con buenas propiedades como combustible sólido.

## CONCLUSIONES

Se determina una alta influencia del tamaño del reactor y la tasa de calentamiento en los rendimientos máxicos y las características fisicoquímicas de los productos de la carbonización.

Al aumentar el tamaño del reactor aumenta la influencia de las reacciones secundarias de recondensación y craqueo de alquitranes que causan un aumento en el rendimiento de carbonizado y de gas, con una consecuente disminución del rendimiento de los productos líquidos. Adicionalmente, el craqueo de alquitranes provoca que parte de la energía de estos se transfiera al gas y, por tanto, que el poder calorífico del gas aumente. El poder calorífico del carbonizado no varía apreciablemente al modificar las condiciones del reactor. Al aumentar la tasa de calentamiento se favorece el rompimiento de cadenas en la biomasa que ocasiona el aumento en la producción de gases y líquidos. Por consiguiente, disminuye la producción de carbonizado.

El tipo de reactor y las condiciones de operación más conveniente para un producto energético depende de las características deseadas para el mismo. En el proceso de carbonización se desea producir la mayor cantidad de carbonizado, esto se logra utilizando bajas tasas de calentamiento y reactores de mayores tamaños de lecho de tal manera que se maximice la ocurrencia de reacciones secundarias de recondensación.

## FINANCIAMIENTO

La Universidad Nacional de Colombia financió el desarrollo del proyecto "Obtención de gas de síntesis a partir de gasificación de cuesco de palma de aceite", código Hermes 19133.

El programa Jóvenes Investigadores e Innovadores, de Colciencias, financió al ingeniero David

Flórez a través de la convocatoria No. 617 de 2013.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abnisa, F.; Arami-Niya, A.; Wan Daud, W.; Sahu, J. y Noor, I. (2013). Utilization of oil palm tree residues to produce bio-oil and bio-char via pyrolysis. *Energy Conversion and Management*, 76, 1073-1082.
- Abnisa, F.; Wan Daud, W. y Sahu, J. (2011). Utilization possibilities of palm shells as a source of biomass energy in Malaysia by producing bio-oil in pyrolysis process. *Biomass & Bioenergy*, 35(5), 1863-1872.
- Asadullah, M.; Ab Rasid, N.; Sharifah, A. y Azdarpour, A. (2013). Production and detailed characterization of bio-oil from fast pyrolysis of palm kernel shell. *Biomass & Bioenergy*, 59, 316-324.
- Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. Oxford, UK: Elsevier.
- Campero R., O. (2010). *La biomasa y los combustibles*. Recuperado de: [http://www.tecnologiasendesarrollo.org/dw/11BIOMASA\\_1ERA\\_PARTE.pdf](http://www.tecnologiasendesarrollo.org/dw/11BIOMASA_1ERA_PARTE.pdf)
- Chen, W.-H. y Lin, B.-J. (2016). Characteristics of products from the pyrolysis of oil palm fiber and its pellets in nitrogen and carbon dioxide atmospheres. *Energy*, 94, 569-578.
- Conesa, J. y Domene, A. (2011). Biomasses pyrolysis and combustion kinetics through n-th order parallel reactions. *Thermochimica Acta*, 523(1-2) 176-181.
- Demirba, A. (1997). Calculation of higher heating values of biomass fuels. *Fuel*, 76(5), 431-434.
- El-Rub, Z. (2008). Biomass- char as an insitu-catalyst for a tar removal in gasification systems. Enschede, Holanda: Twente University.
- Escalante H., H.; Orduz P., J.; Zapata L., H.; Cardona R., M. y Duarte O., M. (2008). *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. Bogotá: UPME, Ideam, Colciencias, Universidad Industrial de Santander. Recuperado de: [http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/article/1768/files/Atlas%20de%20Biomasa%20Residual%20Colombia\\_.pdf](http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/article/1768/files/Atlas%20de%20Biomasa%20Residual%20Colombia_.pdf)
- Faaij, A. (2006). Modern biomass conversion technologies. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11, 343-375.

- Fedepalma (2013). *Síntesis del proyecto GEF, Conservación de la biodiversidad en las zonas de Cultivos de Palma*. Bogotá. Recuperado de: [http://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Fedepalma/2013-05\\_S%C3%ADntesisProyectoGEF.pdf](http://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Fedepalma/2013-05_S%C3%ADntesisProyectoGEF.pdf)
- Firdaus Mazlan, M.A.; Uemura, Y., Osman, N., & Yuzup, S. (2015). Fast pyrolysis of hardwood residues using fixed bed drop-type pyrolyser. *Energy Conversion and Management*, 98, 208 - 2014
- Gómez, A.; Klose, W. y Rincón, S. (2008a). *Pirólisis de Biomasa, Cuesco de Palma*. Kassel, Alemania: Kassel University Press.
- Gómez, A.; Klose, W. y Rincón, S. (2008b). Thermogravimétrische Untersuchungen zur Pyrolyse von Ölpalmschalen. *Chemie Ingenieur Technik*, 80, 1-11.
- Gómez, A.; Rincón, S. y Klose, W. (2010). *Carbón activado de cuesco de palma*. Kassel, Alemania: Kassel University Press.
- González H., A.; García U., C. y Talero R., G. (2014). Estudio de planta piloto para peletización de residuos madereros y su utilización como combustible en hornos ladrilleros. *Tecnura*, 18(40), 62-70.
- International Energy Agency (IEA) (2011a). *Total primary energy supply Colombia*. Recuperado de: <http://www.iea.org/statistics/>
- International Energy Agency (IEA) (2011b). *Total primary energy supply world*. Recuperado de: <http://www.iea.org/statistics>
- Kong, S.H.; Loh, S.K. y Bachmann, R. (2014). Biochar from oil palm biomass: A review of its potential and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 729-739.
- McKendry, P. (2001). Energy Production from Biomass (Part 2): Conversion Technologies. *Biosource Technology*, 83, 47-54.
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (Part 1): Overview of Biomass. *Bioresource Technology*, 83, 37-46.
- Milhé, M.; Van de Steene, L. y Haube, M. (2013). Autothermal and allothermal pyrolysis in a continuous fixed bed reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 103, 102-111.
- Ninduandee, P.; Kuprianov, V.; Young Cha, E. y Kaewrath, R. (2015). Thermogravimetric studies of oil palm empty fruit bunch and palm kernel shell: TG/DTG analysis and modelling. *Energy Procedia*, 79, 453-458.
- Núñez, C. y Danny, W. (2012). Uso de residuos agrícolas para la producción de biocombustibles en el departamento del Meta. *Tecnura*, 16(34), 142-156.
- Anaya-Durand, A. y Pedroza-Flores, H. (2008). Escalamiento, el arte de la ingeniería química: Plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 23(1), 31-39.
- Senneca, O. (2007). Kinetics of pyrolysis, combustion and gasification of three biomass fuels. *Fuel Processing Technology*, 88, 87-97.
- Seon-Jin, K.; Su-Hwa, J. y Joo-Sik, K. (2010). Fast pyrolysis of palm kernel shells: Influence of operation parameters on the bio-oil yield of phenol and phenolic compounds. *Biosource Technology*, 101, 9294-9300.
- Sheng, C. y Azevedo, L. (2005). Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. *Biomass and Bioenergy*, 28, 499-507.
- Suárez Romero, M. (2006). Investigación de la distribución de los productos de la biomasa según la norma ISO 647. Tesis de Pregrado. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Uemura, Y.; Saadon, S.; Osman, N. y Mansor, N. (2015). Torrefaction of oil palm kernel shell in the presence of oxygen and carbon dioxide. *Fuel*, 144, 171-179.
- Ugur, M. y Sevgi, S. (2015). Pyrolysis of Hornbeam Shell (*Carpinus betullus* L.) in a fixed bed reactor: Characterization of bio-oil and bio char. *Fuel*, 150, 672-678.
- Vassilev, S.; Baxter, D.; Andersen, L. y Vassileva, C. (2013). An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification. *Fuel*, 105, 40-76.
- Zhongking, M.; Dengyu, C.; Gu, J.; Bao, B. y Qisheng, Z. (2015). Determination of pyrolysis characteristics and kinetics of palm kernel shells using TGA-FTIR and model free integral methods. *Energy Conversion and Management*, 89, 251-259.



## Conciliación de inventarios *top-down* y *bottom-up* de emisiones de fuentes móviles en Bogotá, Colombia

### Conciliation of *top-down* and *bottom-up* inventories to estimate mobile source emissions in Bogota, Colombia

Luis Gabriel Carmona Aparicio<sup>1</sup>, Mauricio Alexander Rincón Pérez<sup>2</sup>,  
Andrés Mauricio Castillo Robles<sup>3</sup>, Boris René Galvis Remolina<sup>4</sup>, Hugo Enrique Sáenz Pulido<sup>5</sup>,  
Rodrigo Alberto Manrique Forero<sup>6</sup>, Jorge Eduardo Pachón Quinche<sup>7</sup>

**Fecha de recepción:** 5 de mayo de 2015

**Fecha de aceptación:** 15 de mayo de 2016

**Cómo citar:** Carmona Aparicio, L. G., Rincón Pérez, M. A., Castillo Robles, A. M., Galvis Remolina, B. R., Sáenz Pulido, H. E., Manrique Forero, R. A., & Pachón Quinche, J. E. (2016). Conciliación de inventarios top-down y bottom-up de emisiones de fuentes móviles en Bogotá, Colombia. *Revista Tecnura*, 20(49), 59-74. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.3.a04

#### RESUMEN

**Objetivo:** Este estudio presenta la conciliación del inventario de emisiones de fuentes móviles en Bogotá para el año 2013 aplicando las metodologías *top-down* y *bottom-up*.

**Método:** Una comparación de las emisiones de las diferentes categorías vehiculares fue realizada, así como la distribución geográfica y temporal de las mismas, mediante la creación de un código de procesamiento en JAVA. El proceso empleó la mayor cantidad de información disponible por las autoridades del Distrito Capital y estudios previos. La innovación particular del presente estudio consiste en

la obtención de los flujos vehiculares de vías secundarias a partir de un algoritmo que considera geometría de la vía, interacción entre vías arteriales y secundarias, y restricciones legales de movilidad.

**Resultados:** Los resultados muestran la estimación de emisiones para los contaminantes CO, CO<sub>2</sub>, COV, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y PM, además de su comparación con otros estudios realizados en la ciudad. Los valores obtenidos pueden ser catalogados como referentes mínimos y máximos de las emisiones emitidas para 2013, dada la incertidumbre de los datos.

**Conclusiones:** El proyecto proporciona una herramienta muy útil como insumo para las autoridades

<sup>1</sup> Ingeniero Ambiental y Sanitario, magíster en Eficiencia Energética y Ecología Industrial. Docente e investigador en la Universidad Piloto de Colombia y en el Institute FORWARD – For Worldwide Alternative Research and Development. Bogotá, Colombia. Contacto: [lugacapa@gmail.com](mailto:lugacapa@gmail.com)

<sup>2</sup> Ingeniero Químico, magíster en Ingeniería Ambiental. Profesional de modelación de calidad del aire en la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá. Bogotá, Colombia. Contacto: [alexrincomp@gmail.com](mailto:alexrincomp@gmail.com)

<sup>3</sup> Ingeniero de Sistemas, doctor en Ingeniería de Sistemas y Computación. Investigador en la Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Contacto: [amcastillor@unal.edu.co](mailto:amcastillor@unal.edu.co)

<sup>4</sup> Ingeniero Químico, magíster en Ingeniería Ambiental, doctor en Ingeniería Ambiental. Docente de la Universidad de La Salle, investigador Centro Lasallista de Investigación y Modelación Ambiental CLIMA. Bogotá, Colombia. Contacto: [bgalvis@unisalle.edu.co](mailto:bgalvis@unisalle.edu.co)

<sup>5</sup> Ingeniero Mecánico. Profesional Plan Decenal de Descontaminación del Aire de Bogotá, Secretaría Distrital de Ambiente. Bogotá, Colombia. Contacto: [hugo.saenz@ambientebogota.gov.co](mailto:hugo.saenz@ambientebogota.gov.co)

<sup>6</sup> Ingeniero en Recursos Hídricos y Gestión Ambiental. Docente Universidad Autónoma de Colombia. Bogotá, Colombia. Contacto: [rodrigo1358@icloud.com](mailto:rodrigo1358@icloud.com)

<sup>7</sup> Ingeniero Químico, magíster en Ingeniería Ambiental, doctor en Ingeniería Ambiental. Docente de la Universidad de La Salle, investigador Centro Lasallista de Investigación y Modelación Ambiental CLIMA. Bogotá, Colombia. Contacto: [jpachon@unisalle.edu.co](mailto:jpachon@unisalle.edu.co)

para identificar puntos significativos de emisión y establecer estrategias para su reducción en pro de la mejora de la calidad del aire de los ciudadanos. Su desarrollo puede ser replicado en la generación de protocolos para la estimación de emisiones de fuentes móviles, considerando las ventajas que conlleva cuando existen limitaciones de información. El método propuesto aún cuenta con incertidumbres que no es posible determinar dada la calidad de las fuentes de información.

**Palabras clave:** contaminación atmosférica, desagregación espacio-temporal, modelación ambiental, modelación de calidad del aire.

## ABSTRACT

**Aim:** This study presents the reconciliation of inventories of mobile emission in Bogota in 2013, applying *top-down* and *bottom-up* methodologies.

**Method:** A comparison of emissions from different vehicle categories was conducted, as well as the geographical and temporal distribution of them, by creating a processing code in JAVA. The process employed the largest amount of information available

from the authorities of the Capital District, and previous studies. The innovation of this research is the estimation of the traffic flows in secondary roads, based on an algorithm that considers road geometry, interaction between arterial and secondary roads, and legal restrictions on traffic.

**Results:** The results show the estimated emissions for pollutants CO, CO<sub>2</sub>, VOCs, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> and PM, and its comparison with other studies for the city. The values obtained can be classified as minimum and maximum references of the emissions generated in 2013, due to data uncertainty.

**Conclusions:** The project provides an upmost useful tool as input for the authorities in order to identify areas with significant emissions and to develop strategies for emissions reduction, towards improving the air quality of citizens. This method can be replicated in the generation of protocols for estimating emissions from mobile sources, but results need to be carefully reviewed given the quality of information sources.

**Keywords:** air pollution, air quality modeling, environmental modeling, spatio-temporal disaggregation.

## INTRODUCCIÓN

Bogotá (Colombia) es una de las ciudades con mayor contaminación del aire en Suramérica, siendo el material particulado la causa de más preocupación (Cárdenas-Franco, 2012; OMS, 2014). Mientras que el problema ha mejorado en los últimos años (PM<sub>10</sub> promedio anual se redujo de 74 ug/m<sup>3</sup> a 48 ug/m<sup>3</sup> entre 2005 y 2013), aún ocurren concentraciones por encima de los estándares considerados seguros (la OMS establece un promedio anual de 40 ug/m<sup>3</sup> para PM<sub>10</sub>; OMS, 2006), en especial al suroccidente de la ciudad (SDA, 2011; SDA, 2015a). Varios investigadores han señalado la afectación a la salud pública por la contaminación del aire bogotano, en especial la población más vulnerable: niños y tercera edad (Hernández *et al.*, 2009; Arciniegas *et al.*, 2006a, 2006b; Franco *et al.*, 2009).

Estudios recientes apuntan hacia los vehículos como la principal fuente directa e indirecta de emisión de contaminantes al aire en Bogotá (Ingeniería DICTUC, 2006; Rodríguez y Behrentz, 2009; SDA, 2011; Rojas y Peñaloza, 2010; Beltrán, Belalcázar y Rojas, 2012; Pachón, 2013). Las emisiones de estas fuentes están asociadas a la calidad del combustible, patrones de conducción, condiciones geográficas, estado y mantenimiento de los vehículos y de las vías, velocidades promedio de circulación, entre otros. Los vehículos también influyen la generación de material particulado resuspendido en la atmósfera.

En el caso de la estimación de inventarios de emisiones para fuentes móviles, se aplican tradicionalmente metodologías *top-down* y *bottom-up* (Lents *et al.*, 2011). Rojas y Peñaloza (2010) realizaron un inventario desagregado para la ciudad,

mientras que otros trabajos previos de inventarios de emisiones no contemplaron su desagregación espacio-temporal, ni una conciliación entre metodologías *top-down* y *bottom-up*, lo que resulta en una herramienta de comparación y ajuste que permite tener un inventario de emisiones con una menor incertidumbre (Ossés de Eicker, Zah, Triviño y Hurni, 2008; Saide, Zah, Osses y Ossés de Eicker, 2009; Tuia *et al.*, 2007) aunque es sabido que la aplicación de las dos metodologías, incluso con la misma información de entrada, puede llevar a diferentes resultados de emisiones (Wang *et al.*, 2009).

## METODOLOGÍA

### Inventario de emisiones top-down

El enfoque *top-down* se refiere tradicionalmente a la construcción del inventario partiendo de valores de emisiones del dominio completo o de baja resolución (por ejemplo, a nivel país). La estimación de emisiones de fuentes móviles por contaminante y categoría vehicular se realiza empleando la ecuación (1) (US EPA, 1997).

$$E_i = \sum_{j=0}^n FE_{ij} * FA_j * N_j \quad (1)$$

Donde,  $E_i$  (g/año): emisiones totales del contaminante  $i$  (PM, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, VOCs).

$FE_{ij}$  (g/km-veh): factor de emisión del contaminante  $i$  para la categoría vehicular  $j$ .

$FA_j$  (km/año): factor de actividad para la categoría vehicular  $j$ .

$N_j$  (veh): número de vehículos para la categoría vehicular  $j$ .

En este proyecto, se usaron los factores de emisión y los factores de actividad para 38 categorías vehiculares, recopilados de diferentes estudios (CAF, 2007; Rodríguez y Behrentz, 2009; Hernández-González y Jiménez, 2011; Rojas y Peñaloza, 2010; SDA, 2011; SDA y UNAL, 2013). De las categorías vehiculares, 32 coinciden con las empleadas en el Plan Decenal de Descontaminación del Aire de Bogotá (PDDAB) (SDA, 2011), dos más

incluyen subdivisiones para la categoría de motos de cuatro tiempos considerando su cilindraje, y cuatro corresponden a buses articulados y biarticulados con tecnología de emisión de gases Euro IV y V. Se seleccionaron factores de emisión reportados con incertidumbres cuantitativas para propagarlas en la emisión final. Las incertidumbres para los factores de emisión no disponibles en la literatura, fueron estimadas por ponderación lineal de aquellas reportadas por Rojas y Peñaloza (2010).

Para la determinación del número de vehículos de cada categoría circulando en la ciudad, se utilizó la base de datos del Registro Distrital Automotor (RDA), proporcionada por la Secretaría Distrital de Movilidad (SDM), con corte a 31 de diciembre de 2013. Los datos se encontraban clasificados por año, modelo, cilindraje, tipo de servicio y combustible. Transmilenio S.A. (TM) proporcionó el número de buses vinculados al Bus Rapid Transit (BRT) y el Sistema Integrado de Transporte Público (SITP) a la misma fecha de corte, detallando año, modelo y clase de vehículo. Para las motos, la información fue obtenida de los resultados del Contrato Interadministrativo 013 de 2012, suscrito entre la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) y la Universidad Nacional (UN). Los factores de emisión y los factores de actividad utilizados se encuentran en el anexo 1.

### Inventario de emisiones bottom-up

En la metodología *bottom-up*, el inventario se realiza tradicionalmente desde datos locales con mayor nivel de detalle o alta resolución, como flujos o volúmenes vehiculares, tipo y longitud de vías o perfiles horarios de tráfico. Las emisiones por contaminante y categoría vehicular se estiman aplicando la ecuación (2), que corresponde a la transformación de la ecuación (1) en función de las variables mencionadas y conservando los mismos factores de emisión en este caso.

$$E_i = \sum_{j=0}^n FE_{ij} * F_{jk} * L_k \quad (2)$$

Donde,  $E_i$  (g/h): emisiones totales del contaminante  $i$  (PM, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, VOCs).

$FE_{ij}$  (g/km-veh): factor de emisión del contaminante  $i$  para la categoría vehicular  $j$ .

$F_{jk}$  (veh/h): flujo vehicular para la categoría vehicular  $j$  en la categoría de malla vial  $k$ .

$L_k$  (km): longitud de la vía para la categoría de malla vial  $k$ .

En este proyecto las emisiones se desagregaron a un nivel de detalle por hora y en una resolución espacial de 1x1 km<sup>2</sup>, en un dominio con una malla de 55x55 celdas. La superposición entre el dominio de modelación (cuadrícula) y la malla vial genera la subdivisión de las vías en segmentos viales, a los cuales es posible asignarles atributos como: categoría de vía (arterial, intermedia, local, residencia, rural), flujo vehicular (medido en el punto de aforo y extrapolado a la malla vial haciendo uso de los polígonos de Thiessen), y uso de suelo. Al finalizar, la emisión de cada celda corresponde a la sumatoria de los aportes de cada segmento vial incluidos en dicha celda.

La figura 1 muestra las actividades desarrolladas para la estimación de emisiones mediante la aproximación *bottom-up*. Con el fin de extraer la información de conteos vehiculares y poder distribuir las emisiones en el espacio y tiempo, se desarrolló un código de cálculo basado en matrices en JAVA, el cual almacena los datos de entrada, vincula sus atributos, asigna valores de restricción y realiza las operaciones de multiplicación y adición iterativamente.

### Malla vial

La malla vial de Bogotá está conformada por el conjunto de vías arteriales, intermedias, locales y rurales (tabla 1). A esta red también se integra la infraestructura de vías de Transmilenio (sistema de transporte masivo de la ciudad de tipología BRT).

El cálculo efectivo de la longitud de los segmentos viales para cada tipo de vía se realizó usando ArcGIS® 10.2. La información geográfica de la red de la malla vial correspondió a la versión 12.13 de diciembre de 2013, del Mapa de Referencia para



**Figura 1.** Flujograma para desagregación espacio temporal de emisiones por fuentes móviles

**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 1.** Clasificación de la malla vial de la ciudad

Tipo	Tipo de clasificación	Tipologías especiales de vías según sección
Primaria	Malla vial arterial	Vías de 100, 60, 40, 30, 28, 25 y 22 (en zona rural) metros de ancho
Secundaria	Malla vial intermedia	Comprende vías de 22, 18 y 16 metros
Secundaria	Malla vial local	Comprende vías de 13, 10 y 8 metros
Secundaria	Malla vial rural	Vías que conectan o atraviesan el uso de suelo rural
Transmilenio	Troncales Transmilenio	Carriles de uso exclusivos del sistema

**Fuente:** elaboración propia.

el Distrito Capital y del Catálogo de Datos Geográficos (UAECD, 2014).

### Flujo vehicular

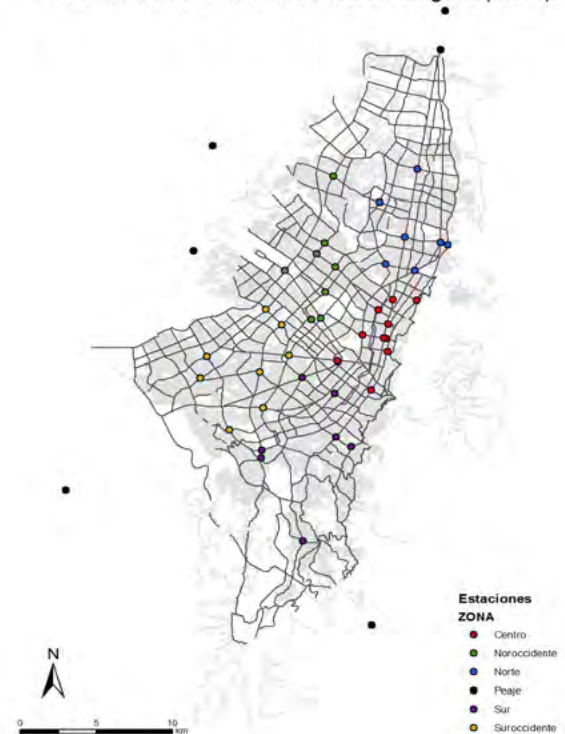
Para analizar el volumen vehicular de la ciudad en cuanto a horario, para diferentes tipos de vías y por categoría vehicular, se utilizó la información proporcionada para 40 intersecciones de la SDM (2014) para el año 2013, y de seis peajes de la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI, 2013) para el 2012. Se cuantificó la demanda del tránsito vehicular, es decir, frecuencia y cantidad de vehículos, para los 46 puntos de monitoreo viales identificados en la figura 2. La metodología para el aforo vehicular de las intersecciones se encuentra definida por la SDM y C&M (2005). Para el caso de los peajes, corresponde al tráfico promedio diario durante un mes de los proyectos de concesión carretera a cargo de la ANI.

Dado que la información de volúmenes vehiculares se encontraba sin procesar, fue necesario desarrollar un código en JAVA, que permitiera extraer la información de flujo de las bases de datos de la SDM y obtuviera el valor promedio por vía para un punto de monitoreo específico. La información se encontraba originalmente organizada por periodos de cada 15 minutos y por cada acceso de la vía, para posteriormente al procesamiento quedar consolidada en valores horarios y por el total de la vía.

Toda vez que los aforos se realizan únicamente sobre 46 puntos en vías arteriales de la ciudad, fue necesario extrapolar la información de tráfico al resto de vías haciendo uso del método de polígonos de Thiessen en ArcGIS®. Esta técnica de

interpolación es ampliamente utilizada para la desagregación de inventarios dada su simplicidad, efectividad y aplicabilidad para el área objeto de estudio (Denby *et al.*, 2005; Horalek *et al.*, 2005). Se utilizó este resultado para asignar el flujo sobre las demás vías arteriales en donde no se realizaron mediciones. El método define polígonos

Estaciones de aforo de tráfico en Bogotá (2013)



**Figura 2.** Localización puntos de monitoreo de tráfico de la SDM y peajes de la ANI

**Fuente:** elaboración propia con información de SDM.



determinados por las mediatrices a los segmentos de unión de los puntos de aforo, de forma que su perímetro es equidistante a los puntos vecinos (US EPA, 2004). Esta metodología complementa los avances realizados por Rojas y Peñaloza (2010), al incluir un mayor número de puntos de aforo y una asignación de valores de flujo vehicular específicos de acuerdo con la categoría de las vías.

Debido a la carencia de información de flujo vehicular en vías secundarias de la ciudad, se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones con el propósito de estimar su magnitud:

- i. La actividad vehicular de las vías secundarias no podrá ser igual o mayor a la de las vías principales, considerando que estas últimas son alimentadas por las secundarias. Para lo cual se definió un factor ( $k_{sec}$ ) con valores entre cero y uno, de acuerdo con la ecuación (3).

$$k_{sec} = \frac{F_{sec} \cdot L_{sec}}{F_{art} \cdot L_{art}} \quad (3)$$

Donde,  $k_{sec}$ : factor que limita la actividad vehicular de las vías secundarias por debajo de la actividad vehicular de las vías arteriales de una celda ( $0 > k_{sec} \leq 1$ ).

$F_{sec}$ : flujo vehicular de las vías secundarias que pasa por la celda (veh/h).

$L_{sec}$ : longitud de las vías secundarias contenidas la celda (km).

$F_{art}$ : flujo vehicular de las vías principales (arteriales) que pasa por la celda (veh/h).

$L_{art}$ : longitud de las vías arteriales contenidas la celda (km).

- ii. El flujo de las vías secundarias se ve directamente afectado por la capacidad de las vías. Por configuración geométrica una vía secundaria comúnmente es más angosta que una vía arterial (tabla 1), y por tanto el volumen de vehículos se verá reducido en la misma proporción. De aquí se obtiene que para una vía intermedia el valor

es de 0,37, obtenido como la relación entre el ancho promedio de una vía intermedia (22 m) respecto al ancho promedio de una vía arterial (60 m). Para las vías locales (ancho promedio de 13 m) el valor será de 0,22.

- iii. Para la malla vial local con uso residencial se establece un valor de cero (0) para las categorías de camiones grandes y transporte público colectivo bus por restricción legal.
- iv. Para la malla vial Transmilenio se mantiene el valor de flujo de buses articulados obtenido mediante la distribución por polígonos de Thiessen.

### Factores de emisión

En razón a que la SDM tiene definidas 15 categorías vehiculares para realizar los aforos vehiculares en la ciudad y la ANI cuenta con siete, lo que difiere de las 38 establecidas en la metodología *top-down* según la información del PDDAB, mediante la ecuación (4) fue necesario obtener un factor de emisión ponderado para cada categoría SDM, en función del número de vehículos registrados del parque automotor.

$$FE_{PONDERADO-CAT\ SDM-ANIJ} = \frac{\sum_{a=1}^n (FE_{CAT-a\ PDDAB} * N_{CAT-a\ PDDAB})}{\sum_{a=1}^n (N_{CAT-a\ PDDAB})} \quad (4)$$

Donde,  $FE_{PONDERADO-CAT\ SDM-ANIJ}$  (g/km-veh): factor de emisión ponderado del contaminante  $i$  para la categoría vehicular agrupada  $j$  de la SDM.

$FE_{CAT-a\ PDDAB}$  (g/km-veh): factor de emisión del contaminante  $i$  para una categoría vehicular individual  $a$  del PDDAB.

$N_{CAT-a\ PDDAB}$  (veh): número de vehicular de la categoría  $a$  del PDDAB.

Los factores de emisión y sus incertidumbres fueron igualmente recopilados de diferentes referencias bibliográficas (CAF, 2007; Rodríguez y Behrentz, 2009; Rojas y Peñaloza, 2010; SDA, 2011; Hernández-González y Jiménez, 2011; SDA y UNAL, 2013).

## RESULTADOS

### Inventario general de emisiones top-down

La estimación *top-down* es calculada para la emisión anual de los diferentes contaminantes para cada categoría vehicular definida. El número de vehículos, resultado de la consolidación de las diferentes bases de datos (SDM, TM, SDA), se incluye en el anexo 1 (disponible en: <https://drive.google.com/open?id=0B3lzbQba8UcELTVwc0tMYjhqR1U>). La tabla 2 presenta los estimativos del inventario de emisiones de fuentes móviles para el año 2013, distribuidos por categorías vehicular.

Las categorías de mayor aporte al inventario de PM son los camiones (C-36,4 %), buses de transporte público (B-29,1 %), y con similar participación las motos (M-7,4 %) y microbuses (MB-7,1 %). Por su parte, las categorías de mayor aporte de NO<sub>x</sub> son los vehículos particulares (VP-23,4 %) seguido por camperos/camionetas (CC-18,9 %), taxis (T-18,3 %) y camiones (C-12,4 %). En cuanto a las emisiones de los restantes contaminantes VOC, CO, SO<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> los vehículos particulares

presentan el mayor porcentaje de aporte con niveles del 38,5 %, 34 %, 64 %, y 38,2 %, respectivamente. Las motocicletas (M) generan su mayor aporte a las emisiones de CO y VOC. Las categorías Transmilenio (TM) y Transporte Especial y de Turismo (ET) se caracterizan por generar bajos niveles de aporte de emisión para los contaminantes estudiados.

### Inventario de emisiones bottom-up: desagregación espacial y temporal

#### Malla vial

De acuerdo con el análisis de la malla vial de Bogotá, realizado en ArcGIS®, se identificó que la ciudad cuenta con 8276 km-carril para el tipo de vías y la grilla evaluada, de los cuales, el 11 % corresponden a malla vial arterial, 18 % a intermedia, 63 % local, 7 % rural y 1 % a las troncales de Transmilenio. Al finalizar el procesamiento de la información cartográfica, se obtuvo la información de todos los tramos (aprox. 131.071 segmentos en la malla vial de Bogotá), cada uno de los cuales fue asociado a una celda del dominio.

**Tabla 2.** Total inventario general de emisiones por contaminante e incertidumbres (ton/año) por categoría vehicular

Categoría vehicular	CO <sub>2</sub>		CO		NO <sub>x</sub>		VOC		PM		SO <sub>2</sub>	
	Valor	I	Valor	I	Valor	I	Valor	I	Valor	I	Valor	I
VP	3.998.558	401.129	294.970	119.904	15.550	7.764	35.418	15.657	45	31	9.025	3.131
CC	2.880.139	642.771	196.222	91.727	12.567	6.348	19.806	6.377	118	81	1.875	670
T	966.706	137.013	41.865	13.701	12.179	4.948	12.940	4.187	3	2	1.324	457
M	1.051.331	205.325	258.587	150.040	5.417	3.262	17.814	5.454	86	46	692	244
B	501.859	90.335	27.061	10.277	6.868	3.235	3.528	1.244	338	255	442	151
TM	221.189	39.814	1.116	424	2.676	1.259	103	36	45	31	216	74
MB	239.835	43.170	20.311	7.717	2.755	1.295	901	317	83	53	93	33
ET	26.319	4.737	421	160	301	142	97	34	23	15	21	7
C	572.286	103.012	25.891	9.839	8.227	3.872	1.279	452	423	251	420	145
Total	10.458.221	1.667.306	866.445	403.789	66.540	32.124	91.885	33.757	1.163	803	14.109	4.911

**Nota:** I – incertidumbre, C-camiones, ET-transporte especial y de turismo, TM-Transmilenio, B-buses, MB-microbuses, M-motos, T-taxis, CC-camperos y camionetas, VP-vehículos particulares.

**Fuente:** elaboración propia.

### Flujo vehicular

Las figuras 3 y 4 presentan el comportamiento del flujo vehicular diario con relación a los 40 puntos monitoreados por la SDM. Los flujos horarios por vía se distribuyen en 6,4 % para volúmenes vehiculares menores a 800 veh/hora; 56,1 % para flujos entre 800 y 6000 veh/hora, 23,3 % para flujos entre 6000 y 11.000 veh/hora y 14,2 % para flujos mayores a 11.000 veh/hora. A partir de las 6:00 hasta las 19:00 horas se presenta el mayor tráfico vehicular. Se evidencia la mayor preponderancia que tienen los vehículos ligeros (automóviles particulares, camionetas, camperos y taxis) en la circulación urbana, con una proporción de 65,7 % para día hábil y 74 % para día festivo; seguido de

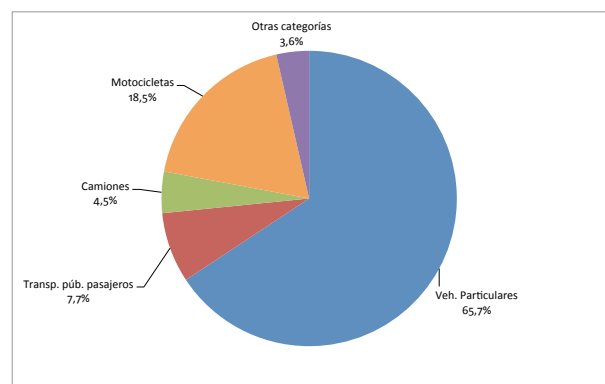
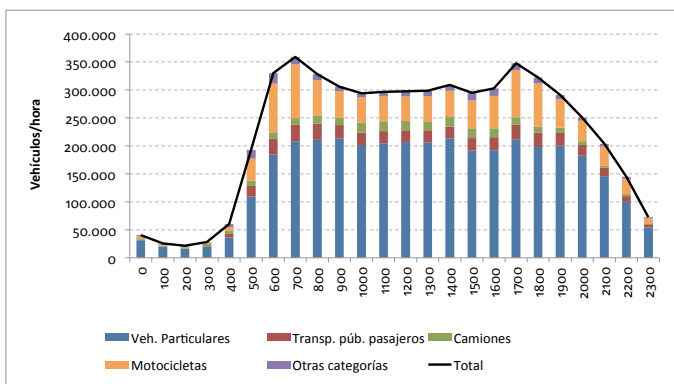
las motocicletas con proporciones de 18,5 % (hábil) y 13,3 % (sábado).

### Factores de emisión

En el anexo 2 se presentan los factores de emisión ponderados para las 15 categorías vehiculares que fueron cuantificadas mediante los aforos vehiculares (disponible en: <https://drive.google.com/open?id=0B3IzbQba8UcEU1JacDhZVxkxQdzQ>). El cálculo también fue aplicado a los factores de incertidumbre.

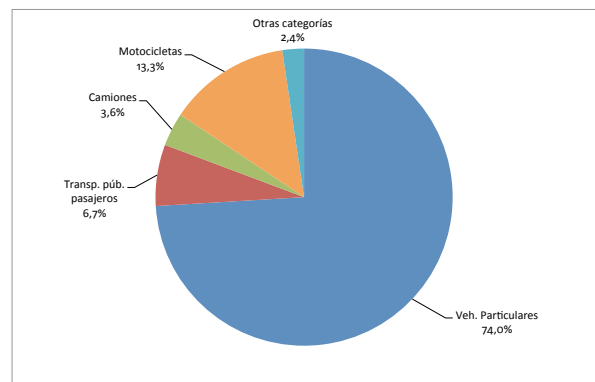
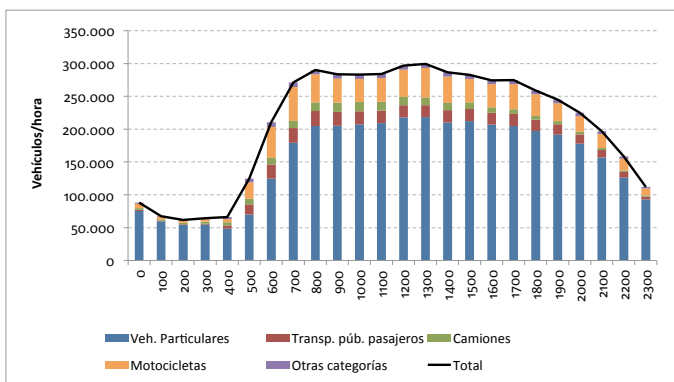
### Inventario desagregado espacial y temporalmente

La tabla 3 presenta el resultado de la ejecución del código JAVA para la obtención de las emisiones de



**Figura 3.** Perfil flujo horario y distribución categorías vehiculares por categoría para las 40 estaciones en día hábil

Fuente: elaboración propia.



**Figura 4.** Perfil flujo horario y distribución categorías vehiculares por categoría para las 40 estaciones en día sábado

Fuente: elaboración propia.

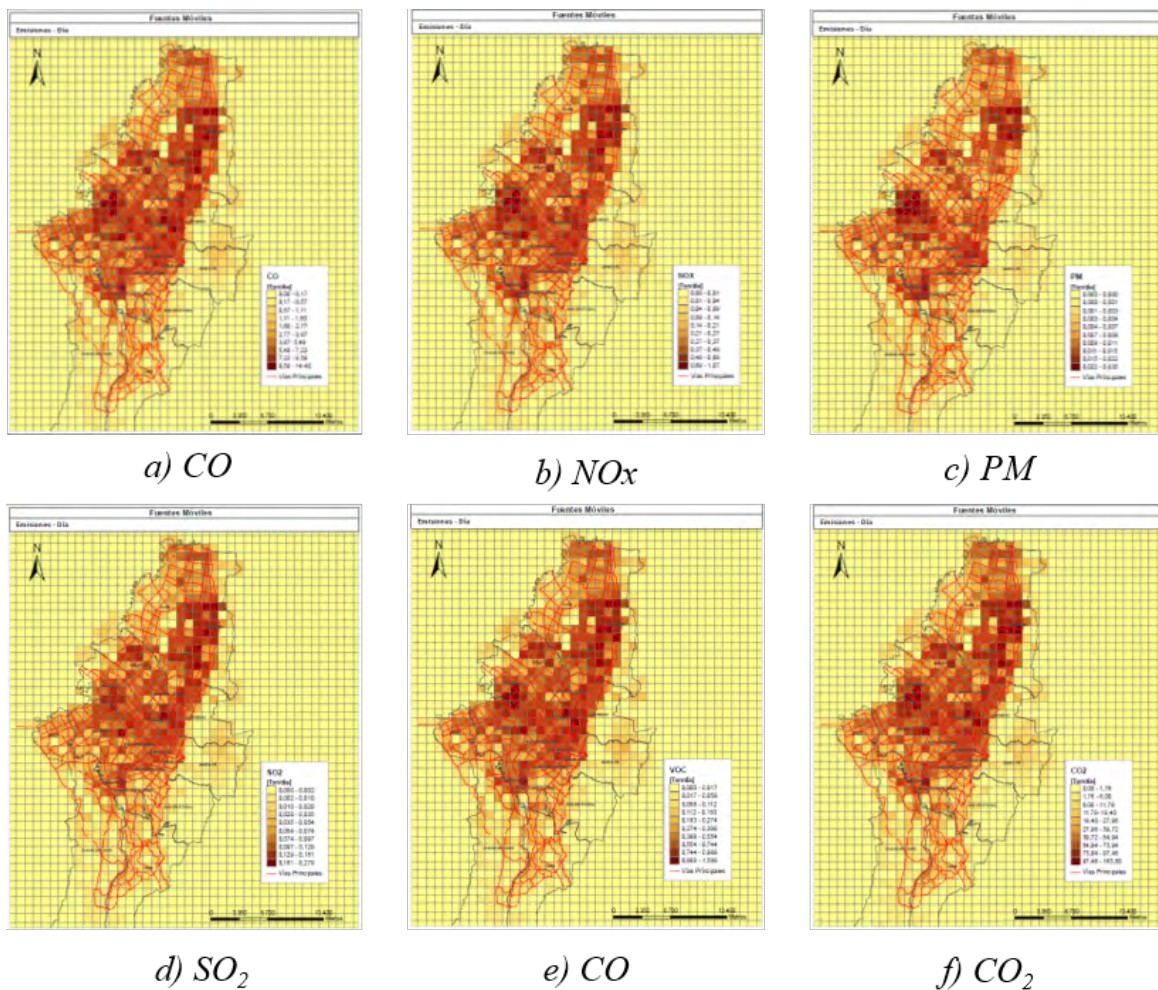
fuentes móviles consolidando el resultado para los dos tipos de días típicos.

**Tabla 3.** Emisiones de fuentes móviles para la metodología *bottom-up* (ton/día).

Contaminante	Hábil		Sábado	
	Valor	Incert.	Valor	Incert.
CO	1.945	887	1.966	870
CO <sub>2</sub>	19.656	3.500	19.850	3.448
COV	200	77	209	81
MP	3,9	2,8	2,8	2,1
NO <sub>x</sub>	136	72	126	67
SO <sub>2</sub>	32	11	35	12

Fuente: elaboración propia.

Se observa que no hay mayor diferencia entre los resultados obtenidos para el día hábil respecto al sábado. Si bien, en la tabla 3 se muestra el consolidado de las 24 horas, las figuras 3 y 4 permiten identificar que el patrón de flujos de tráfico varía, es decir, mientras que para día hábil el comportamiento es casi constante a partir del inicio de la hora pico a las 06:00 hasta las 08:59 (tipo meseta), para el día sábado la tendencia se concentra más sobre las horas del mediodía (tipo montaña). Adicionalmente, para los días hábiles se presenta restricción vehicular por el “pico y placa”, lo que reduce el volumen de vehículos particulares en operación; mientras que para el día sábado esta medida no existe. Por su parte, la presencia de



**Figura 5.** Desagregación espacio temporal para fuentes móviles para 24 horas en día hábil

Fuente: elaboración propia.

buses, busetas y camiones en fines de semana se reduce, lo que genera el efecto de disminución en el material particulado (tabla 3).

La figura 5 presenta la desagregación espacial del inventario de emisiones *bottom-up* para los contaminantes CO, NO<sub>x</sub>, PM, SO<sub>2</sub>, VOC, CO<sub>2</sub> evaluados para el día hábil y una hora específica del día. Para todos los compuestos analizados, los mayores puntos de generación de emisión se concentran en ocho zonas donde se contabilizó un mayor volumen vehicular. El aumento en el número de puntos de conteo vehicular, pasando de 26 en 2008 a 40 en 2013, permitió refinar la estimación de los inventarios de fuentes móviles a nivel espacial. De esta forma se evidenció la presencia de nuevas áreas significativas de emisiones de contaminantes especialmente en el sur y norte de la ciudad. Lo anterior permite la adopción de medidas con un carácter preventivo y enfocadas a la reducción en la fuente, así como establecer estrategias de seguimiento y control más efectivas (García, García y Vaca, 2012). Así mismo, al comparar los mapas en los que las emisiones por vehículos particulares, camperos y camionetas son mayores (CO y SO<sub>2</sub>), respecto a mapas en los que otras categorías vehiculares presentan una mayor contribución a diferentes contaminantes (por ejemplo, buses, busetas y camiones para PM), se observa como algunas zonas son más representativas en función del flujo vehicular específico al que se le deba atribuir la mayor emisión.

## Conciliación de inventarios de emisiones atmosféricas por fuentes móviles

En la tabla 4 se presenta la comparación entre el inventario de emisiones atmosféricas por fuentes móviles *top-down* respecto a la estimación de emisiones anuales *bottom-up*. La conciliación se realiza en términos de emisiones totales al año, pues a su vez esta permite la comparación con estudios previos. Por su parte, la desagregación espacial y temporal del inventario *top-down* requiere de un criterio de distribución de información (*surrogates*), situación que no fue aplicada en el presente proyecto. El resultado de la aproximación *bottom-up* muestra un valor inferior en todos los contaminantes, con excepción del material particulado. Esta tasa menor de emisión es resultado de la menor actividad vehicular horaria de diversas categorías vehiculares calculada en el método *bottom-up*, especialmente en motocicletas (tabla 5). Sin embargo, para material particulado existe un aumento en el volumen vehicular en las categorías que generan un mayor aporte de este contaminante (buses y camiones). En todo caso, y con excepción del CO<sub>2</sub>, los valores totales anuales de las dos metodologías se consideran cercanos teniendo en cuenta que se traslapan con los rangos de incertidumbres de las diferentes metodologías. Por ejemplo, la incertidumbre de CO es alrededor del 46 %, mientras que la diferencia obtenida entre las dos metodologías es de 17 %.

**Tabla 4.** Comparación de resultados *bottom-up* vs. *top-down*

Contaminante	Desagregación ( <i>bottom-up</i> ) ton/año		Inv. general ( <i>top-down</i> ) ton/año		Diferencia
	Valor	Incert.	Valor	Incert.	
CO	717.945	321.110	866.445	403.789	-17%
CO <sub>2</sub>	7.254.350	1.268.548	10.458.221	1.667.306	-31%
COV	74.579	28.450	91.885	33.757	-19%
MP	1.327	956	1.163	763	14%
NO <sub>x</sub>	48.927	25.770	66.540	32.124	-26%
SO <sub>2</sub>	12.085	4.258	14.109	4.911	-14%

Fuente: elaboración propia.

La tabla 5 muestra un comparativo entre la cantidad de vehículos registrados en el distrito de acuerdo con el RDA, el factor de actividad por cada categoría vehicular (tanto *top-down* como *bottom-up*) y la representatividad de cada categoría con relación a los flujos aforados en las estaciones de monitoreo.

Se observa un incremento significativo en el flujo de buses y camiones durante los conteos vehiculares (*bottom-up*) respecto a la flota registrada oficialmente y frente a su correspondiente factor de actividad manejado en la metodología *top-down*. Esta se identifica como la principal causa del incremento del material particulado. Además, se aprecia una reducción significativa en la operación de las motos y de buses de Transmilenio desde la

perspectiva *bottom-up* con relación a la aproximación *top-down*. Dado que los conteos vehiculares solo se realizan en vías principales, existe una incertidumbre aún no calculada para el flujo vehicular de vías secundarias que puede influir en el inventario de emisiones desde la metodología *bottom-up*.

Si bien era de esperarse una concordancia entre los valores de emisión estimados por las aproximaciones *bottom-up* y *top-down*; sin embargo, diversos factores incidieron en la diferencia entre estos dos resultados. La variación en los valores de estimación de emisiones en las dos metodologías se debió a diversas limitaciones que existen en las metodologías, que para el caso en particular se señalan en la tabla 6.

**Tabla 5.** Comparación de variables de movilidad para las dos metodologías evaluadas

Categoría vehicular	Vehículos registrados al 2013 (núm. vehículos)	%	Actividad vehicular <i>top-down</i> (veh-km/día)	%	Actividad vehicular <i>bottom-up</i> (veh-km/día)	%
Automóviles, camperos y taxis	1.446.618	76,0%	2.882.974	66,3%	2.907.595	74,6%
Microbús	11.666	0,6%	87.495	2,0%	88.047	2,3%
Bus, buseta e intermunicipales	15.354	0,8%	115.155	2,6%	193.976	5,0%
Buses articulados y biarticulados	1.609	0,1%	13.776	0,3%	1.051	0,1%
Buses alimentadores	825	<0,1%	6.531	0,2%	9.798	0,3%
Buses especiales	608	<0,1%	4.373	0,1%	57.988	1,5%
Camiones	39.543	2,1%	140.048	3,2%	145.417	3,7%
Motocicletas	385.158	20,3%	1.099.195	25,3%	493.571	12,7%
Total	1.901.381	100%	4.349.546	100%	3.897.442	100%

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 6.** Limitaciones en la estimación de emisiones

Variable	Metodología	Limitaciones
Categoría vehicular	top-down bottom-up	Falta de homogenización de las clasificaciones vehiculares entre los distintos entes administrativos que requieran información de flujos vehiculares (p. ej., para PDDAB son 32 mientras que para SDM son 15).
Factores de emisión	top-down bottom-up	Desactualización de factores de emisión propios para la ciudad debido a recientes cambios en la calidad del combustible.
Número de vehículos	top-down	Ausencia de un reporte obligatorio a las autoridades de los procesos de reconversión a gas natural, híbrido o cualquier otra tecnología de combustible, desactualizando las bases de datos oficiales. Omisión del número de vehículos no pertenecientes a la ciudad de Bogotá.
Factor de actividad	top-down	Incertidumbre al estimar el factor de actividad de cada categoría vehicular por año modelo de los vehículos.
Flujo vehicular	bottom-up	Carencia de aforos vehiculares en otras tipologías de vía no arteriales, como intermedias, locales y rurales, reduciendo la certeza en la estimación de la actividad vehicular de la malla secundaria y sus respectivas subtipologías. Falta de segregación de taxis por combustible al momento de ejecutar los aforos imposibilitando la opción de evaluar su impacto de forma independiente.
Longitud	bottom-up	Ausencia de un modelo de tráfico de la ciudad con el fin de tener una aproximación más detallada del comportamiento y distribución de los vehículos a lo largo el día y los diferentes tipos de vías. Restricciones en la información cargada a la geo-database, por ejemplo, ancho de la vía.

Fuente: elaboración propia.

## Comparación del inventario general de emisiones con otros trabajos

En la tabla 7 se muestran los resultados obtenidos respecto a otros estudios realizados para la ciudad. Se observa que los valores son cercanos a los obtenidos por la SDA (2014), los cuales se pueden considerar coherentes, debido a que la flota vehicular se ha incrementado un 69 % desde 2008, especialmente en las categorías de automóviles y motocicletas. De hecho, entre 2002 y 2012 la flota de vehículos particulares, camperos y camionetas en la ciudad aumentó en un 200 %, teniendo en la actualidad cerca de 1.400.000 unidades, mientras que los buses, camiones y taxis se han mantenido estables o incluso se han reducido. Por su parte, las motos también muestran incremento del 63 % respecto al año 2008 (SDA 2015b), incidiendo directamente en las emisiones de CO y VOC. El gas natural vehicular ha venido reemplazando la gasolina, especialmente en autos particulares de gran cilindraje, camperos, camionetas y taxis (Minminas, 2014), lo que se refleja en mayores emisiones de NO<sub>x</sub> y VOC por parte de estas

categorías vehiculares con relación al total del año 2008.

Al comparar las emisiones de PM del servicio público colectivo dentro del PDDAB para el 2008 con respecto a la actualización en 2013, se encuentra que las emisiones se han mantenido constantes, con una tendencia a la baja. Lo anterior se explica por la reducción del parque automotor de servicio público colectivo por la entrada del SITP, contando en el 2008 con un parque de 17.536 vehículos y en 2013 de 16.011, según el Observatorio Ambiental de Bogotá (SDA 2015c).

Frente a la validez de los resultados, este estudio se mantiene dentro del rango de máximos y mínimos obtenidos en otras publicaciones, y se podría establecer que las emisiones del año 2013 se encuentran dadas por el rango obtenido entre los valores *bottom-up* y *top-down*.

Se identifica que los resultados muestran diferencias significativas con los valores reportados por Rojas y Peñaloza (2010); sin embargo, fuera del año evaluado, las metodologías utilizadas difieren, puesto que en dicho estudio se realiza una combinación *top-down* y *bottom-up*, además de

**Tabla 7.** Comparación de inventarios de emisiones en Bogotá

Estudio	Año evaluado	Emisión (Ton/Año)					
		CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	VOC	PM	SO <sub>2</sub>
Este estudio, <i>bottom-up</i>	2013	7,254,350	717,945	48,927	74,579	1,327	12,085
Este estudio, <i>top-down</i>	2013	10,458,221	866,445	66,540	91,885	1,163	14,109
SDA (2014)	2013	10,232,234	741,560	62,918	65,247	836	NA
Hernández-González y Jiménez (2011)	2008	3,160,896	NA	NA	NA	NA	NA
Rojas y Peñaloza (2010)	2008	NA	706,932	57,658	108,011	1,594	13,009
SDA y UDC (2011)	2010	NA	NA	NA	48,350	NA	NA
SDA (2011)	2008	6,000,000	490,000	54,000	62,000	1,400	NA
Rodríguez y Beherentz (2009)	2008	4,800,000	450,000	30,000	60,000	1,100	NA
Promedio	-	6,984,284	662,147	53,340	72,868	1,237	13,068
Mínimo	-	3,160,896	450,000	30,000	48,350	836	12,085
Máximo	-	10,458,221	866,445	66,540	108,011	1,594	14,109

**Fuente:** elaboración propia.

hacer supuestos muy distintos a los de la presente estimación, especialmente para los flujos vehiculares en vías principales y secundarios. Por ejemplo, el volumen de las vías secundarias se obtuvo mediante consulta a personas del sector transporte, mientras que en el presente estudio se estableció un factor en función de la capacidad vial y al concepto de balance de masa. Por otra parte, en Rojas y Peñaloza (2010) los flujos tomados fueron totales del punto y no promedio de la vía.

## CONCLUSIONES

Se realizó la conciliación de inventarios de emisiones de fuentes móviles bajo las aproximaciones *top-down* y *bottom-up*. Esto fue realizado mediante la comparación de los resultados totales de ambas metodologías y su respectivo análisis de las incertidumbres de las estimaciones. Se encontró una similitud en los valores de emisiones obtenidos, lo que a su vez se estableció como un rango en el inventario de emisiones para la ciudad. De acuerdo con los valores obtenidos, para el año 2013 las fuentes vehiculares en Bogotá emitieron aproximadamente: 7'000.000 a 10'500.000 ton CO<sub>2</sub>; 700.000 a 870.000 ton CO; 48.000 a 67.000 ton de NO<sub>x</sub>; 74.000 a 92.000 ton VOC, 1.100 a 1.300 ton de PM y 12.000 a 14.000 ton SO<sub>2</sub>. El estudio fue comparado respecto a otras publicaciones de inventario de fuentes móviles para Bogotá, identificando la razonabilidad de los resultados del presente estudio.

Se establecieron metodologías para la estimación de flujos vehiculares en vías secundarias, procesamiento de la geo-database, desagregación espacio-temporal de las emisiones, entre otras, las cuales pueden ser usadas a futuro para actualizar el inventario de emisiones de forma periódica. Se generaron perfiles diarios de tráfico a partir de la información de conteos vehiculares que fueron usados en la desagregación temporal de las emisiones.

Se desarrolló e implementó una herramienta en código JAVA (disponible en: <https://github.com/SDA-SALLE/excelParser>), para la extracción y procesamiento de información de flujos vehiculares, así como su asociación a los respectivos factores de emisión. La herramienta también permite el análisis y ponderación de datos para cálculo de flujo vehicular en vías secundarias, las cuales no contaban con mediciones en estudios anteriores.

La distribución geográfica de las emisiones permitió distinguir nuevas zonas críticas en el norte y sur de la ciudad que no habían sido identificadas en estudios previos por la falta de información más detallada de aforos de tráfico, lo cual sirve de herramienta de planificación y seguimiento para las autoridades de la ciudad.

La estimación de emisiones posee una alta sensibilidad al método de tratamiento de los datos de conteo vehicular. De igual forma, limitaciones relacionadas con la homogenización de la información, desactualización de factores de emisión, ausencia de aforos vehiculares en vías secundarias, restricciones en la información de la geo-database, entre otras (tabla 6), incrementaron el nivel de incertidumbre de los resultados, por lo que se hace necesario contar con un modelo de tráfico en la ciudad que responda a estas inquietudes. Los hallazgos identificados con el estudio pueden ser empleados por las autoridades locales como instrumento para la planificación de la movilidad y el control de la contaminación del Distrito Capital, desafíos claros para mejorar la calidad de vida de los ciudadanos.

## FINANCIAMIENTO

Este proyecto fue financiado por la Secretaría de Ambiente de Bogotá, en el marco del contrato 1467 de 2013 suscrito con la Universidad de La Salle. Los autores agradecen a todas las personas y organizaciones que proporcionaron información o consejos para el desarrollo de este proyecto.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) (2013). *Informe de Tráfico Por Categoría y estación de los proyectos de concesión carretera a cargo de la ANI y el tráfico Promedio Diario: Tráfico Promedio Diario durante un mes (TPDm) para el período 2012*. Bogotá: Agencia Nacional de Infraestructura.
- Arciniegas, A.; Rodríguez, C.; Pachón, J.; Sarmiento, H. y Hernández, L. J. (2006a). Estudio de la morbilidad en niños menores a 5 años por enfermedad respiratoria aguda y su relación con la concentración de partículas en una zona industrial de la ciudad de Bogotá. *Acta Nova*, 3(2), 147-154.
- Arciniegas, A.; Rodríguez, C.; Pachón, J.; Sarmiento, H. y Hernández, L.J. (2006b). Relación entre enfermedad respiratoria aguda en niños menores a cinco años y contaminación atmosférica en Bogotá. *Investigaciones en Seguridad Social y Salud*, 8, 121-135.
- Beltrán, D.; Belalcázar, L.C. y Rojas, N. (2012). Emisiones vehiculares de material particulado (PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>) por resuspensión de polvo y abrasión de Bogotá. *Revista de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 231, 25-33.
- Corporación Andina de Fomento (CAF) (2007). Observatorio de Movilidad Urbana: Informe de Movilidad Urbana de Bogotá. Recuperado el 1 de mayo de 2013, de: [http://omu.caf.com/media/15663/omu\\_ciudad\\_bogot%C3%A1.xls](http://omu.caf.com/media/15663/omu_ciudad_bogot%C3%A1.xls)
- Cárdenas-Franco, A.H. (2012). Consideraciones del material particulado en Bogotá. Alternativas tecnológicas de medición de la calidad del aire. *Tecnura*, 13(25), 107-118. Recuperado de: <http://tecnura.udistrital.edu.co/ojs/index.php/revista/article/view/306>
- Denby, B.; Horalek, J.; Walker, S.E.; Eben, K. y Fiala, J. (2005). *Interpolation and assimilation methods for European scale air quality assessment and mapping Part I: Part I: Review and Recommendations*. Bilthoven: European Topic Centre on Air and Climate Change
- Franco, J.F.; Rojas, N.; Sarmiento, O.L.; Hernández, L.J.; Zapata, E.; Maldonado, A.; ... Behrentz, E. (2009). Niveles de material particulado en colegios distritales ubicados en vías con alto tráfico vehicular en la ciudad de Bogotá: estudio piloto. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 49, 101-111.
- García U., C.A.; García U., J.C. y Vaca B., M.L. (2012). Emisión de dioxinas y furanos (PCDD/PCDF) en Colombia: evaluación y diagnóstico. *Tecnura*, 16, 194-206.
- Hernández, L.J.; Medina, K.; Cantor, L.; Rodríguez, N.; Barrera, J.; Bayona, J. y Aristizábal, G. (2009). *Asociación entre la contaminación del aire y la morbilidad por enfermedad respiratoria aguda en menores de 5 años en tres localidades de Bogotá*. Presentación en el II Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad del Aire y Salud Pública, 14 de julio. Cartagena de Indias, Colombia.
- Hernández-González, A. y Jiménez, R. (2011). *Desarrollo de un inventario georreferenciado de emisiones de dióxido de carbono por fuentes móviles en el área urbana de Bogotá*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Horalek, J.; Denby, B.; DeSmet, P.; DeLeeuw, F.; Brabec, M. y Fiala, J. (2005). *Interpolation and assimilation methods for European scale air quality assessment and mapping Part II : Development and testing new methodologies*, Bilthoven: European Topic Centre on Air and Climate Change
- Ingeniería DICTUC. (2006). *Actualización del inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos en la región metropolitana de Santiago de Chile 2005*. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Lents, J.; Walsh, M.; He, K.; Davis, N.; Osses, M.; Tolvett, S. y Hu, L. (2011). *Handbook of air quality management*. Recuperado de: [www.aqbook.org](http://www.aqbook.org)
- Ministerio de Minas y Energía (Minminas) (2014). *Estadística nacional de conversiones vehiculares a Gas Natural*. Recuperado el 1 de mayo de 2014, de: [http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/UserFiles/File/GAS/Gas\\_Natural\\_Vehicular/Conversion/PROGRAMA\\_GNV\\_DICIEMBRE\\_2013.pdf](http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/UserFiles/File/GAS/Gas_Natural_Vehicular/Conversion/PROGRAMA_GNV_DICIEMBRE_2013.pdf)

- Organización Mundial para la Salud (OMS) (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Recuperado de: [http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_spa.pdf](http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf)
- Organización Mundial para la Salud (OMS) (2014). *Air pollution database, by country and city*. Recuperado de: [www.who.int/quantifying\\_ehimpacts/national/countryprofile/AAP\\_PM\\_database\\_May2014.xls](http://www.who.int/quantifying_ehimpacts/national/countryprofile/AAP_PM_database_May2014.xls)
- Ossés de Eicker, M.; Zah, R.; Triviño, R. y Hurni, H. (2008). Spatial accuracy of a simplified disaggregation method for traffic emissions applied in seven mid-sized Chilean cities. *Atmospheric Environment*, 42(7), 1491-1502. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.10.079>
- Pachón, J.E. (2013). Revisión de metodologías usadas para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas en Colombia: caso de estudio Bogotá. En: *Contaminación Atmosférica e Hídrica en Argentina: contribuciones del la IV Reunión Anual PROIMCA y II Reunión Anual PRODECA* (pp. 367-384). Buenos Aires: Universidad Tecnológica Nacional de Argentina.
- Rodríguez, P. y Behrentz, E. (2009). *Actualización del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá, a través de mediciones directas*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Rojas, N. y Peñalosa, N. (2010). *Distribución espacial y temporal del inventario de emisiones provenientes de las fuentes móviles y fijas de la ciudad de Bogotá*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Saide, P.; Zah, R.; Osses, M. y Ossés de Eicker, M. (2009). Spatial disaggregation of traffic emission inventories in large cities using simplified top-down methods. *Atmospheric Environment*, 43(32), 4914-4923. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.07.013>
- Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) (2011). *Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá*. Bogotá D.C. Recuperado de: [http://ambientebogota.gov.co/en/c/document\\_library/get\\_file?uuid=b5f3e23f-9c5f-40ef-912a-51a5822da320&groupId=55886](http://ambientebogota.gov.co/en/c/document_library/get_file?uuid=b5f3e23f-9c5f-40ef-912a-51a5822da320&groupId=55886)
- Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) (2014). *Inventario de emisiones de fuentes móviles con corte a diciembre 2013*. Bogotá: Secretaría Distrital de Ambiente.
- Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) (2015a). Concentración de Material Particulado Inferior a 10 Micrómetros {PM10} Promedio Mensual por Estación- PM10PME. Recuperado de: <http://oab.ambientebogota.gov.co/es/indicadores?id=876&v=l>
- Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) (2015b). Número de Motocicletas Particulares- NMTP. Recuperado de: <http://oab.ambientebogota.gov.co/es/indicadores?id=269&v=l>
- Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) (2015c). Número de Vehículos de Servicio Público Colectivo- NV-TPC. Recuperado de: <http://oab.ambientebogota.gov.co/es/indicadores?id=270&v=l>
- Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) y Universidad de Cundinamarca (UDC) (2011). *Inventario de emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) proveniente de fuentes fijas, móviles y de área. Convenio 1360 de 2010*. Bogotá: Secretaría Distrital de Ambiente.
- Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) y Universidad Nacional de Colombia (UNAL) (2013). *Informe del Contrato Interadministrativo 013 de 2012*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Secretaría Distrital de Movilidad (SDM) y Cal y Mayor y Asociados (C&M) (2005). *Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y el Transporte*. Bogotá: C&M. 2a edición.
- Secretaría Distrital de Movilidad (SDM) (2014). *Bases de datos de las estaciones maestras principales para el año 2013, contrato No. 1720 de 2012*.
- Tuia, D.; Ossés de Eicker, M.; Zah, R.; Osses, M.; Zarate, E. y Clappier, A. (2007). Evaluation of a simplified top-down model for the spatial assessment of hot traffic emissions in mid-sized cities. *Atmospheric Environment*, 41(17), 3658-3671. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.12.045>
- Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital (UAECD) (2014). *Catálogo de Datos Geográficos, Circular 003 del 24 de enero de 2014*. Bogotá:

Infraestructura de Datos Espaciales para el Distrito Capital (Ideca).

US EPA (1997). *Emission Inventory Improvement Program (EIIP). Technical Report Series, volumes I Introduction to the emission inventory improvement program*. Morrisville, Carolina del Norte. Recuperado de: <http://www.epa.gov/ttnchie1/eiip/techreport/volume01/i01.pdf>

US EPA (2004). *Developing Spatially Interpolated Surfaces and Estimating Uncertainty, EPA-454/R-04-004*.

Morrisville, Carolina del Norte: US Environmental Protection Agency.

Wang, H.; Fu, L.; Lin, X.; Zhou, Y. y Chen, J. (2009). A bottom-up methodology to estimate vehicle emissions for the Beijing urban area. *The Science of the Total Environment*, 407(6), 1947-53. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.11.008>





## Stiffness of a granular base under optimum and saturated water contents

### Rigidez de una base granular bajo humedad óptima y saturada

Fausto Andrés Molina-Gómez<sup>1</sup>, Javier Fernando Camacho-Tauta<sup>2</sup>, Oscar Javier Reyes-Ortiz<sup>3</sup>

**Fecha de recepción:** 13 de febrero de 2015

**Fecha de aceptación:** 15 de mayo de 2016

**Cómo citar:** Molina Gómez, F. A., Camacho Tauta, J. F., & Reyes Ortiz, O. J. (2016). Stiffness of a granular base under optimum and saturated water contents. *Revista Tecnura*, 20(49), 75-85. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.3.a05

#### ABSTRACT

**Objective:** This research work addressed the comparison of the stiffness of a granular base under optimum water content and total saturation conditions.

**Methodology:** The methodology focused in the development of an experimental program and the computation of a function, which permits to assess the elastic moduli of the material. A triaxial cell equipped by local LVDT transducers, capable of managing different stress paths, was used to measure the small-strain stiffness of a granular base under two different conditions of moisture. The material was compacted with optimum water content and subjected to a series of loading-unloading cycles under isotropic conditions. In addition, identical specimens were prepared to be saturated and the experimental procedure was repeated to obtain the moduli in these new circumstances. The moduli were assessed by a hyperbolic model, and its relationship with the confining pressure was computed.

**Results:** The results indicated that numerical model was adjusted to the experimental results. In addition, it was found that the elastic moduli decrease 3% to

8% in conditions of total saturation versus the condition of optimum water contents.

**Conclusions:** The small-strain stiffness in the granular base depends on the water content, and the moisture can affect the deformation in the pavement structures.

**Keywords:** granular bases, hyperbolic model, local transducers, small-strain stiffness, unload-reload moduli.

#### RESUMEN

**Objetivo:** Este trabajo de investigación aborda la comparación de la rigidez de una base granular con contenido de agua óptimo y condiciones de completa saturación.

**Metodología:** La metodología de trabajo se centró en el desarrollo de un plan experimental y el cálculo de una función que permite evaluar los módulos elásticos del material. Se utilizó una cámara triaxial para medir la rigidez del suelo, a pequeñas deformaciones, bajo dos condiciones diferentes de humedad. El equipo utilizado es capaz de generar trayectorias de esfuerzos y fue equipado con transductores locales tipo LVDT. El material se compactó con contenido óptimo

1 Civil Engineer, MSc in Civil Engineering (c), Assistant Professor: Military University Nueva Granada, Colombia, Bogotá, Contact: [fausto.molina@unimilitar.edu.co](mailto:fausto.molina@unimilitar.edu.co)

2 Civil Engineer, MSc in Civil Engineering, PhD in Civil Engineering, Associate Professor: Nueva Granada Military University, Colombia, Bogotá, Contact: [javier.camacho@unimilitar.edu.co](mailto:javier.camacho@unimilitar.edu.co)

3 Civil Engineer, MSc of Civil Engineering, PhD in Civil Engineering, Full Professor: Nueva Granada Military University, Colombia, Bogotá, Contact: [oscar.reyes@unimilitar.edu.co](mailto:oscar.reyes@unimilitar.edu.co)

de agua y se sometió a una serie de ciclos de carga-descarga en condiciones isotrópicas. Por otro lado, se prepararon las muestras idénticas para ser saturadas y repetir el mismo el procedimiento experimental bajo estas nuevas circunstancias. Los módulos fueron evaluados mediante un modelo hiperbólico y se calculó su relación con la presión de confinamiento.

**Resultados:** Los resultados indicaron que el modelo numérico se ajustó a los resultados experimentales. Además, se encontró que los módulos de elasticidad

disminuyen de 3% a 8% en condiciones de completa saturación frente a la condición de humedad óptima.

**Conclusiones:** La rigidez a pequeñas deformaciones de la base granular depende de la humedad y que el contenido de agua puede inducir deformaciones en las estructuras de pavimento.

**Palabras Clave:** bases granulares, modelo hiperbólico, módulos de descarga-recarga, rigidez a pequeñas deformaciones, sensores locales.

## INTRODUCTION

Density criterion for granular layers is the most common practice in quality control and quality assurance for pavement construction (Chen, Chang, & Fu, 2011). Granular bases are compacted under optimal water content to achieve a maximum dry unit weight. These controlling variables are obtained by the laboratory compaction test (ASTM International, 2014a). However, during construction the water content is not a fully controlled variable. Likewise, after construction water content may change due to climate effects, damage or absence of the asphaltic layer or drainage difficulties.

In regions with seasons, the spring thaw modifies the water content of the pavement structure due to the water flow through fissures, cracks and pores on the asphalt layer. In tropical regions, the weather changes and the rain variability produces the same effect. Usually, the damage in the asphalt layer which induced the seepage to granular bases is caused by the fatigue phenomenon (Paredes, Reyes-Ortiz, & Camacho-Tauta, 2014). The water flow generates a reduction of shear strength in granular bases, because water content directly governs the stability of the pavement system (Perera, Zapata, Houston, & Houston, 2004). In saturated granular bases, water deteriorates the quality of material and reduces the bearing capacity of a pavement structure (Zhang, Ishikawa, Tokoro, &

Nishimura, 2014). The variation in the moisture content changes the strength parameters due to changes of the matric suction, as it is studied in the unsaturated soil mechanics (Fredlund & Rahardjo, 1993).

Authors as Colesanti, Ferretti, Novali, Prati, & Rocca (2003) and Li, Saboundjian, Liu, & Xiong (2013) measured the pavement deformation during seasonal change through monitoring systems installed directly on the road. Other authors like Ishikawa, Zhang, Tokoro, & Miura (2014) and Inam, Ishikawa, & Miura (2012), developed experimental programs to measure the stiffness variation in granular bases with triaxial cells for unsaturated soils. Furthermore, it is possible to estimate the permanent strain in granular materials by numerical experiments based on constitutive models created from laboratory and in-situ test Lekarp & Dawson (1998) and Hicher & Chang (2008).

Jafarzadeh and Sadeghi, Jafarzadeh & Sadeghi (2012) studied the variation of dynamic properties of sands depending on the degree of saturation. They showed that the shear modulus is almost constant for a wide range of saturation, but it reduces considerably as the full saturation is reached. Similar results were found by Lu & Kaya (2014). To Boscardin, Selig, Lin, & Yang (1990) and Zhang, Li, & Chen (2013) the hyperbolic model is useful to compute elastic moduli and strains during loading process.

In this research, it was used several specimens of a material used for the road construction in Bogotá (Colombia). After that the specimens were compacted with optimum water content by the standard effort (ASTM International, 2014a) and consolidated under different isotropic stresses ( $p_0'$ ) in a stress path triaxial cell. This cell was equipped with LVDT local transducers. The procedure was aimed to assess the influence of two key water contents (optimum and saturated) on the stiffness of a granular base. The stiffness measured during loading, unloading and reloading stages and the elastic moduli were computed through the hyperbolic model.

## STIFFNESS OF SOIL

Stiffness is a key property in the behaviour of soil materials under loading and unloading cycles. The initial stiffness is characterized by the initial shear modulus ( $G_0$ ) (Ortiz-Pulido, Gaitán-Serrano, & Camacho-Tauta, 2014). This parameter can be measured in laboratory mainly by resonant column, bender element, or cyclic triaxial tests. The shear modulus is affected principally by the effective stress ( $p_0'$ ) and the void ratio ( $e$ ) (Camacho-Tauta, Jiménez Álvarez, & Reyes-Ortiz, 2012). According to Ramos Cañón (2015)  $p_0'$  has the main influence in the stiffness of granular materials.

However, a number of factors can affect the initial shear modulus. Hardin & Black, (1968) found that the soil stiffness could be affected by a number of factors as: effective octahedral normal stress ( $\sigma_0$ ), octahedral shear stress ( $\tau_0$ ), void ratio ( $e$ ), saturation degree ( $S_r$ ), amplitude of vibration ( $A$ ), frequency of vibration ( $f$ ), and temperature ( $T$ ), among others.

From this wide range of influencing factors, Seed & Lee (1970) selected and classified the most significant in two groups of importance level, as shown in Table 1. In their work, they studied the effect of the load applied, strain amplitude and saturation degree in the stiffness of granular base.

**Table 1.** Factors affecting the shear modulus.

Importance level	Factor
Primary factor	Strain amplitude
	Load applied
	Effective mean principal stress
	Void ratio
	Number of cycles of loading
Secondary factor	Saturation degree
	Octahedral shear stress
	Over consolidation ratio
	Effective strength parameters

**Source:** Seed & Lee, 1970.

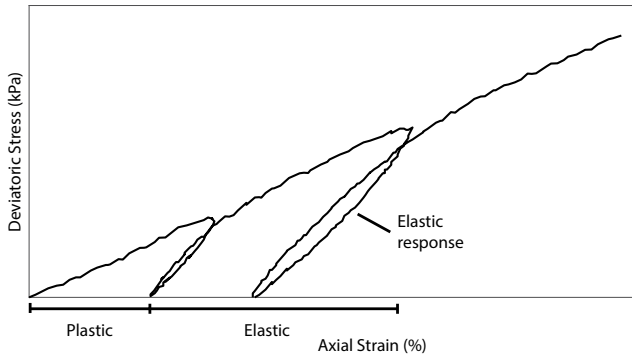
Any elastic moduli can be assessed by knowing two elastic parameters (Timoshenko & Goodier, 1986), as the elastic modulus ( $E$ ) and the Poisson's ratio ( $\nu$ ). The stiffness of granular materials also can be measured through loading and unloading process with sensors installed directly on the specimen.

## PERMANENT DEFORMATION IN GRANULAR MATERIALS

Traditionally, in pavement engineering the two most important factors to evaluate the performance of a structure are: fatigue in cemented layers and rutting in non-cemented layers. Both damages are products of repetitive loads due to traffic action. In granular bases, each load application produces a permanent deformation on the structure. The gradual accumulation of many plastic deformations reduces the serviceability or increases the possibility of collapse due to excessive rutting of the road (Le-karp & Dawson, 1998).

At small-strain, the granular material has an elastic behaviour. Beyond this range, the material experiments energy dissipation by plasticity with permanent deformations. Figure 1 shows the deformation process during loading and unloading stages without reach the failure.

This is the typical response of a granular base in a pavement structure. After unloading, the



**Figure 1.** Material response during load and unload stages

**Source:** own work

irrecoverable or permanent deformation is the plastic strain and it could be considered as a new reference state, where the elastic response can be measured since the failure is not achieved (Wood, 1991).

## HYPERBOLIC MODEL

The hyperbolic model represents the non-linearity and the dependency of the stress level in the stress-strain behaviour of granular soils, where each increment consider the soil as elastic linear material (Boscardin et al., 1990). Hyperbolic equations are useful tools to describe the non-linear elastic behaviour before achieving the failure (Duncan & Chang, 1970). The curve representing this model was proposed by Kondner (1963), and its equation (1).

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon}{\frac{1}{E_i} + \frac{\varepsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}} \quad (1)$$

Where  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  is the deviatoric stress;  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$  is the deviatoric stress at failure and the asymptotic value of the model;  $\varepsilon$  is the axial deformation; and  $E_i$  is the initial tangent modulus. Generally, the values of strain and deviatoric stress are obtained through triaxial tests under different confining pressures. From the shear strength parameters and the reference elastic modulus is possible to establish

the stress-stiffness as a function of the confining pressure (equation (2)).

$$E_x = E_x^{ref} \left( \frac{c \cdot \cos\phi + \sigma_3 \sin\phi}{c \cdot \cos\phi + p^{ref} \sin\phi} \right)^m \quad (2)$$

The stress-stiffness dependency normalizes elastic modulus respect to a reference pressure. Where  $E_{ref}$  is the elastic modulus of reference obtained by numerical adjust;  $c$  and  $\phi$  are the shear strength parameters;  $p_{ref}$  is a reference pressure which usually is the atmospheric pressure (100 kPa); and finally  $m$  is an amount of stress dependency represented by a power, which has values between 0.5 and 1. It is necessary to note that the  $\sigma_3$  is the confining pressure corresponding a compression stress (thus, insert as negative value).

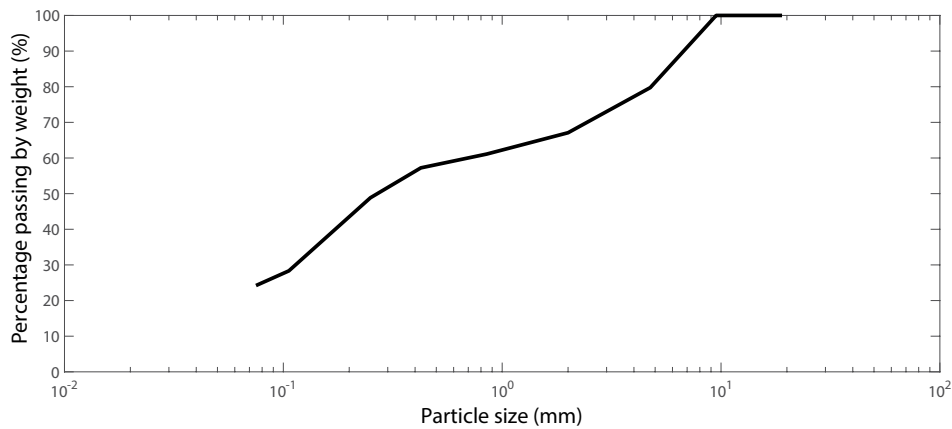
## METODOLOGY

### Materials

This study was carried out with a granular base from Soacha, near Bogota (Colombia). Geologically, the high plateau of Bogota is composed by almost 600 m of lacustrine and fluvial sediments (Coronado, Caicedo, Taibi, Correia, & Fleureau, 2011). Granular base material of this area corresponds to sandstones from adjacent slopes to the plateau. These sandstones are constituted principally by orthoquarcites composed by: undulose quartz, semi-composite quartz, composite quartz and stretched quartz (Aalto, 1972).

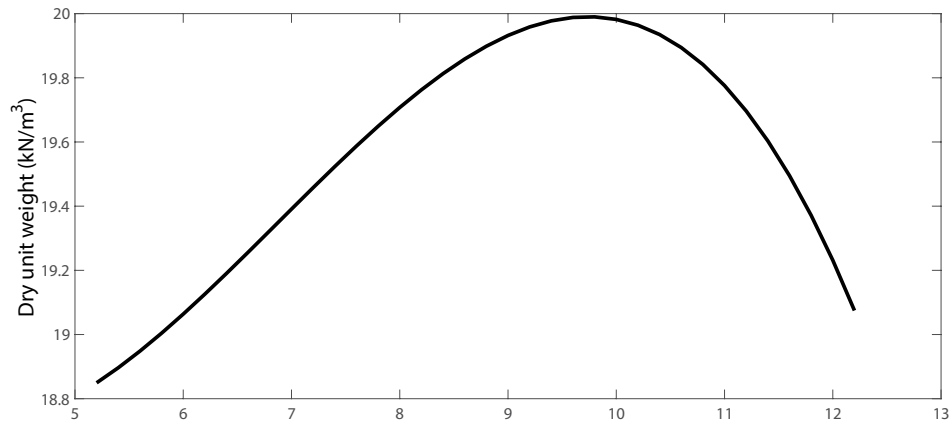
Figure 2 shows the grain size curve, which was obtained according to the procedure stabilised in the standard ASTM D422 (ASTM International, 2007b).

Plasticity limits were found by the standard procedure of ASTM D4318 (ASTM International, 2010) and the specific gravity of soils for particles with size less than 4.75 mm was estimated through the method of ASTM D854 (ASTM International, 2014b). The values obtained are shown in Table 2.



**Figure 2.** Grain size curve of granular base

Source: own work



**Figure 3.** Compaction curve of granular base

Source: own work

**Table 2.** Physical properties of granular base

Parameter	Value
$G_s$	2.76
LL	NP
IP	NP

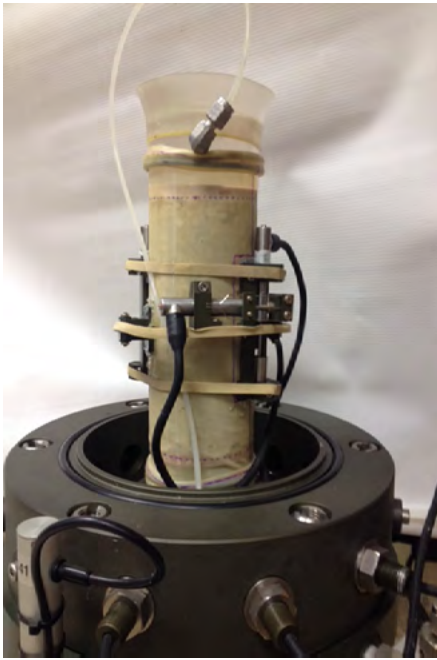
Source: own work

The parameters of optimum water content and maximum dry unit weight are 9.6% and 1.96 g/cm<sup>3</sup>, respectively. The curve of compaction is presented in Figure 3.

## Equipment

A GDS triaxial equipment, able to generate stress path automatically, was used to estimate the stress-strain behaviour of the granular base during load-unload-reload stages. The device is equipped with an 8 kN submersible load cell, three pressure/volume controllers of 0.1 kPa and 1 mm<sup>3</sup> of precision, and LVDT type local transducers (Figure 4) capable to measure axial and radial strains of the specimen directly.





**Figure 4.** Local transducers and specimen of granular base

**Source:** own work

### Test procedure

Twelve different specimens of granular base were compacted at optimal water content and maximum dry unit weight according to the Standard Effort Method, which is provided in the standard ASTM D698 (ASTM International, 2014a). Three of these specimens were subjected to the procedure regulated by the standard ASTM D2850 (ASTM International, 2007a) in order to assess the shear strength parameters in conditions unconsolidated

undrained (UU) under confining pressures of 50, 100 and 150 kPa. Additionally, other three specimens were first saturated and then subjected to consolidation and shear stages to evaluate the strength parameters in consolidated undrained (CU) conditions, according to the standard D2850 (ASTM International, 2007a), with the consolidation stress of 50, 100 and 200 kPa. Finally, the remaining six specimens were subjected to load and unload stages, in two groups of three, with the aim of assessing and comparing the elastic moduli in conditions of optimum water content and total saturation. The stress path tests were performed with the same confining pressure than UU triaxial tests.

## RESULTS

### Triaxial tests

Figure 5 shows the experimental results of stress-strain behaviour for each confining pressure in the granular base with maximum axial strain of 20% obtained by an Unconsolidated Undrained triaxial test.

Results show that strength of the granular bases increases and the strains decreases due to the non-linear behaviour of this type of material, according to Atkinson (2007). Table 3 presents the maximum values at failure obtained from triaxial tests.

Figure 6 shows the results of shear strength through Mohr's circles for the specimens at the both moisture content.

**Table 3.** Stress-strain parameters at failure

Specimen type	Confining Pressure (kPa)	Deviatoric stress (kPa)	Strain (%)
Optimum water content	50	507	4.93
	100	621	7.02
	150	842	6.50
Saturated	50	198	2.94
	100	329	4.11
	200	519	7.97

**Source:** own work

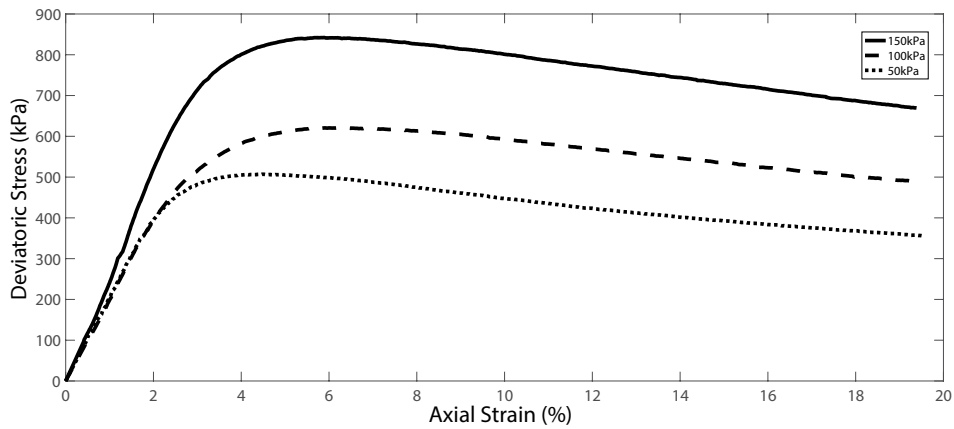


Figure 5. Stress-strain curves obtained by UU triaxial test.

Source: own work

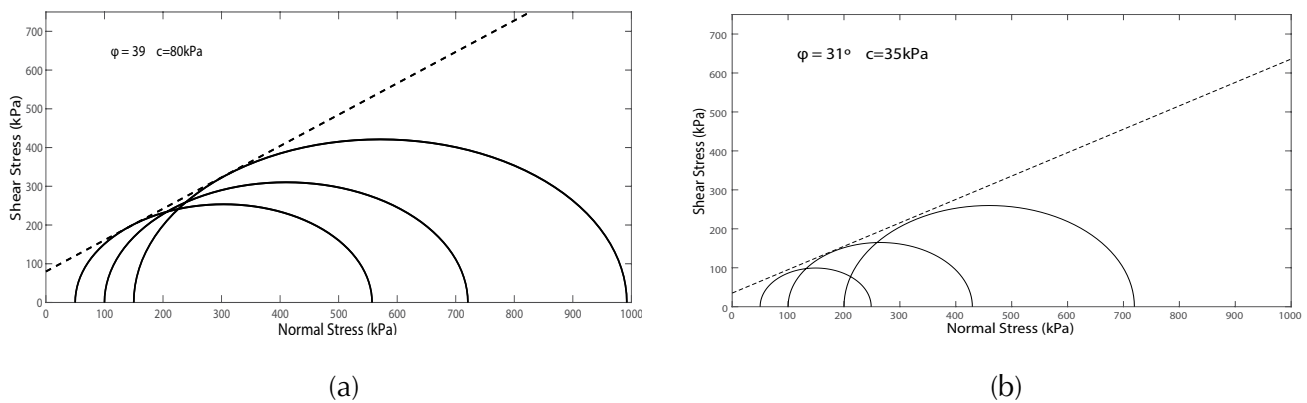


Figure 6. Mohr's circles obtained in triaxial tests: a) Optimum water content; b) Saturated

Source: own work

Table 4. Hyperbolic model results

Specimen type	Confining Pressure (kPa)	Asymptotic Deviatoric stress (kPa)	Tangent modulus (kPa)
Optimum water content	50	566	473
	100	651	555
	150	933	700
Saturated	50	493	169
	100	530	225
	200	874	350

Source: own work

The shear strength parameters show that the values of friction and cohesion are lower for the total saturation condition compared to the optimal water content. Results indicate that the stability of any geotechnical structure built with this granular base can be affected by moisture variations.

## Hyperbolic model

Taken the data of Table 3 and the information from all triaxial tests, it was used the hyperbolic model to obtain the parameters in equation 1. By this way, it was possible to evaluate the hyperbolic model of this granular base under different confining pressure and obtain the elastic moduli during load-unload-reload cycles.

Since maximum deformation before the failure is less than 8%, according to Stark, Ebeling, & Vettel (1994) the hyperbolic model is valid to describe the stress-strain behaviour in this type of material. Table 4 presents the parameters of the hyperbolic model evaluated by means of linear adjustment.

The experimental information indicates that the numerical curves adjust in the elastic range with the experimental results. For this reason, is valid to estimate the initial tangent modulus of the material studied through this model.

## Loading and unloading test

The elastic moduli during unload-reload stages were computed directly by mean of vertical and radial measurements through the local transducers and the internal load cell. This information was obtained for each confining pressure at conditions of optimum water content and total saturation.

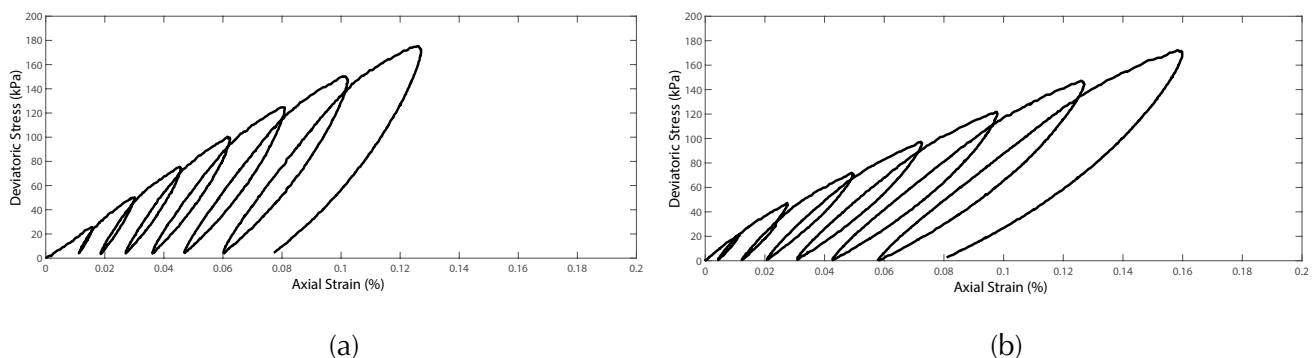
Results exhibit that the unload-reload moduli for the saturated specimen are lower than the specimen with optimum moisture. Table 5 presents the average moduli obtained by hyperbolic model in the stress path test.

Figure 7 shows the results obtained during the application of stress path, which include deviatoric stress of 25, 50, 75, 100, 125, 150 and 175 kPa.

**Table 5.** Moduli results of stress path tests

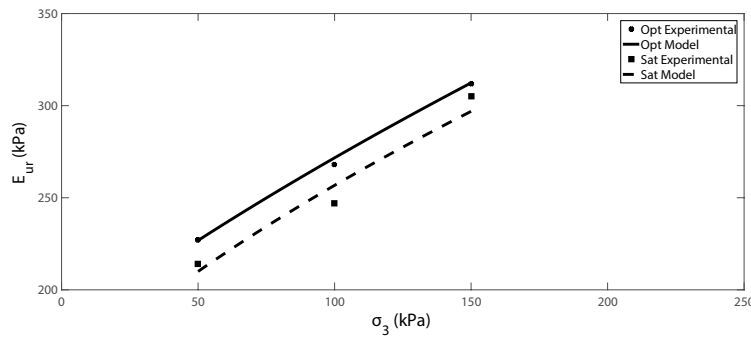
Confining Pressure (kPa)	Unload-reload moduli (kPa)	
	Optimum water content	Saturated
50	227	214
100	268	247
150	312	305

Source: own work



**Figure 7.** Material response during load and unload stages for a confining pressure of 100kPa. a) Optimum water content; b) Saturated

Source: own work



**Figure 8.** Comparison of experimental and calculated moduli

**Source:** own work

The moduli were evaluated in each cycle, and the differences among them show variations between 3-8% for both water conditions. The relative low variability of this parameter suggests that the moduli do not depend on the load level for the strain range imposed in the tests. Equation 2 was used to describe and represent the effect of confinement on the granular base for the atmospheric pressure and the values of shear strength parameters (optimum water content:  $c=80$  kPa  $\phi=39^\circ$ , and saturated:  $c=35$  kPa  $\phi=31^\circ$ ) obtained by the triaxial tests. Equation 3 gives unload-reload elastic moduli and the power parameter to optimum water content condition. In addition, equation 4 presents the same parameters in total saturation conditions.

$$E_{ur}^{opt} = 270(0.50 + 0.0051\sigma_3)^{0.62} \quad (3)$$

$$E_{ur}^{sat} = 257(0.37 + 0.0063\sigma_3)^{0.53} \quad (4)$$

Replacing  $\sigma_3$  in equations 3 and 4 for the value of atmospheric pressure, was found that  $E_{ur}$  has a variation of 1% and 4% comparing with the results showed in Table 5 for a confining pressure of 100 kPa in both water conditions. Figure 8 presents the numerical adjust between experimental data with model results.

The small changes between the experimental and numerical results validate the unload-reload moduli stress-stiffness dependency model is a good approximation to describe the stress-strain behaviour of this material. Yang & Han, (2012); Mazari *et al.*, (2014);

and Salour & Erlingsson, (2015) evaluated the moduli in similar materials to the Soacha granular base. Their calculation results do not present significant differences with the values found in equations 3 and 4 under a confining pressure of 100 kPa.

## CONCLUSIONS

The stress-strain behaviour of a granular base was evaluated by an experimental program during loading, unloading and reloading stages. The material was compacted and tested under two different water contents, optimum and saturated. The program included tests with a triaxial device capable to generate different stress paths and equipped with local transducers to measure local strains.

The elastic moduli of the granular base were assessed under different stress level through a hyperbolic model. Furthermore, from these values and shear strength parameters, it was proposed an equation which permits estimate the elastic moduli as a function of the confining pressure. The numerical model presented a suitable correlation to the experimental measures.

Results obtained from the experimental data show that the shear strength change is a function of the saturation degree. This effect is due to the suction inside the soil. Hence, the strength for unsaturated samples is greater than for saturated samples. Also, the soil suction increases the stiffness of unsaturated specimens.

According to the compared results, of both moisture conditions, it was found that the stiffness of this granular base depends on the water content. The model calculation presents a parallel trend between the two moistures. Therefore, it is possible to affirm based on results, the material presents lowest modulus values at saturation total state.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This work is part of the Research Project INV-ING-1765 (2015) supported by the Research Direction of the Nueva Granada Military University. The first author acknowledges to COLCIENCIAS, Call 617/2013.

## REFERENCES

- Aalto, K. R. (1972). Diagenesis of Orthoquartzites Near Bogota Colombia. *Journal of Sedimentary Research*, 42(2). <http://doi.org/10.1306/74D72540-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- ASTM International. D2850–Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils (2007).
- ASTM International. D422–Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, 63 Annual Book of ASTM Standards 1–8 (2007).
- ASTM International. D4318–Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils (2010). <http://doi.org/10.1520/D4318-10>.
- ASTM International. D698–Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf /ft<sup>3</sup> (600 kN-m /m<sup>3</sup>)) (2014).
- ASTM International. D854–Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer (2014).
- Atkinson, J. (2007). *The Mechanics of Soils and Foundations, Second Edition*–(2nd ed.). CRC Press Book.
- Boscardin, M. D., Selig, E. T., Lin, R., & Yang, G. (1990). Hyperbolic Parameters for Compacted Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(1), 88–104. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1990\)116:1\(88\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:1(88))
- Camacho-Tauta, J. F., Jiménez Álvarez, J. D., & Reyes-Ortiz, O. J. (2012). A Procedure to Calibrate and Performance The Bender Element Test. *DYNA*, 79(176), 10–18. Retrieved from <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/26165/43542>
- Chen, D.-H., Chang, G., & Fu, H. (2011). Limiting Base Moduli to Prevent Premature Pavement Failure. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 25(6), 587–597.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Novali, F., Prati, C., & Rocca, F. (2003). SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique. In *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* (Vol. 41, pp. 1685–1701). <http://doi.org/10.1109/TGRS.2003.813278>
- Coronado, O., Caicedo, B., Taibi, S., Correia, A. G., & Fleureau, J.-M. (2011). A macro geomechanical approach to rank non-standard unbound granular materials for pavements. *Engineering Geology*, 119(1-2), 64–73. <http://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.02.003>
- Duncan, J. M., & Chang, C. Y. (1970). Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils. *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 95(5), 1629–1653.
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, R. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons INC.
- Hardin, B. O., & Black, W. L. (1968). Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 94(2), 353–370.
- Hicher, P. Y., & Chang, C. S. (2008). Elastic model for partially saturated granular materials. *Journal of Engineering Mechanics*, 134(6), 505–513. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2008\)134:6\(505\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2008)134:6(505))
- Inam, A., Ishikawa, T., & Miura, S. (2012). Effect of principal stress axis rotation on cyclic plastic deformation characteristics of unsaturated base course material. *Soils and Foundations*, 52(3), 465–480. <http://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.05.006>
- Ishikawa, T., Zhang, Y., Tokoro, T., & Miura, S. (2014). Medium-size triaxial apparatus for unsaturated granular subbase course materials. *Soils and Foundations*, 54(1), 67–80. <http://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.12.007>

- Jafarzadeh, F., & Sadeghi, H. (2012). Experimental study on dynamic properties of sand with emphasis on the degree of saturation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 32(1), 26–41. <http://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.08.003>
- Kondner, R. L. (1963). A hyperbolic stress-strain formulation for sands. In *2nd Pan-Am Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg* (p. 289). Sao Paulo: Northwestern University.
- Lekarp, F., & Dawson, A. (1998). Modelling permanent deformation behaviour of unbound granular materials. *Construction and Building Materials*. [http://doi.org/10.1016/S0950-0618\(97\)00078-0](http://doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00078-0)
- Li, L., Saboundjian, S., Liu, J., & Xiong, Z. (2013). Permanent Deformation Behavior of Alaskan Granular Base Materials. *Planning for Sustainable Cold Regions © ASCE 2013 ISCORD 2013: Planning for Sustainable Cold Regions © ASCE*, (1955), 428–435.
- Lu, N., & Kaya, M. (2014). Power Law for Elastic Moduli of Unsaturated Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(1), 46–56. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000990](http://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000990)
- Mazari, M., Navarro, E., Abdallah, I., & Nazarian, S. (2014). Comparison of numerical and experimental responses of pavement systems using various resilient modulus models. *Soils and Foundations*, 54(1), 36–44. <http://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.12.004>
- Ortiz-Pulido, M. del P., Gaitán-Serrano, J. F., & Camacho-Tauta, J. F. (2014). Modelo unificado de curvas de degradación del módulo cortante en arenas del río Guayuriba. *DYNA*, 81(184), 77–84. <http://doi.org/10.15446/dyna.v81n184.36603>
- Paredes, L. A., Reyes-Ortiz, Ó. J., & Camacho-Tauta, J. F. (2014). Comportamiento de mezclas asfálticas densas a partir del ensayo de viga semicircular simplemente apoyada. *Revista Tecnura*, 18(41), 103. <http://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.3.a08>
- Perera, Y., Zapata, C., Houston, W., & Houston, S. (2004). Long-Term Moisture Conditions under Highway Pavements (ASCE). In M. K. Y. and E. Kavazanjian (Ed.), *Geotechnical Engineering for Transportation Projects* (pp. 1132–1143). Los Angeles: ASCE. [http://doi.org/10.1061/40744\(154\)102](http://doi.org/10.1061/40744(154)102)
- Ramos Cañón, A. M. (2015). Influence of the void ratio and the confining on the static liquefaction in slopes in changi sand. *Revista Tecnura*, 19(43), 63. <http://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.1.a04>
- Salour, F., & Erlingsson, S. (2015). Resilient modulus modelling of unsaturated subgrade soils: laboratory investigation of silty sand subgrade. *Road Materials and Pavement Design*, 16(3), 553–568. <http://doi.org/10.1080/14680629.2015.1021107>
- Seed, H. B., & Lee, K. L. (1970). Liquefaction of Saturated Sands During Cyclic Loading. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 92(6), 105–134.
- Stark, T. D., Ebeling, R. M., & Vettel, J. J. (1994). Hyperbolic Stress-Strain Parameters for Silts. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(2), 420–441. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1994\)120:2\(420\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:2(420))
- Timoshenko, S., & Goodier, J. N. (1986). *Theory of Elasticity* (3rd ed., Vol. 49). Mc Graw Hill.
- Wood, D. M. (1991). *Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics* (1st ed.). Cambridge University Press.
- Yang, X., & Han, J. (2012). Analytical Model for Resilient Modulus and Permanent Deformation of Geosynthetic-Reinforced Unbound Granular Material. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000879](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000879), 139(9), 1443–1453. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000879](http://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000879).
- Zhang, Q., Li, L., & Chen, Y. (2013). Analysis of Compression Pile Response Using a Softening Model, a Hyperbolic Model of Skin Friction, and a Bilinear Model of End Resistance. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000640](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000640).
- Zhang, Y., Ishikawa, T., Tokoro, T., & Nishimura, T. (2014). Influences of degree of saturation and strain rate on strength characteristics of unsaturated granular subbase course material. *Transportation Geotechnics*, 1(2), 74–89. <http://doi.org/10.1016/j.trgeo.2014.04.001>





## A comparative study of target detection algorithms in hyperspectral imagery applied to agricultural crops in Colombia

### Un estudio comparativo de algoritmos de detección de objetivos en imágenes hiperespectrales aplicados a cultivos agrícolas en Colombia

Ariolfo Camacho Velasco<sup>1</sup>, César Augusto Vargas García<sup>2</sup>, Henry Arguello Fuentes<sup>3</sup>

**Fecha de recepción:** 10 de noviembre de 2015

**Fecha de aceptación:** 15 de mayo de 2016

**Cómo citar:** Camacho Velasco, A., Vargas García, C. A., & Arguello Fuentes, H. (2016). A comparative study of target detection algorithms in hyperspectral imagery applied to agricultural crops in Colombia. *Revista Tecnura*, 20(49), 86-99. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.3.a07

#### ABSTRACT

**Background:** (HSI) Hyperspectral Images contain high spectral resolution information, in hundreds of contiguous bands over a specific range of the electromagnetic spectrum. In science and industry, hyperspectral information is exploited by means of classification, anomaly and target detections algorithms. Specifically, in the last two decades a wide variety of hyperspectral target detection algorithms have been proposed. However, an optimal target detection algorithm with a remarkable performance over different kinds of targets and scenarios is still an active matter of research, due to the high spectral variability and diversity of real-world scenarios.

**Aim:** This work presents a comparative study of target detection algorithms in hyperspectral imagery applied to agricultural crops in Colombia for evaluate performance in different scenarios.

**Method:** The evaluations were performed on 20 real HSI acquired by the satellite Hyperion sensor, and 6 synthetic HSI with different noise levels. 5 synthetic targets were implemented; more than 115 spectral real signatures were extracted, 11 of those signatures were used as target in the testing process, allowing to characterize 5 agricultural crops of Colombian northeastern in 5 different areas.

**Results:** The results show that the Adaptive Coherence Estimator (ACE) algorithm has a better performance in terms of detection probabilities  $P_D > 90\%$  for different scenarios and targets of agricultural type, in both synthetic and real images.

**Conclusions:** In applications for target detection in HSI, it is critical to find an algorithm to have optimal performance for different scenarios and targets, due to the spectral variability generated by the geographical conditions countrywide. On the other

<sup>1</sup> System Engineer, Master in Computer and Informatics Engineering. Member of High Dimensional Signal Processing Research Group–HDSP Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Contact: [ariolfo.camacho@correo.uis.edu.co](mailto:ariolfo.camacho@correo.uis.edu.co)

<sup>2</sup> Computer Science Engineer, Master in Computer Science and Informatics, Student at doctorate in Electrical and Computer Engineering at University of Delaware, Newark, DE, United States. Contact: [cavargar@udel.edu](mailto:cavargar@udel.edu)

<sup>3</sup> Electrical engineer, Master in Electrical Power, Doctor in Electrical and Computer Engineering. Titular professor at Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Contact: [henarfu@uis.edu.co](mailto:henarfu@uis.edu.co)

hand, this work shows that is possible the development of new research fields and applications at the national level, taking advantage of hyperspectral imaging techniques for spectral detection, specifically for Colombian agriculture.

**Keywords:** Hyperspectral Imaging, Remote Sensing, Spectral Properties of Vegetation, Target Detection Algorithms.

## RESUMEN

**Contexto:** Las imágenes hiperespectrales (HSI) contienen información en alta resolución espectral, en cientos de bandas contiguas sobre un rango del espectro electromagnético. Se ha tomado ventaja de la información espectral mediante algoritmos de clasificación, detección de cambios, de anomalías o detección de objetivos. Específicamente, en las dos últimas décadas han sido propuestos diferentes algoritmos para detectar objetivos en HSI. Sin embargo, encontrar un algoritmo de detección con un desempeño óptimo para diferentes escenarios y objetivos, aún es materia de investigación, debido a la alta variabilidad espectral y diversidad de escenarios del mundo real.

**Objetivo:** La presente investigación realiza un estudio comparativo de algoritmos de detección de objetivos en imágenes hiperespectrales aplicados a la agricultura colombiana.

**Método:** Las evaluaciones se realizaron sobre 20 HSI reales adquiridas por el sensor satelital Hyperion y 6 HSI sintéticas con diferentes niveles de ruido. En el desarrollo de la investigación se implantaron 5 objetivos sintéticos; y se extrajeron más de 115 firmas espectrales reales, 11 de ellas fueron usadas como objetivo en la evaluación de los algoritmos, permitiendo la caracterización de 5 cultivos agrícolas del nororiente colombiano en 5 áreas de estudio diferentes. Los resultados muestran que el algoritmo de Estimación de Coherencia Adaptativo (ACE) presenta un mejor desempeño con probabilidades de detección  $P_D > 90\%$  para diferentes escenarios y objetivos de tipo agrícola, tanto en imágenes sintéticas como reales.

**Conclusiones:** En aplicaciones de detección de objetivos en HSI, es crítico encontrar un algoritmo que presente un rendimiento óptimo para diferentes escenarios y objetivos, debido a la variabilidad espectral generada por las diferentes condiciones geográficas de Colombia. Por otra parte, este trabajo permite mostrar que es posible realizar nuevas investigaciones y aplicaciones a nivel nacional tomando ventaja de las técnicas de imágenes hiperespectrales y algoritmos de detección espectral; específicamente en el sector de la agricultura colombiana.

**Palabras Clave:** Algoritmo de Detección de Objetivos, Imágenes hiperespectrales, Propiedades Espectrales de la vegetación, Sensado Remoto.

## INTRODUCTION

Hyperspectral imaging (HSI) allows the spectral characterization of materials or vegetation present on the surface of the Earth (Manolakis & Shaw, 2002). A HSI has radiance or reflectance information of the surface, which can be modeled as a dispersion of points in a  $K$ -dimensional Euclidean space, where  $K$  is the number of spectral bands. Each band corresponds to a spatial axis. The axes are orthogonal to each other. Since each pixel in an HSI can be considered as a vector

$x = [x_1, x_2, \dots, x_k]^T$ , which behaves as a “fingerprint” or spectral signature of the material at a spatial point of the image. The spectral signature is an important element in classification, identification and target detection of algorithms (Ramírez, Arguello, Arce, & Sadler, 2014). The purpose of a detection algorithm in HSI is to detect a target within a HSI with the fewest false alarms (FA). During last decade, target detection algorithms have received a special interest in the scientific community (Bioucas-Dias, and other, 2013). However, a detection algorithm that performs optimally regardless



different scenarios and targets, is still researched, due to the complexity and diversity of real-world scenarios. Likewise, the high spectral variability difficult to predict signature spectral target *in situ*.

Detection algorithms and HSI are used in areas such as environment monitoring, mining, geology, soil and vegetation cover characterization (Camacho, Vargas, Rojas, Castillo & Arguello, 2015), specifically, in agriculture. Agriculture is an essential economic activity for humans. Optimal agricultural production requires precise measurements of biochemical and biophysical characteristics of crops. However, tasks such as mapping, monitoring, and data collection (on site) are expensive and consume large resources (costs, time, human, among others). The development of techniques such as remote sensing and optical spectroscopy allowed significant improvements in the estimation of biophysical or biochemical variables in crops. Specifically, in Colombia, it is important to have alternatives that allow acquiring information about the electromagnetic radiation that receives and reflects different crops (Armesto, Angarita, & Lobo, 2015). On the other hand, Colombia is doing research to enter in the space satellite with future developments. For instance, the construction of a picosatellite called the CubeSat UD Colombia 1 (Salamanca, Castro & Grajales, 2012), opening the development remote sensing applications. In particular, the use of hyperspectral images satellite has been widely used to study the spectral behavior of vegetation.

HSI measure the amount of energy reflected by the plants along the electromagnetic spectrum (400 nm – 2500 nm) (Thenkabail, Smith, & De Pauw, 2000). Spectral signatures of vegetation allows monitoring, tracking and controlling of crops health (stress by pests, diseases and nutrient deficiencies) for large lands. It is possible to detect targets in HSI of crops by using spectral signatures. However, targets and background have a high level of spectral variability in agriculture. Specifically, Colombia is an agricultural country which

has geographical landscapes with many different characteristics, different ecosystems, geographical reliefs and weather conditions, allowing to cultivate different crops that allows the evaluate performance of detection algorithms for different scenarios and targets of agricultural type.

This work makes a comparative study of target detection algorithms in HSI applied to crops scenarios in Colombia from images acquired by hyperspectral satellite sensor Hyperion. The tested algorithms were: Adaptive Coherence Estimator – ACE (Manolakis & Shaw, 2002), Constrained Energy Minimization – CEM (Chang *et al.*, 2000), Matched Filter–MF (Manolakis, Truslow, Pieper, Cooley, & Brueggeman, 2014; Bioucas-Dias *et al.*, 2013), Orthogonal Subspace Projection–OSP (Du, Ren, & Chang, 2003), Spectral Angle Mapper – SAM (Kruse, Lefkoff, & Boardman, 1993). For the evaluation of the algorithms (ACE, CEM, MF, SAM and OSP), a data set with 20 real HSI was used; additionally, synthetic images were created with different levels of noise (SNR = 10 dB, 15 dB, 20 dB, 25 dB, and 30 dB); and 5 synthetic target were implanted. The synthetic target were created from the pure spectral signature of alunite mineral with different degrees of mixing ( $f=$  10%, 20%, 30%, 40%, y 100%).

For the selection of spectral signatures procedure, more than 115 real spectral signatures were extracted, 11 of those signatures were used as target in the evaluation of algorithms, allowing the characterization of 5 crops of the Colombian north-east, including oil palm, rubber, grass for grazing, citrus and sugar cane. This research is one of the first to be developed from hyperspectral satellite images, applied to Colombian agriculture, and it is the first in Colombia performed by using the Hyperion sensor to evaluate the performance of detection algorithms with agricultural targets. For the acquisition of real HSI, it requested to the Goddard Space Flight Center–NASA taking HSI on a set of five municipalities in Colombia. Hyperion acquired HSI for the next five municipalities: Puerto

Wilches (PW), Rio Negro-Lebrija (RL), Mogotes (MG) and Guadalupe (GL), located in the department of Santander, Colombia and San Alberto (SA), located in the department of Cesar, Colombia.

The results show that the ACE algorithm has a better performance with probabilities detection  $P_D > 90\%$  for diverse HSI and agricultural targets, in both synthetic and real images, followed by CEM and MF algorithms that exhibit acceptable performance with averages detection probabilities  $P_D = 80\%$ . In contrast, the OSP and SAM algorithms are able to detect targets with average  $P_D = 45\%$  however, the number of false alarms (FA) is high and their performance decreases. Finally, this work shows that from the technological and scientific transfer, the use and application of HSI and target detection algorithms, it is possible to research in Colombian crops under specific variables and geographical factors.

## METHODOLOGY

This section describes the conceptual framework of detection algorithms, the metrics used to evaluate performance, and the real and synthetic data sets.

### Target detection algorithms in hyperspectral imaging

A detection algorithm seeks to detect in the pixels of a hyperspectral data cube the presence of a specific material (target). Theoretically, a detection algorithm is considered a problem of binary hypothesis test, that determines whether a hypothesis about the presence of a target is true or not (Bioucas-Dias *et al.*, 2013; Manolakis *et al.*, 2014). Given an observed spectrum, the algorithm decides between the following two hypotheses:

$$\begin{aligned} H_0 &: \text{target absent} \\ H_1 &: \text{target present.} \end{aligned}$$

Several target detection algorithms have developed to provide better results. However, according to

the way of modeling the spectral variability problem, there are two approaches, geometric models and statistical models (Manolakis & Shaw, 2002). In this work were selected five algorithms with the biggest number of scientific citations, according to the state of the art detection algorithms, to make a comparative study of the algorithms performance. These algorithms are: ACE, CEM, MF, OSP, and SAM. In the first group of algorithms, are ACE, CEM and MF which describe the background patterns statistically, the second group, are describe the background geometrically, there are the OSP and SAM algorithms.

HSI detection algorithms must overcome difficulties such as: (1) the size of images, generally, the number of pixels of a hypercube exceeds the order of  $10^5$ , with the limitation that the estimation of probability of false alarm  $P_{FA}$  is less than  $10^{-4}$  by each hypercube; (2) the number of target of a type or class, in particular, a scene is often very small and limits the detection performance; (3) the ground truth is very limited for the overall scene, hampering the validation; (4) the existence of mixed pixels (subpixel) a pixel observed by the sensor can receive information of the target and background; and (5) the high spectral variability, which is evidenced by the fact that a spectrum unique and fixed, theoretically perfect, does not exist for any material. The spectra observed from samples of the same material are not identical, even in laboratory experiments, due to variations in the surface of the material. The variability is significant in Remote Sensing (RS) due to the weather, noise of the sensor, the composition of the material, the location of the sensor and the sample, surrounding materials, and other factors.

#### Adaptive Coherence Estimator (ACE)

ACE is derived from The Generalised Likelihood Ratio Test (GLRT), based on the assumption that the background covariance matrix is known.

$$D_{ACE}(x) = \frac{(d^T \Gamma^{-1} x)^2}{(d^T \Gamma^{-1} d)(x^T \Gamma^{-1} x)} \quad (1)$$

Where  $d$  is the target spectrum,  $x$  is the spectrum of the evaluated pixel, and  $\Gamma$  is the background covariance matrix. In equation (1) the ACE algorithm estimates detection statistics in a different way, and achieves a greater separation between target and background. In addition, ACE allows to set a constant threshold of  $P_{FA}$ . ACE provides a faster detection of signature target based on comparisons between a spectral library signature, and the HSI spectral information. In previous study, the ACE algorithm has offered the best performance against the other algorithms (Manolakis & Shaw, 2002).

#### Constrained Energy Minimization (CEM)

CEM is a filter with finite impulse response that slice through the desired target and minimize the energy of the resulting output generated by the background with the exception of the desired target (Chang *et al.*, 2000), equation (2) describes the CEM algorithm. The covariance of the correlation matrix is used to characterize the composition of the unknown background.

$$D_{CEM}(x) = \frac{d^T \Gamma^{-1} x}{d^T \Gamma^{-1} d} \quad (2)$$

where  $d$  is the target spectrum,  $x$  is the spectrum of the pixel to be evaluated, and  $\Gamma$  is the background covariance or the correlation matrix. CEM belongs to the algorithms based on a structured approach which uses statistics to describe the background, for this reason it is included in this paper.

#### Matched Filter (MF)

The Matched Filter and its different variations have been widely used in applications for targets detection in HSI (Manolakis, Truslow, Pieper, Cooley, & Brueggeman, 2014), equation (3.a and 3.b) describes the MF algorithm. MF is based on the binary hypothesis test.

$$H_0 : x \sim N(\mu_b, \Gamma_b) \text{ Target absent} \quad (3.a)$$

$$H_1 : x \sim N(\mu_t, \Gamma_t) \text{ Target present,} \quad (3.b)$$

If it is assumed that the two hypotheses have equal covariance matrix,  $\Gamma_b = \Gamma_t = \Gamma$ , and that the selection of the normalization factor does not affect the performance of the MF. MF method uses the equation (4).

$$D_{MF}(x) = \frac{(d - \mu)^T \Gamma^{-1} (x - \mu)}{(d - \mu)^T \Gamma^{-1} (d - \mu)} \quad (4)$$

Where  $d$  is the target spectrum,  $x$  is the spectrum of the evaluated background pixel,  $\mu$  is the vector containing the mean background, and  $\Gamma$  is the covariance matrix.

#### Orthogonal Subspace Projection (OSP)

OSP algorithm is the first designed a projector of orthogonal subspace to delete the response pixels non-targets, then, apply a filter of matched to find the match of the desired target within data. OSP is expressed in equation (5).

$$D_{OSP}(x) = \frac{d^T P_U^\perp x}{d^T P_U^\perp d} \quad (5)$$

Where  $d$  is the vector of spectrum target,  $x$  is the pixel to be evaluated, and  $P_U^\perp = I_{L \times L} - UU^\#$  is the orthogonal subspace, such that  $L$  is the number of bands,  $U$  is the matrix of spectra non-target, and  $U^\# = (U^T U)^{-1} U^T$  is the pseudoinverse of  $U$  (Jin, Paswaters, & Cline, 2009). The OSP is an algorithm that uses a structured background model to characterize the spectral variability and it is the first geometric filter matched algorithm different from the previous algorithms used in this research.

#### Spectral Angle Mapper (SAM)

SAM is an algorithm used to determine how similar are two spectra, from the calculation of the angle between two vectors (target vector and pixel evaluate vector). The SAM algorithm has lower computational complexity, lower computational cost, and it is faster than the other algorithms described above. It also does not require any statistical information from the scene (Kruse, Lefkoff, & Boardman, 1993). Any pixel in the HSI is treated as a vector with dimensionality equal to the number of bands of the

HSI. SAM may also be performed by matrix multiplication and is expressed in equation (6) as

$$D_{SAM}(x) = \frac{d^T x}{(d^T d)^{1/2} (x^T x)^{1/2}} \quad (6)$$

SAM is included in this work as a traditional algorithm, it is compared with more robust algorithms.

### Performance metrics for target detection algorithms in HSI

There are different metrics to evaluate the performance of the algorithms of target detection, such as visual metrics, per pixel, confusion matrices, and ROC curves (Operational Characterization of the Receiver). The visual metric is a graphical representation in two dimensions ( $x, y$ ) the result of the detection algorithm. The representation shows a detection map where the brighter pixels (whites) corresponding to possible targets. The brightest outputs can be compared with the ground truth map to determine if the pixel was correctly classified as a target, otherwise it is a false alarm. The pixel-per-pixel metric puts a label to each pixel as a target or background (background refers to any pixel located in a scene that is non-target) for each output of the detector. This metric is simple and allows to

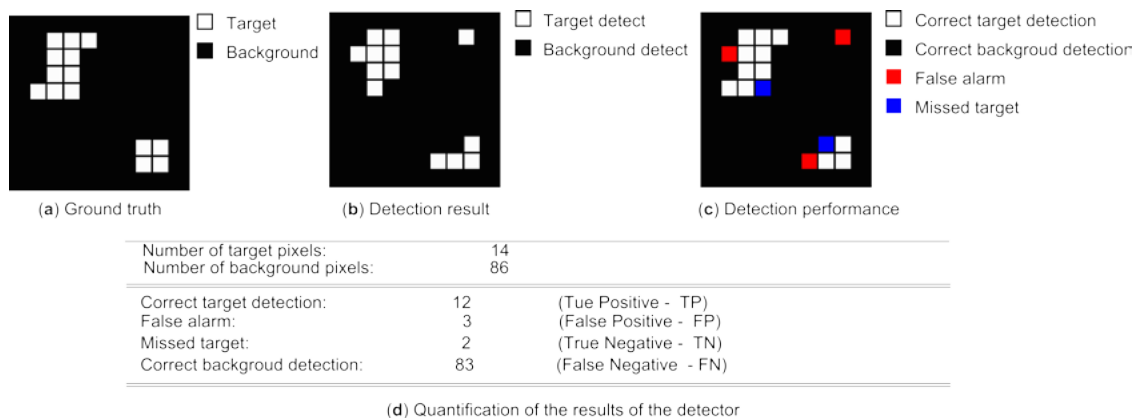
quantify the performance of algorithms based on creating binary confusion matrix, it is composed of true positives (TP), false positives (FP), true negative (TN), and false negatives (FN). From these matrices, true positive rate (VPR), false positive rate (FPR) and accuracy (ACC) can be estimated and related. Figure 1 illustrates the performance of an algorithm evaluated pixel-per-pixel. For a total of 100 pixels, Figure 1(a) shows the ground truth where the target is formed by 14 pixels, Figure 1(b) shows the result of the algorithm, and Figure 1(c) classifies each pixel output detector, allowing to quantify and give inputs for confusion matrices.

Finally, the most commonly used metric in the scientific community to evaluate the performance of target detection algorithms are the ROC curves. ROC curves plot the relationship between the probability of detection ( $P_D$ ) of the target and the probability of false alarm ( $P_{FA}$ ), thus determining the performance of an algorithm. An optimal algorithm is one that manages to detect targets with high  $P_D$  and low  $P_{FA}$ .

### Data sets

#### Hyperspectral Imaging Data and Ground Truth

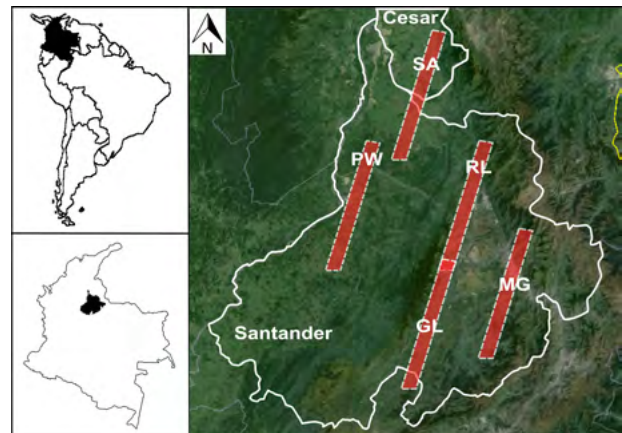
For the development of this research the Hyperion sensor acquired 20 real hyperspectral images



**Figure 1.** Metric per-pixel: (a) ground truth, (b) result of the detector, (c) performance of the detector, and (d) quantification of the detector results.

Source: Own work

between February 2014 and February 2015. The HSI were acquired on five municipalities located in the northeast of Colombia, specifically in the Santander and Cesar departments. These Colombian regions have different climatic and geographical characteristics, allowing acquire spectral information of various agricultural crops in different scenarios. Figure 2 shows the location of the study areas and Table 1 summarizes the characteristics and main agricultural crops present in the study areas.



**Figure 2.** Study areas. The red stripes correspond to the areas captured by the Hyperion sensor.

**Table 1.** Study areas, crops and main features

Id.	Area	Coordinates	Geographical Characteristics	Agriculture
PW	Puerto Wilches, Santander, Colombia	7° 15' N, 73° 47' W	The zone is characterized as having most of the territory flat, its temperature is hot and humid, the average is 33 °C, it has great rivers as the Rio Magdalena and the River Sogamoso. Its height above sea level (MSL) is 90 m.	Main crop is oil palms, located in the area southern, in the north corn and plantain grown traditionally, also cattle pastures.
SA	San Alberto, Cesar, Colombia	7° 41' N, 73° 25' W	This area is very similar to the PW area, but this is south of the Cesar department, Colombia limits with the department of Santander. The lowest part of the municipality is located 50 MSL and the top is at a height of 2600 MSL the extreme west of the area.	Main crop is oil palms and cattle pastures (beef cattle).
RL	Rio Negro and Lebrija, Santander, Colombia	7° 14' N, 73° 10' W - 7° 00' N, 73° 14' W	The two municipalities are located in the center-east of the Santander department. The zone is characterized as having a broken topography in its relief, and having a tropical climate; varies from temperate or warm, depending on altitude, with an average temperature of 28°C	Rio Negro is characterized by cacao, coffee and citrus crops. Furthermore, pineapple is the main crop in Lebrija.
MG	Mogotes, Santander, Colombia	6° 28' N, 72° 57' W	MG is located in the southeast of the Santander department, Colombia. With the exception of the plain where is the urban area and some riverbanks and streams, the terrain is extremely rugged. With a height of 1746 MSL. the average temperature of 18 ° C; in parts more high the weather is cold and north is warm in Mogotes rains a lot during the April, May, June, and October	Main crop is sugar-cane, There are coffee and cacao crops lesser proportion
GL	Guadalupe, Santander, Colombia	6° 12' N, 73° 25' W	GL is located in the southeast of the Santander department, Colombia GL has loamy and clayey soils with a medium to low fertility. Its soils are located in areas of subtropical wet forest and wet forest. The topography is 40% wavy, 30% plane and 30%. With an average height of 1397 MSL. The average temperature of 22 ° C	Due to soil quality is not excellent for extensive agriculture, GL has small farms where there are several very small crops such as coffee, cassava and sugar cane. However, GL has areas covered with native savanna for cattle

Source: own work

### Synthetic data set and implementation fractionated targets

In order to have different criteria for evaluating performance of the algorithms in this study, synthetic target were created from the pure spectral signature of alunite with various degrees of mixture ( $f=10\%$ ,  $20\%$ ,  $30\%$ ,  $40\%$ , y  $100\%$ ). Alunite is a mineral which is not present in the study areas and their spectral signature differs from the signatures of agricultural target used in this research. Additionally, to simulate the behavior of the algorithms to real operating conditions of the system, white Gaussian noise was added. Finally, one synthetic HSI noiseless and 5 synthetic HSI with different noise level were created with 10 dB, 15 dB, 20 dB, 25 dB and 30 dB. The noise being measured in terms of signal-to-noise ratio (SNR), the SNR corresponds to the rate of the signal energy over noise energy, mathematically defined as  $SNR = \frac{P_s}{P_n}$ , the SNR can be expressed in decibels  $SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_s}{P_n} \right)$ .

The method used for the creation and implementation of targets within a HSI is based on creating a new target pixel  $d_{imp}$  formed by a background fraction  $f$  and synthetic spectral signature fraction  $f$  implement, the implant pixel is expressed in equation (7).

$$d_{imp} = f \cdot d + (1 - f) \cdot x, \quad (7)$$

Where  $d$  is  $k \times 1$  vector, it contains pure spectral signature alunite, its abundance varies from a fraction  $f$ , and mixed with the spectral signature of background  $x$ . In HSI, a  $5 \times 5$  target grid with different implanted fraction  $f=0.1$  (10%),  $f=0.2$  (20%),  $f=0.3$  (30%),  $f=0.4$  (40%), and  $f=1$  (100%) is generated for sub-pixel and full-pixel target. Figure 3 shows the location of each implanted fraction  $f$ , in each target, similarly, shows the main firms within the HSI.

### Extraction of spectral signatures and target to detect in real HSI

115 spectral signatures were extracted from HSI real data set, 11 were used as target in the experiments assessment of the algorithms. The data set covers five crops of northeast Colombia (african oil palm, rubber, pastures cattle farming, citrus and sugar cane). The spectral variability affects the extraction of the spectral signatures. In order to avoid spectral variability, 15 spectral signatures were taken from each selected crop HSI or sub-area. Through the determination coefficient  $R^2$  estimate each signature spectral with respect to the average for all signatures, were removed the signatures spectral with lower  $R^2$ . Finally, 11 signatures are used as targets in the comparison of five detection algorithms.

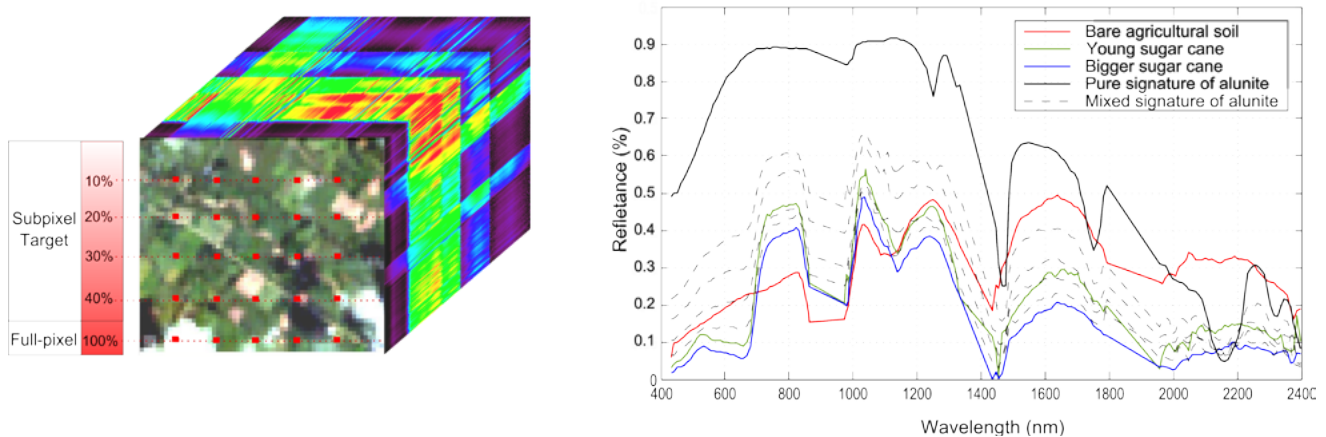


Figure 3. HSI of the study area MG with implanted targets

Source: Own work

## RESULTS

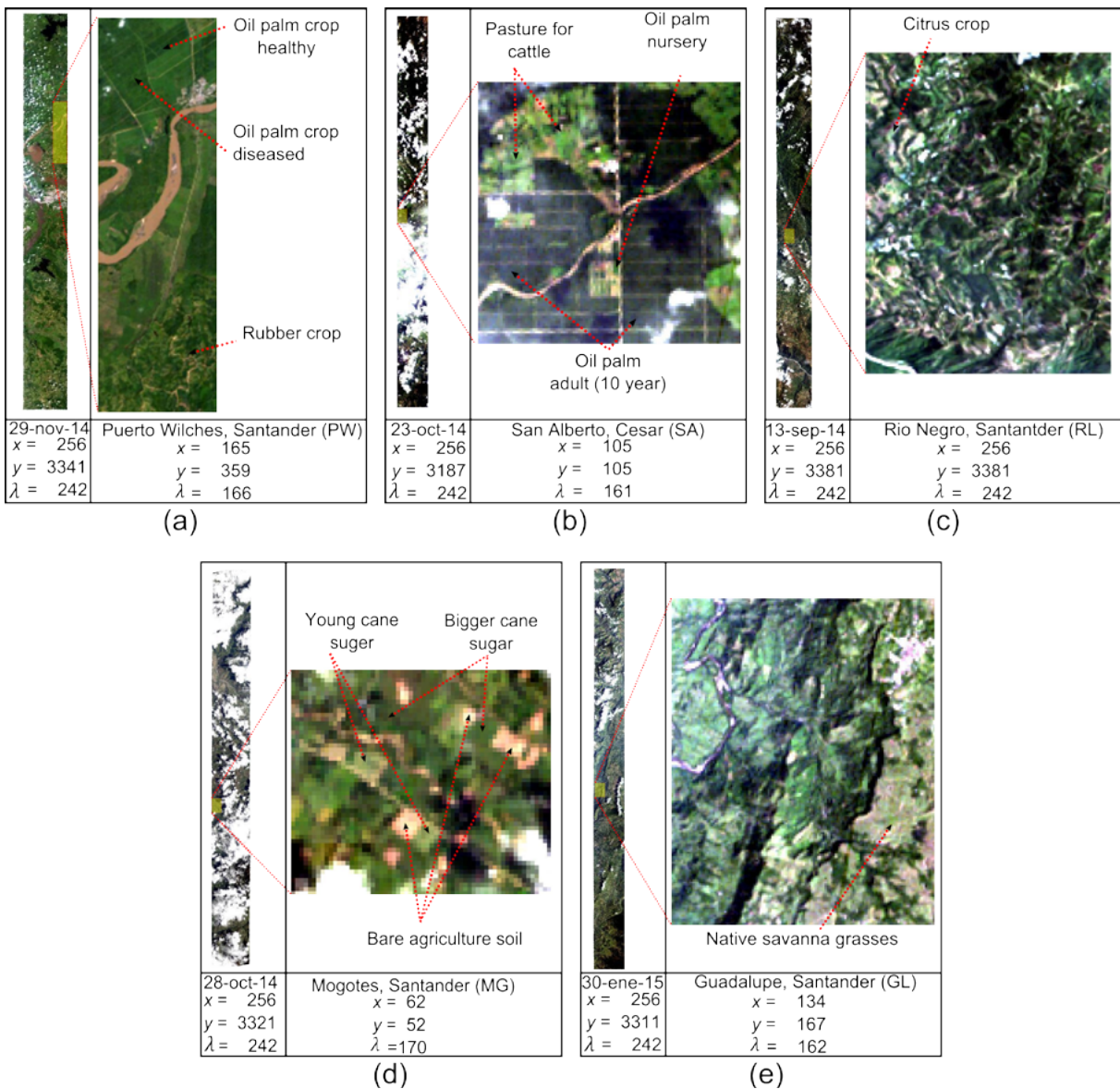
Five target detection algorithms are compared in the experiments, using synthetic and real data-sets. From the 20 images acquired by Hyperion, five were selected for the simulations, one for each area of study, shown in Figure 4. The results are analyzed and discussed by using different metrics, described in section 2.2. First, the results obtained

with the synthetic data set are shown and then the results from the real data set.

### Results with synthetic data

#### Results for noise-free synthetic data for implanted target detection

Implantation of targets with different levels of mixture allows target detection algorithms to identify



**Figure 4.** HSI selected for each study area (a) PW, (b) SA, (c) RL, (d) MG, y (e) GL

Source: Own work

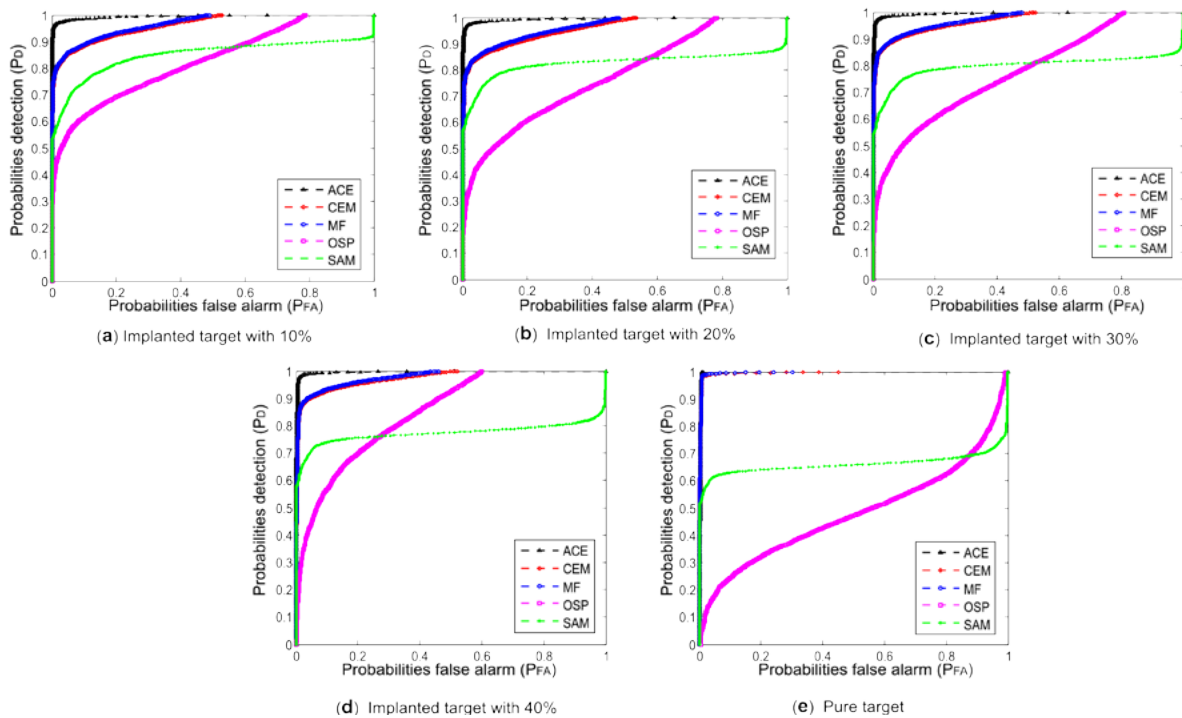
two types of targets. Sub-pixel targets for fractions  $f = 0.1, 0.2, 0.3$  and  $0.4$ , and full-pixel target for fractions of  $f = 1$ , ROC curves were used to evaluate the target detection performance. Figures 5 (a)-(d) show the ROC curves of the detection results, with a mix levels for sub-pixel targets. The algorithms ACE, CEM and MF achieve the best performance increasing the  $P_D$  rate a 10% as the  $f$  target mixing level increases. ACE had the best performance with a  $P_D > 95\%$  for all mixing levels.

Figure 5(e) shows the results for algorithms detecting full-pixel targets. The ACE, CEM and MF detect all the targets with a  $P_D$  superior than 98%, and the ACE with a  $P_D$  of 99.8%.

### Results with synthetic noise data

Comparisons show that the performance of the algorithms is affected as the noise level increases. However, for sub-pixel targets the performance is stabilized with  $SNR \geq 25$  dB and full-pixel targets performance

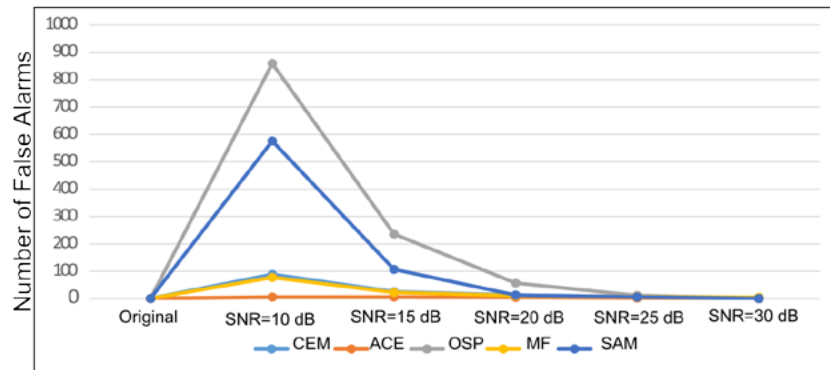
is affected only for  $SNR$  values lower than 20 dB. The algorithm with better performance using synthetic data, varying noise levels and signature abundance fraction is the ACE. However, the SAM algorithm has a stable behavior with  $SNR$  values exceeding 15 dB. SAM is not sensitive to the noise generated by spectral variability (shades or variations in brightness) because SAM depends only on the spectral shape of the target and it is independent of the magnitude differences between the target and the background pixels. Another comparison with synthetic data, evaluated the performance of algorithms in terms of number of FA to different levels of  $SNR$ . Results are compared against the algorithms that detect the target with only one false alarm on the noise-free HSI. Figure 6 validates the results obtained by the ROC curves, for  $SNR = 10$  dB where ACE achieves the best performance obtained a  $FA = 6$ , in contrast the SAM and OSP algorithms have the lowest performance with  $FA = 859$  and  $FA = 576$ , respectively.



**Figure 5.** ROC curves for implanted target detection performance for noise-free HSI. (a)  $f=0.1$  (b)  $f=0.2$ , (c)  $f=0.3$ , (d)  $f=0.4$ , and (e)  $f=1$  full-pixel.

Source: Own work





	Original	SNR = 10 dB	SNR = 15 dB	SNR = 20 dB	SNR = 25 dB	SNR = 30 dB
CEM	1	89	26	13	7	5
ACE	1	6	6	5	3	1
OSP	1	859	236	57	12	1
MF	1	78	23	11	7	5
SAM	1	576	107	13	6	1

**Figure 6.** Number of FA at different levels of noise.

**Source:** Own work

## Results with real data

Performance result of target detection algorithms on real data showed that crops with a homogeneous behavior (similarity in height, state of the crop, foliage, etc.), such as African oil palm for the study area PW and SA, and sugar cane for MG, have a lower spectral variability, thus, allow better performance of all algorithms. However, when the diseased african oil palm crops target is detected in PW, it is observed that the  $P_D$  the CEM, OSP and SAM algorithms decreases below 40%, due

to the high spectral variability of diseased crops. Another criterion for evaluating the performance of the algorithms in the study area PW was to quantify the number of FA to rates of  $P_D$  80% and 90%. Table 2 shows the results validating the behavior observed in the outputs of the algorithms and ROC curves. Likewise is observed the large number of FA generated in the OSP algorithm to attempt to detect diseased palm plantations, OSP with a  $P_D = 90\%$  obtained 4.654 FA. Similarly, the superiority of ACE algorithm is observed with a number FA=0.

**Table 2.** Number of FA against  $P_D$  of 90% and 80% for target (a) oil palm crop healthy, (b) oil palm crop diseased, (c) rubber crop.

Algorithms / PD	90%	80%	Algorithms / PD	90%	80%	Algorithms / PD	90%	80%
ACE	0	0	ACE	0	0	ACE	0	0
CEM	15	20	CEM	71	166	CEM	36	14
OSP	199	624	OSP	4634	6997	OSP	632	1374
MF	15	19	MF	69	148	MF	31	64
SAM	N.A	N.A	SAM	N.A	N.A	SAM	N.A	N.A
(a) Number of FA, oil palm healthy			(b) Number of FA, oil palm diseased			(c) Number of FA, rubber crop		

**Source:** Own work

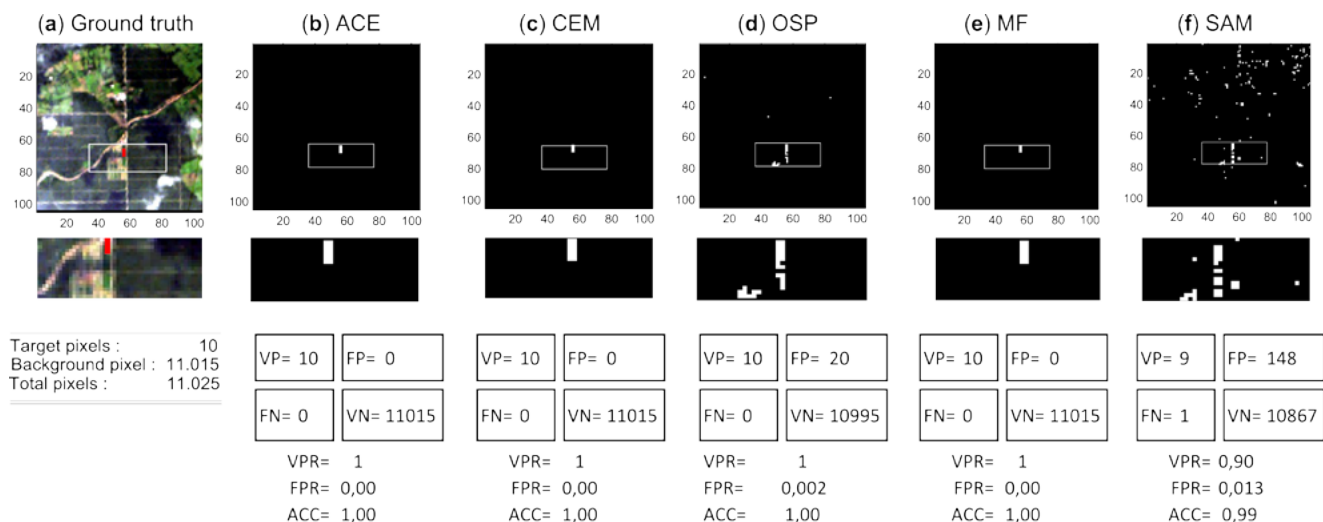
The study area SA is similar to PW, the 80% of SA has territories with large flat areas cultivated with oil palm and pasture for cattle ranching. For SA, the algorithms were evaluated with a detection threshold based on the lowest output response between the pixels that make up the target. For the experiment, a map of ground truth was created taking advantage of the existence of an oil palm nursery located in the center of the scene, the nursery was selected as target and corresponds to 10 pixels in the HSI. Figure 7(a) shows the ground truth and target location; Figures 7(b)-(f) show the responses of each algorithm and confusion matrices.

In general the results show that ACE, CEM, and MF achieve optimum performance with accuracies  $ACC=1$ , in contrast, the OSP and SAM algorithms that are able to detect the target, however, the number of FP (false positive or false alarms) is 20 and 148, respectively, this makes the false positive rate (FPR) increases and performance decreases.

On the other hand, the studied areas RL, MG and GL are opposed to PW and SA for containing a mountainous geography and temperate and cold climates, allowing the growth of crops such as citrus, coffee, cocoa and sugar cane. However, the

comparison process for algorithms in MG and GL had three limiting factors: (1) High clouds in the days of image acquisition, (2) the type of traditional agriculture with smaller crops because much of the farms or cultivated land are smallholdings or farms where be more than five different crops grown in confined spaces. However, in RL there are areas of medium size with citrus crops, for MG a valley with large surface cultivated of sugar cane in different stages of development and growth was selected, in GL there are only few continuous and large areas used for agricultural purposes, these corresponds to native savanna grasses, dedicated to raising cattle, and the shadows generated by mountains on the scene and high clouds are a constraint that generates high spectral variability in the target.

It is observed that geography and size of the areas cultivate in RL, MG and GL directly affect the performance of target detection algorithms. The results showed that the algorithms have lower performance, decreasing  $P_D$  in 30%, when they are evaluated in mountainous areas and crops of small extension scenes.



**Figure 7.** Comparison of performance based on thresholds created the response of each algorithm. (a) Ground truth, (b) ACE, (c) CEM, (d) OSP, (e) MF, (f) SAM.

**Source:** Own work

Finally, the results show that the ACE algorithm has the best performance for different HSI and targets, both synthetic HSI and real HSI with  $P_D \geq 90\%$ , CEM and MF algorithms have an acceptable behavior with average of  $P_D = 75\%$ . In an opposite way, SAM and OSP algorithms have the lowest performance, with values of  $P_D \leq 40\%$ , SAM and OSP are able to detect the target, however, the number of FA is high, decreasing their performance.

## CONCLUSIONS

In applications for target detection in HSI, it is critical to find an algorithm to have optimal performance for different scenarios and targets. This research is conducted on five scenarios with different geographies and climates characteristic of northeastern Colombia, allowing to compare the performance of the algorithms ACE, CEM, OSP, MF and SAM for target of agricultural type. Results show that the algorithms have a better performance when they run on scenes that have flat areas, large surfaces, and equal targets (eg. Oil palm plantation in PW and SA, sugar cane crops in MG), the conditions as mentioned above allow to have homogeneous and shadows free scenes, therefore this spectral variability decreases and target detection algorithms performance increase with a  $P_D$  gain of 30%. The ACE algorithm has the best performance for different HSI and targets, both synthetic HSI and real HSI with  $P_D \geq 90\%$ , due to the ACE algorithm being the one that best models the spectral variability of background and target. Additionally, it is possible to obtain a data set of real hyperspectral images of Colombian territory for introduction, appropriation, and research on the use and application of HSI in agriculture, allowing the development of new research fields, processes, and applications at national level; specifically in agricultural crops under variables and factors exclusive of Colombian agriculture and geography.

## FINANCING

This work was partially supported by the Universidad Industrial de Santander of Bucaramanga under Grant No. 1802 of April, 2015.

## BIBLIOGRAPHY

- Armesto Arenas, A., Angarita, W., & Lobo Jácome, R. (2015). Efectos de la radiación electromagnética sobre la germinación del maíz. *Tecnura*, 19(45), 65-73.
- Bioucas-Dias, J., Plaza, A., Camps-Valls, G., Scheunders, P., Nasrabadi, N., & Chanussot, J. (2013). Hyperspectral Remote Sensing Data Analysis and Future Challenges. *IEEE Geoscience and remote sensing magazine*, 6-36.
- Céspedes, J. E. S., Avellaneda, J. C., & Henríquez, A. G. (2012). Diseño e implementación de un módulo de gestión de energía para un pico-satélite tipo CUBE-SAT. *Revista Tecnura*, 16, 55-67.
- Chang, C.-I., Liu, J.-M., Chieu, B.-C., Ren, H., Wang, C.-M., Lo, C.-S., & Ma, D.-J. (2000). Generalized constrained energy minimization approach to subpixel target detection for multispectral imagery. *Optical Engineering*, 1275-1281.
- Du, Q., Ren, H., & Chang, C.-I. (2003). A Comparative Study for Orthogonal Subspace Projection and Constrained Energy Minimization. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 1525-1529.
- Jin, X., Paswaters, S., & Cline, H. (2009). A comparative study of target detection algorithms for hyperspectral imagery. In *SPIE Defense, Security, and Sensing*. International Society for Optics and Photonics. 73341W-73341W.
- Kruse, F., Lefkoff, A., & Boardman, J. (1993). The spectral image processing system (SIPS) interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sensing Environmental*, 145-163.
- Manolakis, D., & Shaw, G. (2002). Detection algorithms for hyperspectral imaging applications. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 29-43.

Manolakis, D., Truslow, E., Pieper, M., Cooley, T., & Brueggeman, M. (2014). Detection Algorithms in Hyperspectral Imaging Systems. *IEEE Signal Processing Magazine*, 24-33.

Thenkabail, P. S., Smith, R., & De Pauw, E. (2000). Hyperspectral Vegetation Indices and Their Relationships with Agricultural Crop Characteristics. *Remote Sensing Environment*, 71, 158-182.

Velasco, A. C., García, C. A. V., Morales, F. A. R., Castelblanco, S. F. C., & Fuentes, H. A. (2015).

Aplicaciones y retos del sensado remoto hiperspectral en la geología colombiana. *Facultad de Ingeniería*, 24(40), 17-29.

Ramirez, A., Arguello, H., Arce, G. R., & Sadler, B. M. (2014). Spectral image classification from optimal coded-aperture compressive measurements. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 52(6), 3299-3309.





## Análisis de vulnerabilidad de sistemas de potencia incluyendo incertidumbre en las variables con lógica difusa tipo 2

### Analysis of power system vulnerability considering uncertainty in variables using fuzzy logic type 2

Julián Alexánder Melo Rodríguez<sup>1</sup>, Camilo Andrés Cortés<sup>2</sup>

**Fecha de recepción:** 4 de febrero de 2016

**Fecha de aceptación:** 15 de mayo de 2016

**Cómo citar:** Melo Rodríguez, J. A., & Cortés, C. A. (2016). Análisis de vulnerabilidad de sistemas de potencia incluyendo incertidumbre en las variables con lógica difusa tipo 2. *Revista Tecnura*, 20(49), 100-119 doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.3.a07

#### RESUMEN

**Objetivo:** En este trabajo se propone una nueva metodología de análisis de vulnerabilidad de sistemas de potencia incluyendo incertidumbre en algunas variables.

**Método:** La metodología implementa un modelo de optimización binivel entera-mixta. En el nivel inferior se minimizan los costos asociados a la generación de energía y a la penalidad por deslastre de carga, mientras que en el nivel superior se maximiza el daño en el sistema de potencia representado por el deslastre de carga. Se utiliza la Lógica Difusa tipo 2 para modelar la incertidumbre tanto en variables lingüísticas como en variables numéricas. Las variables lingüísticas modelan los factores del entorno geográfico mientras que las variables numéricas modelan los parámetros del sistema de potencia.

**Resultados:** La metodología se validó en un sistema de prueba IEEE RTS-96 modificado. Los resultados muestran que al incluir particularidades del entorno geográfico se detectan distintas vulnerabilidades en el sistema de potencia. Además, se logró identificar que el componente más crítico del sistema es la línea 112-123, ya que es atacada 16 veces en 18

escenarios contemplados, y que el máximo deslastre de carga en el sistema varía desde 145 a 1258 MW.

**Conclusiones:** Esta metodología puede ser usada para coordinar y afinar los planes de seguridad de la infraestructura eléctrica del sistema.

**Financiamiento:** Grupo de investigación EMC-UN

**Palabras clave:** Vulnerabilidad, Sistemas de potencia, Lógica difusa tipo 2

#### ABSTRACT

**Objectives:** This paper presents a new methodology for analyzing the vulnerability of power systems including uncertainty in some variables.

**Method:** The methodology optimizes a Bi-level mixed integer model. Costs associated with power generation and load shedding are minimized at the lowest level whereas at the higher level the damage in the power system, represented by the load shedding, is maximized. Fuzzy logic type 2 is used to model the uncertainty in both linguistic variables and numeric variables. The linguistic variables model the factors of the geographical environment while numeric variables model parameters of the power system.

1 Ingeniero Electricista, magíster en Ingeniería Eléctrica. Profesional especializado Banco de la República. Bogotá, Colombia. Contacto: [jamelor@unal.edu.co](mailto:jamelor@unal.edu.co)

2 Ingeniero Electricista, doctor en Ingeniería Eléctrica. Profesor asociado de la Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Contacto: [caacortesgu@unal.edu.co](mailto:caacortesgu@unal.edu.co)

**Results:** The methodology was validated by using a modified IEEE RTS-96 test system. The results show that by including particularities of the geographical environment different vulnerabilities are detected in the power system. Moreover, it was possible to identify that the most critical component is the line 112-123 because it had 16 attacks in 18 scenarios, and that the maximum load shedding of the system varies from 145 to 1258 MW.

**Conclusions:** This methodology can be used to coordinate and refine protection plans of the power system infrastructure.

**Funding:** EMC-UN research group.

**Keywords:** Vulnerability, Power systems, Fuzzy logic type 2

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Conjuntos de componentes del sistema:

$I$	conjunto de nodos ( $i, k$ representan índices de nodos)
$G_i$	conjunto de generadores en el nodo $i$ ( $g$ representa un generador)
$L$	conjunto de líneas de transmisión ( $l$ representa una línea)
$L_i$	conjunto líneas conectadas al nodo $i$
$C$	conjunto de consumidores ( $c$ representa un consumidor)
$S$	conjunto de subestaciones ( $s$ representa una subestación)
$I_s$	conjunto de nodos en la subestación
$L_s$	conjunto de líneas en la subestación $s$ (se incluyen transformadores y líneas conectadas a la subestación)

### Parámetros del sistema:

$O(l), d(l)$	nodos origen y destino de la línea $l \in L$ . Más de una línea con el mismo origen y destino pueden existir.
$i(g)$	nodo para el generador $g$
$d_{ic}$	carga demandada por el consumidor $c$ en el nodo $i$
$\overline{P}_l^{Line}$	capacidad de transmisión de la línea $l \in L$
$\overline{P}_g^{Gen}$	capacidad máxima de generación del generador $g$
$r_l$	resistencia de la línea $l \in L$
$x_l$	reactancia de la línea $l \in L$ (se asume $x_l \gg r_l$ )
$B_l$	susceptancia serie de la línea $l \in L$ . Calculada como $B_l = \frac{x_l}{r_l^2 + x_l^2}$
$f_{ic}(S_{ic})$	costos del deslastre de carga para el consumidor $c$ en el nodo $i$
$h_g(P_g^{Gen})$	función de costos de generación para el generador $g$ en el nodo $i$

### Conjuntos adicionales de componentes del sistema:

$G_i^* \subseteq G_i, L^* \subseteq L, I^* \subseteq I, S^* \subseteq S$ :	conjuntos "atacables" de: generadores en el nodo $i$ , líneas, nodos y subestaciones respectivamente.
----------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Conjuntos adicionales de parámetros del sistema:**


---

$M^{Gen}, M^{Line}, M^{Bus}, M^{SE}$  : cantidad de recursos requeridos para atacar un generador, línea, nodo y subestación respectivamente.

---

**Variables de interdicción:**


---

$\delta^{Gen}, \delta^{Line}, \delta^{Bus}, \delta^{SE}$  : variables binarias con valor 1 si el generador, línea, nodo o subestación respectivamente es atacado, y 0 si no hay ataque.

---

**INTRODUCCIÓN**

Un sistema de potencia es un conjunto de redes e instalaciones que ofrecen un servicio público de suministro de energía eléctrica esencial para la sociedad y su economía. Este sistema se considera una infraestructura crítica, ya que una falla parcial o total de uno o más de sus componentes puede tener una incidencia negativa de orden económico, ambiental, político o social. De hecho, es necesario que los sistemas de potencia tengan altos índices de calidad, seguridad y eficiencia (Bolaños y Correa, 2014). Sin embargo, los incrementos en la demanda y en las restricciones ambientales así como la liberalización de los mercados de electricidad han ocasionado que los sistemas de potencia estén operando cada vez más cerca de sus límites de estabilidad (Perdomo Fontalvo, 2015). Por este motivo es importante determinar la vulnerabilidad de estos sistemas ante cualquier eventualidad, ya sea natural o intencional, mediante la implementación de diferentes metodologías.

**Vulnerabilidad de sistemas de potencia ante ataques**

La importancia de determinar la vulnerabilidad de los sistemas eléctricos adquiere cada día mayor trascendencia, por tanto, mediante la implementación de metodologías para su análisis, es posible estudiar las consecuencias de diferentes eventos. Son escasas las investigaciones en el campo de la vulnerabilidad de sistemas de potencia con anterioridad a los atentados terroristas del 11 de septiembre del 2001 en Estados Unidos. Sin embargo,

luego de esta fecha ha aumentado la necesidad de proteger los sistemas eléctricos ante cualquier eventualidad, ya sea natural o intencional. Por esta razón, actualmente en diferentes países se están estudiando nuevos métodos para el análisis de la vulnerabilidad de los sistemas de potencia.

Las metodologías actuales, que abordan el tema del análisis de vulnerabilidad de sistemas de potencia, tienen en su mayoría el mismo punto de partida: la metodología VEGA (Salmeron, Wood, y Baldick, 2003) que implementa optimización binivel, donde se describen nuevas técnicas analíticas que ayudan a mitigar interrupciones en sistemas de potencia causadas por ataques intencionales. Modelos matemáticos binivel identifican componentes críticos del sistema (líneas de transmisión, generadores, transformadores y subestaciones), con lo se crean planes de ataque máximamente disruptivos para el atacante que, se asume, posee recursos de ataque limitados. El modelo matemático binivel se compone de dos problemas de optimización: la minimización interna busca suministrar la energía en el sistema a menor costo y penalidad por energía no suministrada, mientras que la maximización exterior busca el plan de ataque que maximice la energía no suministrada.

La metodología VEGA fue punto de partida para varias propuestas posteriores. En Arroyo y Galiana (2005), la formulación binivel se investiga a través de una función en el cual el objetivo del atacante es minimizar el número de componentes del sistema que deben ser destruidos con el fin de causar un deslastre de carga mayor o igual a un nivel específico, convirtiendo las no-linealidades en equivalentes lineales. En Motto, Arroyo y Galiana

(2005) se presenta un procedimiento de solución para el modelo de programación lineal binivel entera-mixta obtenido del análisis de vulnerabilidad. A partir de resultados de la teoría de programación lineal y de linealización de productos entre variable, se propone modelo estándar de programación lineal entera-mixta (de un nivel). En Delgadillo, Arroyo y Alguacil (2010), la metodología se formula como un problema de programación no lineal binivel entera-mixta. En el nivel superior de optimización, el agente atacante maximiza el daño causado en el sistema de potencia, el cual es medido en términos del deslastre de carga. Por otro lado, en el nivel inferior de optimización, el operador del sistema minimiza el daño por medio de una operación óptima del sistema de potencia por medio de acciones correctivas, modificando su topología. Dado que es un problema no-conexo y no-lineal, el problema de programación binivel resultante no puede ser transformado en un problema de optimización estándar de un nivel. En Alguacil, Delgadillo y Arroyo (2014) se aborda el problema de vulnerabilidad de sistemas de potencia con un enfoque de programación trinivel: en el primero, el operador del sistema identifica los componentes a ser reforzados con el fin de reducir el daño asociado a posibles apagones; en el segundo, el atacante determina el conjunto de componentes a atacar con el fin de maximizar el daño en el sistema, y en el tercero, el operador del sistema minimiza el daño causado por el ataque ejecutado por medio de una operación óptima del sistema de potencia. Incluso, recientemente se propuso una metodología de análisis de vulnerabilidad binivel basada en flujo de potencia AC para incluir los efectos de la potencia reactiva y los niveles de tensión en los nodos del sistema (Agudelo, López-Lezama y Muñoz, 2014).

Desde otra perspectiva, Tranchita (2008) y Tranchita, Hadjsaid y Torres (2006) presentan un método basado en la evaluación del riesgo, el cual les permite a los operadores y planeadores evaluar la seguridad del sistema de potencia con respecto

a posibles ataques. Mediante la implementación de *inferencia probabilística y teoría de la posibilidad*, se considera tanto la incertidumbre asociada con el comportamiento dinámico del atacante, como también la asociada con la predicción de las potencias generada y demandada.

En el presente trabajo se propone una metodología de optimización binivel entera-mixta que permite analizar la vulnerabilidad de sistemas de potencia teniendo en cuenta las variables del entorno geográfico con sus respectivos grados de incertidumbre. De esta forma, los operadores de sistemas de potencia pueden determinar cuáles componentes del sistema se encuentran en mayor grado de vulnerabilidad y, con base en esto, tomar medidas con el fin de proteger los componentes críticos para la operación del sistema.

## METODOLOGÍA

El análisis de vulnerabilidad de sistemas de potencia consiste en examinar un conjunto de contingencias factibles y su efecto en la operación del sistema. Es importante destacar que cuando se busca en qué puntos atacar el sistema para maximizar el deslastre de carga (o función de costos), en últimas se está determinando cómo proteger al sistema ante ataques intencionales.

En la figura 1 se muestran las principales etapas de la metodología propuesta. En primer lugar se presentan las variables de entrada que se dividen en dos grupos, el primero se relaciona con los factores del entorno geográfico (variables lingüísticas) y el segundo con los parámetros del sistema de potencia (variables numéricas). En segundo lugar se muestra el cuerpo de la metodología en el cual el modelo matemático de vulnerabilidad de sistemas de potencia recurre al modelado de la incertidumbre en algunas de las variables. Por último, el resultado obtenido de la metodología propuesta es un conjunto de componentes que cuando son atacados de manera coordinada, hacen que se maximice el deslastre de carga (o función de costos) en el sistema.



Así, el modelo propuesto de análisis de vulnerabilidad de sistemas de potencia que incluye incertidumbre en algunas de sus variables. Partiendo de la metodología propuesta en Salmeron, Wood y Baldick (2004), se desarrolla un modelo de interdicción y un algoritmo para resolver el problema de análisis de vulnerabilidad de manera aproximada. El modelo de interdicción es un problema max-min (Mm) de optimización como se muestra en la ecuación (1).

$$(Mm): \max_{\delta \in \Delta} \min_c cy$$

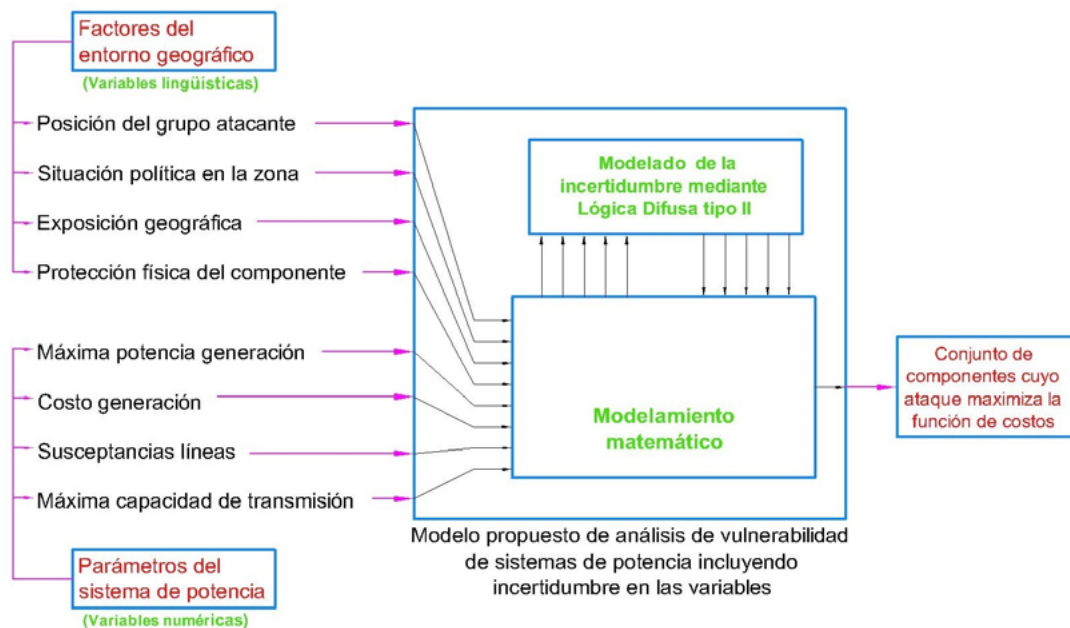
$$\text{sujeto a } \begin{cases} f(y, \delta) \leq b \\ y \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

Para un plan de interdicción dado  $\delta$ , el problema interior es un flujo de potencia que minimiza los costos de generación más la penalización por carga no suministrada, denotado por  $cy$ , en donde  $y$  representa las potencias generadas, los ángulos de los fasores, los flujos de potencia por las líneas y la potencia no suministrada (deslastre de carga).

La maximización exterior selecciona el plan de ataque (interdicción)  $\delta \in \Delta$  que conlleva al mayor deslastre de carga posible. En la metodología propuesta en este trabajo se modela la afectación que los factores del entorno geográfico tienen sobre el sistema de potencia, esto se tiene en cuenta en la expresión  $f(y, \delta)$  de la ecuación (1).

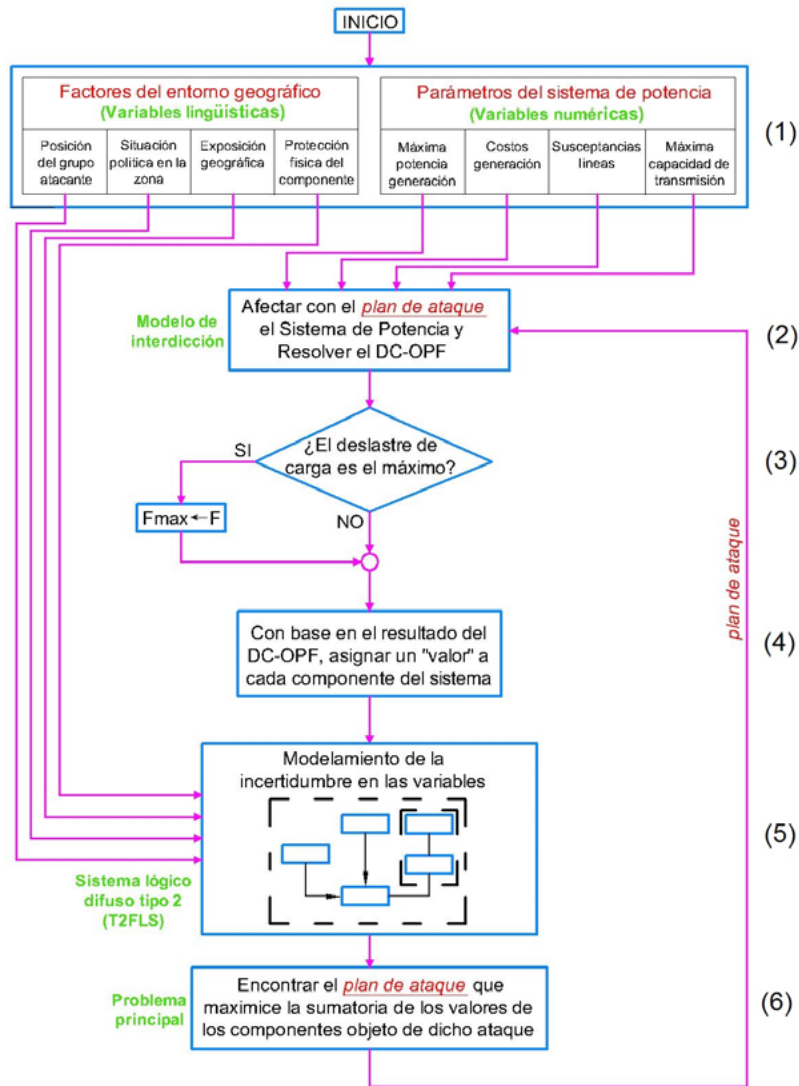
La figura 2 muestra el diagrama de flujo de la metodología. Las variables de entrada (paso 1) se dividen en dos grupos: las lingüísticas, relacionadas con los factores del entorno geográfico, y las numéricas, relacionadas con los parámetros del sistema de potencia.

En el paso 2 se muestra el modelo de interdicción en el cual se resuelve el DC-OPF (flujo de potencia óptimo DC) para el sistema de potencia. Dicho DC-OPF se lleva a cabo retirando del sistema los componentes afectados por el plan de ataque proveniente del problema principal (paso 6). En el paso 3 se evalúa si el deslastre de carga provocado por el plan de ataque es máximo;



**Figura 1.** Esquema de la metodología propuesta

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 2.** Diagrama de flujo de la metodología propuesta

**Fuente:** elaboración propia.

de ser así, dicho plan de ataque sería el mejor para el atacante. En el paso 4 se asigna un valor a cada componente del sistema, dicho valor se basa en la cantidad de potencia que pasa a través del componente. En el paso 5 se lleva a cabo el modelado de la incertidumbre de los factores del entorno geográfico mediante lógica difusa tipo 2. Por último, en el paso 6 se soluciona el problema principal en el cual se busca el plan de ataque de mayor valor.

### Solución del flujo de potencia óptimo

Como se propone en Salmeron, Wood y Baldick (2004) el modelo de flujo de carga se simplifica mediante la implementación del modelo DC. Esta simplificación es válida en el contexto de los análisis de seguridad. El objetivo del flujo de carga DC es generar y distribuir energía a mínimo costo. El flujo de potencia óptimo DC se formula en la ecuación (2).

$$\min_{p^{Gen}, p^{Line}, s, \theta} \sum_i \sum_g h_g(P_g^{Gen}) + \sum_i \sum_c f_{ic}(S_{ic}) \quad (2)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$P_l^{Line} = B_l(\theta_{o(l)} - \theta_{d(l)}) \quad \forall l \quad (3)$$

$$\sum_g P_g^{Gen} - \sum_{l|o(l)=i} P_l^{Line} + \sum_{l|d(l)=i} P_l^{Line} = \sum_c (d_{ic} - S_{ic}) \quad \forall i \quad (4)$$

$$-\bar{P}_l^{Line} \leq P_l^{Line} \leq \bar{P}_l^{Line} \quad \forall l \quad (5)$$

$$0 \leq P_g^{Gen} \leq \bar{P}_g^{Gen} \quad \forall g \quad (6)$$

$$0 \leq S_{ic} \leq d_{ic} \quad \forall i, c \quad (7)$$

El modelo DC-OPF minimiza generación más costos de deslastre (penalizaciones). La restricción (3) aproxima el flujo de potencia activa en las líneas. La restricción (4) representa el balance de potencia en los nodos. Las restricciones (5) y (6) establecen las capacidades máximas de transmisión y generación respectivamente. La restricción (7) establece que el deslastre de carga en los nodos no debe ser mayor a su respectiva demanda.

## Modelo de interdicción

En el modelo de interdicción de la metodología VEGA (paso 2, figura 1) mediante el flujo óptimo

de carga DC se minimizan los costos de generación más la demanda no satisfecha en el sistema de potencia (Salmeron, Wood y Baldick, 2003). En dicho sistema se retiran los componentes que han sido afectados por el atacante de acuerdo con el plan de ataque  $\delta$  que se obtiene del problema principal (paso 6, figura 1). Las interdicciones  $\delta$  llevadas a cabo por los atacantes son variables binarias que toman el valor de 1 cuando hay ataque y 0 en caso contrario. El modelo de interdicción I-DC-OPF se muestra en la ecuación (8).

$$\max_{\delta^{Gen}, \delta^{Line}, \delta^{Bus}, \delta^{SE}} \gamma(\delta^{Gen}, \delta^{Line}, \delta^{Bus}, \delta^{SE}) \quad (8)$$

Sujeto a las restricciones de las ecuaciones (9) y (10):

$$\sum_g M_g^{Gen} \delta_g^{Gen} + \sum_l M_l^{Line} \delta_l^{Line} + \sum_i M_i^{Bus} \delta_i^{Bus} + \sum_s M_s^{SE} \delta_s^{SE} \leq M \quad (9)$$

$$\delta_g^{Gen} \in \{0,1\}, \delta_l^{Line} \in \{0,1\}, \delta_i^{Bus} \in \{0,1\}, \delta_s^{SE} \in \{0,1\} \quad \forall \text{ componente "atacable"} \quad (10)$$

Donde:

$$\gamma(\delta^{Gen}, \delta^{Line}, \delta^{Bus}, \delta^{SE}) = \min_{p^{Gen}, p^{Line}, s, \theta} \sum_i \sum_g h_g(P_g^{Gen}) + \sum_i \sum_c f_{ic}(S_{ic}) \quad (11)$$

Sujeto a las restricciones (13) a (16):

$$P_l^{Line} = B_l(\theta_{o(l)} - \theta_{d(l)})(1 - \delta_l^{Line})(1 - \delta_{o(l)}^{Bus})(1 - \delta_{d(l)}^{Bus}) \prod_{s|l \in L_s^{SE}} (1 - \delta_s^{SE}) \prod_{l'|l' \in L_l^{Par}} (1 - \delta_l^{Line}) \quad (12)$$

$$\sum_g P_g^{Gen} - \sum_{l|o(l)=i} P_l^{Line} + \sum_{l|d(l)=i} P_l^{Line} = \sum_c (d_{ic} - S_{ic}) \quad \forall i \quad (13)$$

$$-\bar{P}_l^{Line} (1 - \delta_l^{Line}) \leq P_l^{Line} \leq \bar{P}_l^{Line} (1 - \delta_l^{Line}) \quad (14)$$

$$0 \leq P_g^{Gen} \leq (1 - \delta_{i(g)}^{Bus})(1 - \delta_g^{Gen})(1 - \delta_s^{Sub}) \bar{P}_g^{Gen} \quad \forall g \quad (15)$$

$$0 \leq S_{ic} \leq d_{ic} \quad \forall i, c \quad (16)$$

En la ecuación (15), mediante la adición del factor  $(1 - \delta_s^{Sub})$ , se considera el caso de sistemas de potencia que contemplan generadores conectados directamente a uno de los nodos de una subestación (Leal, Sandoval y Cortés, 2007). Es decir, en el momento de ser atacada una subestación, los generadores que estén entregando su potencia a los nodos de ella deben ser desconectados como consecuencia del ataque. De acuerdo con Salmeron, Wood y Baldick (2004), la solución del I-DC-OPF maximiza la disrupción. La disrupción se evalúa a través del problema de minimización interno que consiste en un modelo de flujo de potencia óptimo DC-OPF del cual de antemano se retiran los componentes atacados. En el nivel superior, (9) refleja las opciones del atacante para ejecutar las diferentes combinaciones de ataque limitadas por el recurso total de ataque  $M$ . La expresión (10) define las opciones del atacante como variables binarias. Las ecuaciones (12) a (16) son análogas a (3) a (7), con la diferencia de que los componentes de sistema atacados (directa o indirectamente) han sido removidos de las ecuaciones a través de las variables binarias.

## Modelado de los factores del entorno

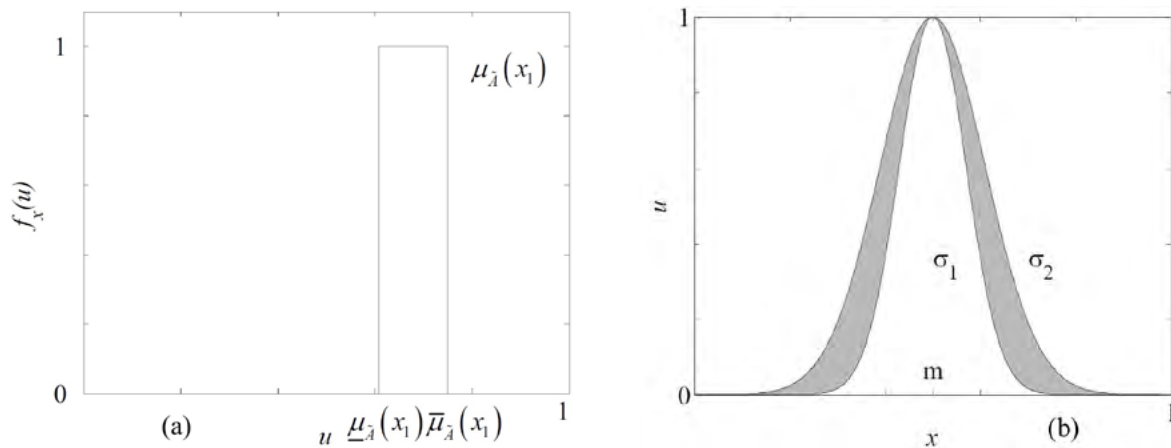
Se decidió utilizar para este propósito un sistema lógico difuso tipo 2 (T2FLS, Type 2 Fuzzy Logic

System) ya que es capaz de modelar eficientemente las incertidumbres acerca del significado de las palabras utilizadas en los factores del entorno geográfico; es decir, las palabras significan diferentes cosas para diferentes personas (Mendel, 2001). La naturaleza de esta incertidumbre concuerda con la definición de vaguedad, es decir, incertidumbre resultado de la imprecisión lingüística (Romero, 2005). Una descripción completa de los fundamentos matemáticos, metodologías de cálculo y aplicaciones de los conjuntos y sistemas de lógica difusa tipo 2 es presentada en Mendel (2001).

Para implementar los T2FLS, en este trabajo se utilizan funciones de pertenencia secundaria (FPS) de intervalo (figura 3a), dado que computacionalmente son menos complejas. Para determinar la huella de incertidumbre (FOU *Footprint Of Uncertainty*) de las funciones gaussianas con desviación estándar  $\sigma$  incierta que toma los valores entre  $[\sigma_1, \sigma_2]$  (figura 3b) se tiene la siguiente ecuación (17).

$$\mu(x) = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x-m}{\sigma} \right)^2 \right] \quad \sigma \in [\sigma_1, \sigma_2] \quad (17)$$

En los vectores, (18) y (19) muestran los valores de desviación estándar  $\sigma$  para implementar el T2FLS de la metodología propuesta; estos vectores contienen los cinco valores de desviación estándar  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  que se utilizan para las variables de entrada al T2FLS.



**Figura 3.** a. FPS tipo intervalo para  $x = x_j$ . b. FOU gaussiana con  $\sigma$  incierta

**Fuente:** elaboración propia, adaptado de Romero (2005).

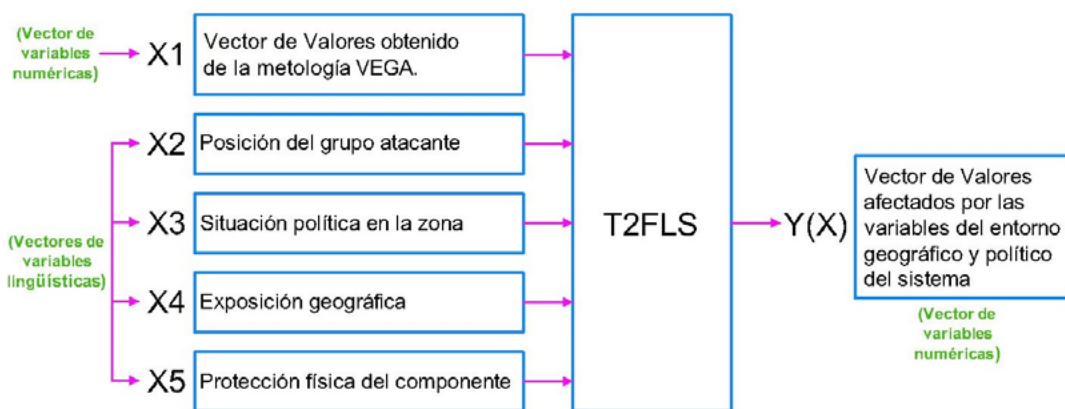
$$\sigma_1 = [ 0,01 \ 0,07 \ 0,07 \ 0,07 \ 0,07 ] \quad (18)$$

$$\sigma_2 = [ 0,02 \ 0,08 \ 0,08 \ 0,08 \ 0,08 ] \quad (19)$$

En la figura 4 se muestra el esquema del T2FLS que es propuesto para modelar los calificadores lingüísticos del entorno geográfico y político. La entrada  $\mathbf{X}$  a este sistema se compone del vector de valores entregado por la metodología VEGA y de los calificadores lingüísticos del entorno geográfico, mientras que la salida  $\mathbf{Y}(\mathbf{X})$  es el vector de

valores con afectación del entorno geográfico y político.

Las entradas y salidas del T2FLS son vectores de  $n$  elementos, donde  $n$  es el número total de elementos del sistema de potencia (generadores, líneas, nodos y subestaciones). El vector de entrada  $\mathbf{X1}$  es el vector de valores obtenido de la metodología VEGA, el dominio de esta variable es el intervalo  $[0,1]$ , cuanto más cercano a 1, mayor es la importancia del componente en el sistema de potencia. Los vectores  $\mathbf{X2}$ ,  $\mathbf{X3}$ ,  $\mathbf{X4}$  y  $\mathbf{X5}$  son de variables lingüísticas que toman los calificadores según



**Figura 4.** Esquema del T2FLS propuesto para modelar los factores del entorno geográfico y político

**Fuente:** elaboración propia.

la tabla 1. El vector de salida  $Y(X)$  es el vector de valores afectado por las variables del entorno geográfico y político del sistema. Al igual que el vector  $X1$ , el dominio de esta variable es el intervalo  $[0,1]$  y cuanto más cercano a 1, mayor es la importancia del componente en el sistema de potencia.

Los factores del entorno se definen de la siguiente forma:

- Predominio del grupo atacante: la presencia o predominio de un grupo atacante en un área determinada se entiende como el grado de influencia y control que este ejerce. Se relaciona con el grado de poder que el grupo posee en dicha zona.
- Situación política en la zona: mediante los ataques terroristas, los grupos insurgentes buscan un impacto político para alcanzar sus objetivos de intimidación en la población civil.
- Exposición geográfica de los componentes: Dado que los sistemas de potencia abarcan regiones extensas en las cuales la mayoría de los componentes se encuentran en zonas apartadas, los componentes del sistema que se encuentran más expuestos geográficamente son más vulnerables a ataques.
- Protección física de los componentes: Al encontrarse los sistemas de potencia localizados en vastas regiones, en la práctica es imposible proteger con la fuerza pública todos los componentes del sistema. Por ejemplo, las unidades de generación se encuentran más protegidas que las líneas de transmisión de energía.

El T2FLS propuesto para calcular el vector de valores afectado por el entorno  $Y(X)$  utiliza la base de reglas mostrada en la Tabla 2. Cada regla tiene cinco antecedentes  $X1_i, X2_i, X3_i, X4_i$  y  $X5_i$  y un consecuente  $Y_i$  (Para la regla  $i$ ). La regla número 1 representa la condición menos atractiva para el atacante ya que el valor del componente es 0, el predominio del grupo atacante en la zona es bajo, la situación política en la zona no es crítica, el componente del sistema de potencia no está expuesto y la protección física del componente es alta. Por otro lado, la regla número 243 presenta la condición más atractiva para el atacante, ya que el valor del componente es 1, el predominio del grupo atacante es alto, la situación política en la zona es crítica, el componente del sistema de potencia está expuesto y la protección física del componente es baja. El número de reglas es  $3^5=243$ , ya que son cinco antecedentes, cada uno de los cuales tiene tres estados. Se puede observar que el vector de valores con afectación del entorno  $Y$ , es una función de  $X1, X2, X3, X4$  y  $X5$ . El T2FLS realiza un mapeo del espacio de entrada al espacio de salida utilizando la base de reglas de la tabla 2 (la tabla completa se puede descargar de <http://tinyurl.com/zmesusp>).

### Algoritmo de interdicción

El algoritmo inicia solucionando el DC-OPF asumiendo que no hay ataques. El resultado es un

**Tabla 1.** Calificadores lingüísticos para los factores del entorno

Factor del entorno	Calificadores lingüísticos		
Posición del grupo atacante	Presencia alta	Presencia media	Presencia baja
Situación política en la zona	Crítica	Moderadamente crítica	No crítica
Exposición geográfica de los componentes	Exposición alta	Exposición media	Exposición baja
Protección física de los componentes	Protección alta	Protección media	Protección baja

**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 2.** Calificadores lingüísticos para los factores del entorno base de reglas del T2FLS utilizado para calcular el vector de valores afectado por el entorno geográfico y político

Regla número	ANTECEDENTES					CONSECUENTE
	X1	X2	X3	X4	X5	Y
	Vector de valores obtenido de la metodología VEGA	Predominio del grupo atacante en la zona	Situación política en la zona	Exposición geográfica de los componentes	Protección física de los componentes	Vector de valores con afectación del entorno
1	0	Predominio bajo	No crítica	Exposición baja	Protección alta	0
2	0	Predominio bajo	No crítica	Exposición baja	Protección media	0,05
3	0	Predominio bajo	No crítica	Exposición baja	Protección baja	0,1
4	0	Predominio bajo	No crítica	Exposición media	Protección alta	0,05
...	...	...	...	...	...	...
242	1	Predominio alto	Crítica	Exposición alta	Protección media	0,95
243	1	Predominio alto	Crítica	Exposición alta	Protección baja	1

**Fuente:** elaboración propia.

flujo de potencia óptimo para operación normal, un flujo típico en el cual se minimizan los costos de generación sin deslastrar carga. El patrón de dicho flujo de potencia es utilizado para asignar valores relativos a todos los componentes del sistema: generadores, líneas, nodos y subestaciones. A continuación, en el problema principal se maximiza la sumatoria de los valores de los componentes, teniendo en cuenta que el recurso de ataque es limitado. Con este plan de ataque, se modifica el lado derecho de las ecuaciones del DC-OPF (12)-(16) y se obtiene su solución. El resultado es un flujo de potencia que otra vez minimiza costos de generación más la penalización asociada al deslastre de carga: es posible que en este caso algunas demandas hayan sido deslastradas ya que componentes valiosos han sido removidos del sistema. El proceso continúa mediante la identificación de diferentes conjuntos de componentes valiosos para atacar (planes de ataque) que no han sido encontrados en iteraciones anteriores, ecuación (28), así como mediante la evaluación del deslastre de carga asociado a cada plan de ataque.

#### *Subproblema: DC-OPF para un plan de interdicción específico*

Se asume que en la iteración  $t$  del algoritmo, un plan de ataque (interdicción) específico  $\hat{\delta}^t = (\hat{\delta}^{Gen,t}, \hat{\delta}^{Line,t}, \hat{\delta}^{Bus,t}, \hat{\delta}^{SE,t})$  es dado; el superíndice  $t$  es el contador de las iteraciones. El flujo de potencia DC-OPF( $\hat{\delta}^t$ ) asociado a la interdicción, junto a las ecuaciones (11)–(16) es lo que se conoce como el subproblema cuya solución conlleva al valor:  $\hat{P}^t = (\hat{P}^{Gen,t}, \hat{P}^{Line,t}, \hat{\theta}^t, \hat{S}^t)$ , junto con las potencias generadas, flujos de potencia, ángulos de los fasores de tensión y potencias deslastradas; representados por  $\hat{P}^t = (\hat{P}^{Gen,t}, \hat{P}^{Line,t}, \hat{\theta}^t, \hat{S}^t)$ . Este vector está representado por y en la ecuación (1).

#### *Vector de valores*

El vector solución  $\hat{P}^t = (\hat{P}^{Gen,t}, \hat{P}^{Line,t}, \hat{\theta}^t, \hat{S}^t)$  que se obtiene como resultado del subproblema I-DC-OPF( $\hat{\delta}^t$ ) sirve para construir una lista de componentes del sistema no atacados que se ordena respecto a su *atractividad* para las siguientes interdicciones. Para determinar la importancia (*valor*) de cada uno de los componentes del sistema, Salmeron, Wood y Baldick (2003) definen las ecuaciones (20) a (26):

$$F_i^{out,t} = \sum_{l|o(l)=i \wedge P_l^{Line} > 0} \hat{P}_l^{Line,t} + \sum_{l|d(l)=i \wedge P_l^{Line} < 0} |\hat{P}_l^{Line,t}|$$

Flujo total fuera del nodo  $i$  en la iteración  $t$  (20)

$$F_i^{into,t} = \sum_{F_i^{Met,t} = \sum_c (d_{ic} - \hat{S}_{ic}^t)} |\hat{P}_l^{Line,t}| + \sum \hat{P}_l^{Line,t}$$

Flujo total hacia el nodo  $i$  en la iteración  $t$  (21)

$$V_g^{Gen,t} = w^{Gen} \hat{P}_g^{Gen,t}$$

demanda total suplida en el nodo  $i$  en la iteración  $t$  (22)

Valor del generador  $g$  en la iteración  $t$  (23)

$$V_l^{Line,t} = w^{Line} \left( |\hat{P}_l^{Line,t}| + \sum_{l'|(l,l') \text{ en paralelo}} |\hat{P}_{l'}^{Line,t}| \right)$$

Valor de la línea  $l$  en la iteración  $t$  (24)

$$V_i^{Bus,t} = w^{Bus} (F_i^{Met,t} + F_i^{out,t})$$

Valor del nodo  $i$  en la iteración  $t$  (25)

$$V_s^{SE,t} = w^{SE} \sum_{l|l \in L_s} |\hat{P}_l^{Line,t}|$$

Valor de la subestación  $s$  en la iteración  $t$  (26)

En las expresiones (20) a (26), las ponderaciones  $w^{Gen}$ ,  $w^{Bus}$ ,  $w^{Line}$  y  $w^{SE}$  son dadas como datos de entrada para representar los estimativos preliminares de los valores para cada tipo de componente del sistema. En los resultados mostrados en la sección 5 se usan los mismos valores de Salmeron, Wood y Baldick (2003), es decir, 2, 5, 1 y 5, respectivamente.

Desde el punto de vista del atacante, sus recursos de ataque son limitados y, por tanto, es conveniente atacar los componentes que requieran menos recursos. Los recursos requeridos para atacar un generador, línea, nodo o subestación son  $M^{Gen}$ ,  $M^{Line}$ ,  $M^{Bus}$ ,  $M^{SE}$  respectivamente. Este

hecho se tiene en cuenta mediante la inclusión del recurso de ataque en el denominador de cada una de las ecuaciones (27) a (30). Al ser mayor el recurso  $M$  requerido, se reduce el valor  $V$  del componente haciéndolo menos atractivo.

Cada vez que un componente es atacado, el flujo a través de este es nulo, por tanto, en la siguiente iteración no es atractivo para atacar. Para solucionar esto se define el *valor acumulativo* como el promedio de los valores de las iteraciones anteriores cuando el componente no ha sido atacado. Las ecuaciones (27) a (30) definen los valores de los componentes del sistema de potencia:

$$V_g^{Gen,t} = \frac{w^{Gen}}{M_g^{Gen}} \sum_{t'|t' \leq t \wedge \delta_g^{Gen,t'} = 0} \hat{P}_g^{Gen,t}$$

Valor del generador  $g$  en la iteración  $t$  (27)

$$V_l^{Line,t} = \frac{w^{Line}}{M_l^{Line}} \sum_{t'|t' \leq t \wedge \delta_l^{Line,t'} = 0} \left( |\hat{P}_l^{Line,t}| + \sum_{l'|(l,l') \text{ en paralelo}} |\hat{P}_{l'}^{Line,t}| \right)$$

Valor de la línea  $l$  en la iteración  $t$  (28)

$$V_i^{Bus,t} = \frac{w^{Bus}}{M_i^{Bus}} \sum_{t'|t' \leq t \wedge \delta_i^{Bus,t'} = 0} (F_i^{Met,t} + F_i^{out,t})$$

Valor del nodo  $i$  en la iteración  $t$  (29)

$$V_s^{SE,t} = \frac{w^{SE}}{M_s^{SE}} \sum_{t'|t' \leq t \wedge \delta_s^{SE,t'} = 0} \sum_{l|l \in L_s} |\hat{P}_l^{Line,t}|$$

Valor de la subestación  $s$  en la iteración  $t$  (30)



## Problema principal

Como resultado del modelo de interdicción del punto anterior, se obtiene un vector de valores de todos los componentes del sistema

$V^t = [V_g^{Gen,t}, V_l^{Line,t}, V_i^{Bus,t}, V_s^{Sub,t}]$ . Con base en este se plantea el problema principal de maximización de tipo binario  $\{0,1\}$  para la variable  $\delta$ , cuya función objetivo es definida en la ecuación (31):

$$\max_{\delta^{Gen,t}, \delta^{Line,t}, \delta^{Bus,t}, \delta^{SE,t}} \sum_{g \in \Gamma^*} V_g^{Gen,t} \delta_g^{Gen,t} + \sum_{l \in L^*} V_l^{Line,t} \delta_l^{Line,t} + \sum_{i \in I^*} V_i^{Bus,t} \delta_i^{Bus,t} + \sum_{s \in S^*} V_s^{SE,t} \delta_s^{SE,t} \quad (31)$$

Sujeto a las restricciones (32) a (39):

$$\sum_{g \in G^*} M_g^{Gen} \delta_g^{Gen,t} + \sum_{l \in L^*} M_l^{Line} \delta_l^{Line,t} + \sum_{i \in I^*} M_i^{Bus} \delta_i^{Bus,t} + \sum_{s \in S^*} M_s^{SE} \delta_s^{SE,t} \leq M \quad (32)$$

$$\delta_g^{Gen,t} + \delta_i^{Bus,t} \leq 1 \quad \forall g \in G_i^*, \forall i \in I \quad (33)$$

$$\delta_l^{Line,t} + \delta_i^{Bus,t} \leq 1 \quad \forall l \in L_i \cap L^*, \forall i \in I \quad (34)$$

$$\delta_l^{Line,t} + \delta_{l'}^{Line,t} \leq 1 \quad \forall l, l' \in \cap L^* | l, l' \text{ en paralelo} \quad (35)$$

$$\delta_i^{Bus,t} + \delta_s^{SE,t} \leq 1 \quad \forall i \in I_s \cap I^*, \forall s \in S \quad (36)$$

$$\delta_l^{Line,t} + \delta_s^{SE,t} \leq 1 \quad \forall l \in L_s \cap L^*, \forall s \in S \quad (37)$$

$$\delta_s^{SE,t} + \delta_g^{Gen,t} \leq 1 \quad \forall s \in S, \forall g \in G_i^* \quad (38)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{g \in G_i^* | \hat{\delta}_g^{Gen,t'}=1} \delta_g^{Gen,t} + \sum_{l \in L^* | \hat{\delta}_l^{Line,t'}=1} \delta_l^{Line,t} + \sum_{i \in I^* | \hat{\delta}_i^{Bus,t'}=1} \delta_i^{Bus,t} + \sum_{s \in S^* | \hat{\delta}_s^{SE,t'}=1} \delta_s^{SE,t} \leq \\ & \sum_{g \in G_i^* | \hat{\delta}_g^{Gen,t'}=1} \hat{\delta}_g^{Gen,t'} + \sum_{l \in L^* | \hat{\delta}_l^{Line,t'}=1} \hat{\delta}_l^{Line,t'} + \sum_{i \in I^* | \hat{\delta}_i^{Bus,t'}=1} \hat{\delta}_i^{Bus,t'} + \sum_{s \in S^* | \hat{\delta}_s^{SE,t'}=1} \hat{\delta}_s^{SE,t'} \\ & - 1 \end{aligned} \quad (39)$$

$$\forall t' < t$$

Las ecuaciones (33) a (37) tienen respectivamente los siguientes propósitos: atacar un generador o el nodo al cual está conectado, pero no ambos; atacar una línea o el nodo al cual está conectada, pero no ambos; si las líneas están en paralelo, atacar una, no ambas; atacar un nodo o su subestación, no ambos; atacar una línea o la subestación a la cual está conectada, no ambos. Dado

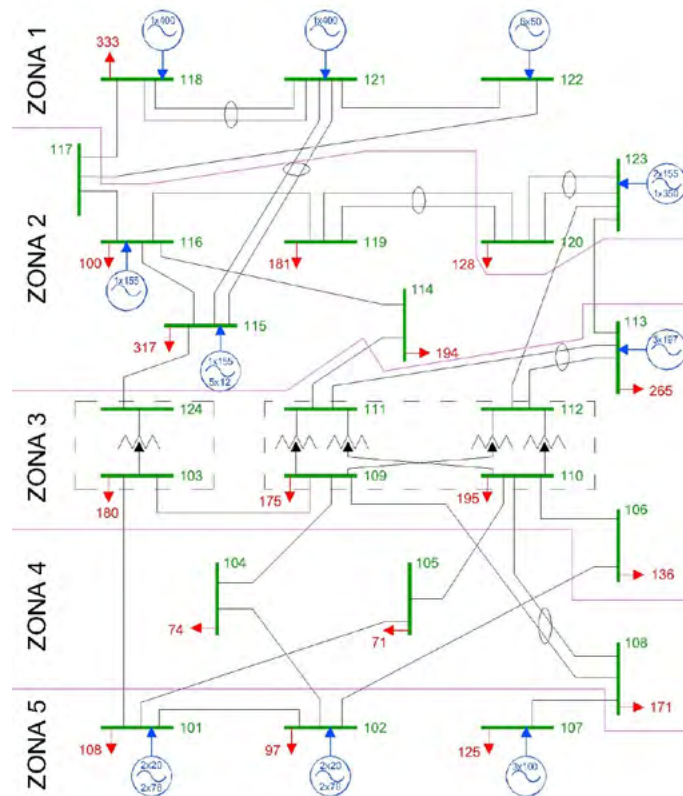
que en la nueva metodología se considera el caso de generadores conectados directamente a las subestaciones, se adicionó la restricción (38), en la cual se ataca la subestación o el generador, pero no ambos. La solución del *problema principal* se expresa como  $\hat{\delta}^t = (\hat{\delta}^{Gen,t}, \hat{\delta}^{Line,t}, \hat{\delta}^{Bus,t}, \hat{\delta}^{SE,t})$  y se utiliza en el subproblema para iniciar una nueva iteración del algoritmo.

## RESULTADOS

La metodología propuesta fue analizada en el mismo sistema de prueba de la metodología VEGA, es decir el sistema de prueba IEEE-RTS-1996 de 24 nodos (RTS Task Force, 1999). No obstante, para establecer diferentes condiciones del entorno se definieron 5 zonas geográficas, como lo muestra la figura 5.

En la tabla 3 se resumen los datos del sistema de potencia de prueba, mostrando la distribución de potencia generada, la potencia demandada, la cantidad de nodos del sistema y la cantidad de líneas de transmisión del sistema, por cada zona.

La tabla 3 muestra que la zona que presenta la mayor potencia generada es la zona 1 con el 52 % del total de la generación del sistema, siguen en su



**Figura 5.** Sistema de potencia IEEE RTS de 24 nodos con 5 zonas para factores del entorno

**Fuente:** elaboración propia, adaptado de Salmeron, Wood y Baldick (2003).

**Tabla 3.** Distribución de potencias, nodos y líneas por zona

	Potencia generada		Potencia demandada		Nodos del sistema		Líneas del sistema	
	(MW)	%	(MW)	%	Cantidad	%	Cantidad	%
Zona 1	1760	52	461	16	5	21	6	16
Zona 2	370	11	792	28	5	21	12	32
Zona 3	591	17	951	33	8	33	10	26
Zona 4	0	0	316	11	3	13	8	21
Zona 5	684	20	330	12	3	13	2	5
Total:	3405	100	2850	100	24	100	38	100

**Fuente:** elaboración propia.

orden las zonas 5, 3 y 2 con el 20 %, 17 % y 11 %, respectivamente. En la zona 4 no existe generación. Se observa además que la mayor potencia demandada se da en la zona 3 con el 33 % de la demanda total del sistema. Siguen en su orden las zonas 2, 1, 5 y 4 con el 28 %, 16 %, 12 % y 11 %, respectivamente.

En la tabla 4 se muestran los resultados de cuatro escenarios iniciales propuestos para probar la metodología, junto con los resultados de originales de la metodología VEGA. Entre la información mostrada en las tablas se encuentra el número de atacantes en cada zona resultado de la aplicación de la metodología, así como el deslastre de carga en MW y en valor porcentual. En primer lugar se presenta el resultado correspondiente a la metodología VEGA el cual no contempla la influencia de factores del entorno geográfico, es decir, el predominio del grupo, la situación política, la exposición geográfica y la protección física de los componentes del sistema. Cuando un calificador lingüístico es mostrado con color verde significa que es la condición menos atractiva para el atacante, dado que los calificadores lingüísticos del entorno (predominio del grupo atacante, situación política en la zona y exposición geográfica del componente) son bajos y la protección física de los componentes es alta. Por otro lado, cuando un calificador lingüístico se muestra con color rojo significa que es la condición más atractiva para el atacante, dado que los calificadores lingüísticos del entorno son altos y la protección física de los componentes es baja. El color amarillo representa el valor medio entre los dos anteriores.

La combinación de factores del entorno utilizado en la metodología propuesta, que arroja el mismo ataque que el proyecto VEGA original, es aquella en la cual la combinación de factores del entorno es la menos atractiva para el atacante (los calificadores lingüísticos se muestran en color verde). Dicha combinación se muestra en el escenario 1 de la tabla 5. En los escenarios 2 a 4 se asumió una combinación de calificadores lingüísticos para la operación del sistema de potencia de

prueba. Entre estos tres escenarios únicamente varía el calificador lingüístico correspondiente a la *protección física* para las zonas 2 y 4. En el escenario 2, esta se deja en alto para la zona 2 y en bajo para la zona 4. En consecuencia, la mayoría del ataque (cinco atacantes) se dirigen a la zona 4 ya que se encuentra con la protección física en bajo. En el escenario 3, la protección física se deja en bajo para la zona 2 y en alto para la zona 4. Como consecuencia de esto la mayoría del ataque (cinco atacantes) se dirigen a la zona 2 ya que se encuentra con la protección física en bajo. En el escenario 4, la protección física se deja en bajo tanto para la zona 2 como para la zona 4. En este caso la metodología podría dirigir el ataque a cualquiera de las dos zonas ya que ambas tienen la protección en bajo. En este caso, la metodología encuentra más atractivo dirigir el ataque a la zona 2 (seis atacantes) ya que allí se provoca el mayor deslastre de carga que es 784 MW.

Las simulaciones en los escenarios señalan que con la metodología propuesta, al incluir información sobre el entorno geográfico de cada zona del sistema de potencia, se obtienen distintos puntos de ataque y, por tanto, distintos valores de deslastre de carga. Esta metodología puede ser usada entonces para coordinar y afinar los planes de seguridad de la infraestructura eléctrica del sistema, teniendo en cuenta que siempre se cuenta con recursos limitados para su protección. Por ejemplo, con la configuración de protección física del escenario 2 tendría solamente 9 % de deslastre de carga, a diferencia del 28 % y 29 % de los escenarios 3 y 4.

Por otra parte, la metodología propuesta puede ser usada para determinar los elementos más críticos del sistema, independientemente del entorno geográfico de cada una de las zonas del sistema de potencia. Es decir, algunos calificadores lingüísticos pueden variar con el tiempo, como por ejemplo, el predominio del grupo atacante en la zona puede variar, así como la situación política en la zona o la protección física de los componentes. Se puede entonces correr varios escenarios para establecer cuáles son los elementos que más presentan

**Tabla 4.** Resultados de las simulaciones para la metodología VEGA y escenarios 1 a 4

Escenario	Zona	Predominio del grupo	Situación política	Exposición geográfica	Protección física	Número atacantes	Deslaste carga (MW)	Deslaste carga (%)
Metodología VEGA	1	-	-	-	-	1	1258	44
	2	-	-	-	-	2		
	3	-	-	-	-	3		
	4	-	-	-	-			
	5	-	-	-	-			
1	1	bajo	bajo	bajo	alto	1	1242	44
	2	bajo	bajo	bajo	alto	2		
	3	bajo	bajo	bajo	alto	3		
	4	bajo	bajo	bajo	alto			
	5	bajo	bajo	bajo	alto			
2	1	alto	bajo	medio	medio		245	9
	2	medio	alto	alto	alto			
	3	bajo	medio	bajo	alto			
	4	medio	alto	alto	bajo	5		
	5	alto	medio	medio	medio	1		
3	1	alto	bajo	medio	medio	1	825	29
	2	medio	alto	alto	bajo	5		
	3	bajo	medio	bajo	bajo			
	4	medio	alto	alto	alto			
	5	alto	medio	medio	medio			
4	1	alto	bajo	medio	medio		784	28
	2	medio	alto	alto	bajo	6		
	3	bajo	medio	bajo	alto			
	4	medio	alto	alto	bajo			
	5	alto	medio	medio	medio			

Fuente: elaboración propia.

ataques sin importar la variación de los calificadores lingüísticos. En la tabla 5 se detalla la cantidad de ataques en cada componente del sistema de potencia para el sistema de prueba usado, considerando 18 escenarios. Allí se observa que el elemento más atacado es la línea de transmisión que se encuentra entre los nodos 112 y 123. Esta línea es estratégica para el sistema ya que conecta un

nodo con alta potencia generada y la subestación 2 que se encuentra en la zona 3. Los siguientes elementos en importancia son las líneas 111-113, 113-123 y 116-117. De esta forma, se puede planear mayor protección para estos elementos identificados como críticos en por recibir más ataques en los escenarios estudiados.

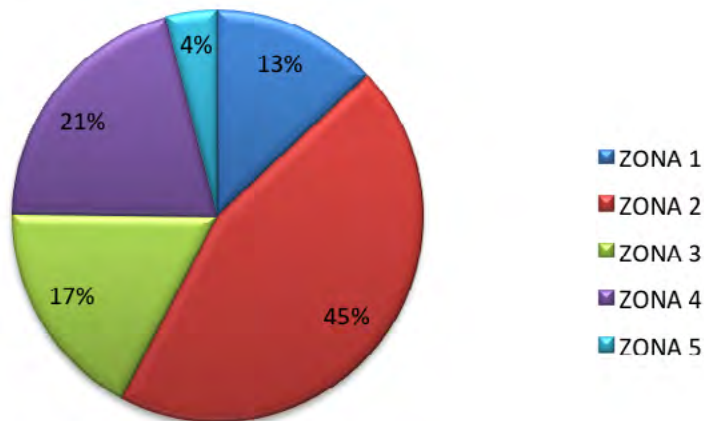
**Tabla 5.** Cantidad de ataques por componente del sistema de potencia para 18 escenarios

Elemento del sistema	Zona	Atacantes requeridos	Cantidad de ataques	% de ataques
Línea 112-123	2	1	16	6,8
Línea 111-113	3	1	14	6,0
Línea 113-123	2	1	14	6,0
Línea 116-117	2	1	14	6,0
Línea 115-121	2	1	13	5,6
Línea 119-120	2	1	12	5,1
Línea 120-123	1	1	12	5,1
Línea 105-110	4	1	10	4,3
Línea 102-104	4	1	9	3,8
Línea 104-109	4	1	9	3,8
Línea 117-122	1	1	9	3,8
Línea 101-103	4	1	8	3,4
Línea 114-116	2	1	7	3,0
Línea 115-124	2	1	7	3,0
Línea 116-119	2	1	7	3,0
Línea 107-108	5	1	6	2,6
Línea 108-109	4	1	6	2,6
Línea 115-116	2	1	6	2,6
Línea 117-118	2	1	6	2,6
Línea 110-112	3	1	5	2,1
Línea 101-105	4	1	4	1,7
Línea 108-110	4	1	4	1,7
Línea 109-112	3	1	4	1,7
Línea 118-121	1	1	4	1,7
Subestación 2	3	3	4	1,7

**Fuente:** elaboración propia.

De igual forma, se puede establecer cuáles son las zonas más críticas del sistema. La figura 5 muestra la distribución de ataques en las distintas zonas del sistema para los 18 escenarios contemplados. Se observa que la zona a la cual van dirigidos la mayor cantidad de recursos de ataque es la zona 2 con un 45 %. Una explicación de este fenómeno se debe a que la zona 2 es el punto

intermedio entre la zona 1, que presenta la mayor potencia generada (52 %), y la zona 3 que posee la mayor potencia demandada (33 %). Otra explicación de este fenómeno es que la zona 2 posee la mayor cantidad de líneas de transmisión (las cuales requieren de un (1) solo atacante para su interdicción), y dicha zona posee 12 líneas que corresponden al 32 % del total de líneas



**Figura 6.** Distribución de ataques por zona en los 18 escenarios contemplados

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 6.** Cambio en los resultados al aumentar la incertidumbre en las variables para cinco escenarios diferentes

Escenario	Zona	Predominio del grupo	Situación política	Exposición geográfica	Protección física	Incertidumbre inicial			Incertidumbre aumentada		
						Número atacantes	Deslaste carga (MW)	Deslaste carga (%)	Número atacantes	Deslaste carga (MW)	Deslaste carga (%)
5	1	alto	alto	alto	bajo	5			2		
	2	bajo	bajo	bajo	alto				1		
	3	bajo	bajo	bajo	alto	1	671	24%	3	771	27%
	4	bajo	bajo	bajo	alto						
	5	bajo	bajo	bajo	alto						
6	1	bajo	bajo	bajo	alto						
	2	alto	alto	alto	bajo	6			5		
	3	bajo	bajo	bajo	alto		697	24%	1	578	20%
	4	bajo	bajo	bajo	alto						
7	1	bajo	bajo	bajo	alto				1		
	2	bajo	bajo	bajo	alto				1		
	3	alto	alto	alto	bajo	6	648	23	4	842	30
	4	bajo	bajo	bajo	alto						
	5	bajo	bajo	bajo	alto						
8	1	bajo	bajo	bajo	alto				1		
	2	bajo	bajo	bajo	alto				1		
	3	bajo	bajo	bajo	alto		145	5	1	242	8
	4	alto	alto	alto	bajo	6			3		
	5	bajo	bajo	bajo	alto						
9	1	bajo	bajo	bajo	alto				2		
	2	bajo	bajo	bajo	alto	1			1		
	3	bajo	bajo	bajo	alto	1	411	14	1	946	33
	4	bajo	bajo	bajo	alto						
	5	alto	alto	alto	bajo	4			2		

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, es de interés conocer la influencia en los resultados del cambio de la incertidumbre en las variables, la cual es modelada con los conjuntos difusos tipo 2. La tabla 6 muestra cinco escenarios donde se calculan los cambios en los resultados al aumentar la incertidumbre sobre los valores de las variables. Nótese que al aumentar la incertidumbre, los ataques óptimos cambian, es decir, se puede tener distintos ataques. No obstante, los valores del deslastre de carga en los casos de incertidumbre aumentada son cercanos (entre 3 % y 19 %) del valor obtenido con los casos de baja incertidumbre.

Por último, en las pruebas realizadas en el sistema de prueba, la metodología no tuvo problemas de convergencia en todos los escenarios planteados, al igual que la metodología original planteada por Salmeron, Wood y Baldick (2004). No obstante, es necesario hacer pruebas de convergencia para sistemas de mayor tamaño (en número de nodos y elementos) para establecer las limitaciones de la metodología planteada.

## CONCLUSIONES

La metodología propuesta permite incorporar factores del entorno geográfico en el análisis de vulnerabilidad de sistemas de potencia, donde se integran en un mismo análisis información de tipo cualitativo como los factores del entorno (predominio del atacante, situación política, exposición geográfica y protección de componentes) y de tipo cuantitativo como los parámetros del sistema de potencia (potencias generadas, demandadas, capacidades, entre otros). Esto hace posible incorporar en el análisis de vulnerabilidad el conocimiento de los expertos en un determinado sistema de potencia. Se propone modelar la incertidumbre asociada con sistemas lógicos difusos tipo 2, debido a que los factores del entorno geográfico provienen de estudios y estimativos de diferente profundidad y detalle.

La metodología se validó usando el sistema de prueba de IEEE RTS-96, al que se le definieron

cinco zonas geográficas. En dicho sistema se mostró que al incluir calificadores lingüísticos para las variables de predominio del grupo atacante, la situación política de la zona, la exposición geográfica de los elementos en la zona, y la protección física de los elementos, el máximo deslastre de carga varía desde 1258 MW en el caso más extremo a 145 MW. Además, la metodología permitió encontrar el componente más crítico del sistema (la línea 112-123), ya que es el elemento que es más veces atacado (16 veces) en los 18 escenarios estudiados. De igual forma, se puede establecer que la zona más crítica del sistema es la zona 2, en la cual se tienen el 45 % de los ataques en los 18 escenarios planteados.

La nueva metodología puede ser implementada en sistemas de potencia reales gracias a la definición de los factores del entorno geográfico y a su flexibilidad para definirlos. Gracias al modelo matemático de la incertidumbre no se requieren estudios detallados y extensos para obtener los datos necesarios para la implementación de la metodología. Para ello, se deben considerar: el conocimiento de los expertos en temas de seguridad y topografía en el sistema en estudio, y la experiencia de los operadores del sistema de potencia.

## FINANCIAMIENTO

Grupo de investigación EMC-UN de la Universidad Nacional de Colombia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agudelo, L.; López-Lezama, J. y Muñoz, N. (2014). Análisis de vulnerabilidad de sistemas de potencia mediante programación binivel. *Información Tecnológica*, 24(3), 103-114.
- Alguacil, N.; Delgadillo, A. y Arroyo, J.M. (2014). A tri-level programming approach for electric grid defense planning. *Computer & Operations Research*, 41, 282-290.

- Arroyo, J. y Galiana, F. (2005). On the solution of the Bilevel Programming Formulation of the Terrorist Threat Problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(2), 789-797.
- Bolaños, R. y Correa, C. (2014). Planeamiento de la transmisión considerando seguridad e incertidumbre en la demanda empleando programación no lineal y técnicas evolutivas. *Tecnura*, 18 (39), 62-76.
- Delgadillo, A.; Arroyo, J. y Alguacil, N. (2010). Analysis of Electric Grid Interdiction With Line Switching. *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(2), 633-641.
- Leal, A.; Sandoval, D. y Cortes, C.A. (2007). Análisis de la metodología VEGA para estudiar la vulnerabilidad del sistema eléctrico de potencia colombiano. En: *Encuentro Regional Iberoamericano del CIGRE-XII ERIAC* (pp. 1-6). Foz de Iguazú: Cigre.
- Mendel, J. (2001). *Uncertain rule-based fuzzy logic system: introduction and new directions*. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR.
- Motto, A.; Arroyo, J. y Galiana, F. (2005). A mixed-integer LP procedure for the analysis of electric grid security under disruptive threat. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(3), 1357-1365.
- Perdomo F., D. (2015). Implicaciones del agotamiento de la reserva de potencia reactiva dinámica de las unidades de generación en la red de potencia. *Tecnura*, 19, 170-175.
- Romero, J. (2005). *Inferencia dinámica de la configuración operativa de la red de distribución de media tensión utilizando información de tiempo real, tiempo real extendido, histórica y conocimiento experto*. Tesis de doctorado. San Juan, Argentina: Universidad Nacional de San Juan.
- RTS Task Force. (1999). The IEEE reliability test system-1996. *IEEE Trans. Power Systems*, 14(3), 1010-1020.
- Salmeron, J.; Wood, K. y Baldick, R. (2003). *Optimizing Electric Grid Design Under Asymmetric Threat*. Monterrey, California: Naval Postgraduate School.
- Salmeron, J.; Wood, K. y Baldick, R. (2004). Analysis of electric grid security under terrorist threat. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(2), 905-912.
- Tranchita, C. (30 de abril de 2008). *Risk assessment for power system security with regard to intentional events*. Tesis de doctorado. Bogota, Colombia: Universidad de los Andes.
- Tranchita, C.; Hadjsaid, N. y Torres, A. (2006). Ranking contingency resulting from terrorism by utilization of Bayesian networks. *IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, MELECON* (págs. 964-967). IEEE.







## Sistema de control domótico de bajo costo: un respaldo a la generación ecológica de energía eléctrica en Colombia

### Low cost home automation system: a support to the ecological electricity generation in Colombia

Elmer Alejandro Parada Prieto<sup>1</sup>, Mario Joaquín Illera Bustos<sup>2</sup>  
Sergio Basilio Sepúlveda Mora<sup>3</sup>, Dinael Guevara Ibarra<sup>4</sup>, Byron Medina Delgado<sup>5</sup>

**Fecha de recepción:** 4 de febrero de 2015

**Fecha de aceptación:** 15 de mayo de 2016

**Cómo citar:** Parada Prieto, E. A., Illera Bustos, M. J., Sepúlveda Mora, S. B., Guevara Ibarra, D., & Medina Delgado, B. (2016). Sistema de control domótico de bajo costo: un respaldo a la generación ecológica de energía eléctrica en Colombia. *Revista Tecnura*, 20(49), 120-132. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.3.a08

#### RESUMEN

**Contexto/objetivo:** En Colombia, el consumo de energía eléctrica residencial representa aproximadamente el 40 % de la demanda nacional, por lo tanto es relevante incursionar en alternativas que reduzcan este consumo. El objetivo de este trabajo fue elaborar un prototipo domótico de control de luminarias de una vivienda para el uso eficiente de la energía.

**Método:** El sistema consta de módulos de control autónomos y un módulo gestor de información; el módulo de control regula las luminarias usando un microcontrolador y un sensor de presencia, e intercambia datos a través de un transceptor de radio frecuencia; el módulo gestor permite el acceso a los módulos de control mediante una interfaz Web. El prototipo fue implementado en una vivienda en la ciudad de San José de Cúcuta, Colombia, por un periodo de sesenta días.

**Resultados:** La aplicación del sistema disminuyó el consumo total de la vivienda en un 3,75 %, con una unidad tipificada de -1,93 obtenida del análisis estadístico.

**Conclusiones:** Se concluye que el prototipo es de bajo costo en comparación con tecnologías similares disponibles en los mercados nacional e internacional, y que reduce el desperdicio de energía eléctrica producto de los hábitos de consumo de los residentes de la vivienda del caso de estudio.

**Financiamiento:** Universidad Francisco de Paula Santander.

**Palabras clave:** Domótica, interfaz Web, microcontrolador, Raspberry Pi.

#### ABSTRACT

**Context/Objective:** In Colombia, consumption of residential electricity accounts for about 40% of the national demand; therefore, alternatives to reduce

- 
- <sup>1</sup> Ingeniero Electrónico. Ingeniero biomédico de la Clínica Medical Duarte. San José de Cúcuta, Colombia. Contacto: [alejandro.parada.024@gmail.com](mailto:alejandro.parada.024@gmail.com)
- <sup>2</sup> Ingeniero Electrónico, ingeniero Instrumentista de Hyundai Engineering Co. San José de Cúcuta, Colombia. Contacto: [mario.illera.b@gmail.com](mailto:mario.illera.b@gmail.com)
- <sup>3</sup> Ingeniero Electrónico, master of Science in Electrical and Computer Engineering. Docente de la Universidad Francisco de Paula Santander. San José de Cúcuta, Colombia. Contacto: [sergio.sepulveda@ufps.edu.co](mailto:sergio.sepulveda@ufps.edu.co)
- <sup>4</sup> Ingeniero Eléctrico, especialista en Teleinformática, magíster en Ingeniería Electrónica, doctor en ingeniería. Docente de la Universidad Francisco de Paula Santander. San José de Cúcuta, Colombia. Contacto: [dinaelgi@ufps.edu.co](mailto:dinaelgi@ufps.edu.co)
- <sup>5</sup> Ingeniero Electrónico, magíster en Ingeniería Electrónica. Docente de la Universidad Francisco de Paula Santander. San José de Cúcuta, Colombia. Contacto: [byronmedina@ufps.edu.co](mailto:byronmedina@ufps.edu.co)

this consumption are needed. The goal of this study was to develop a home automation prototype to control the illumination of a household and to foster the efficient use of energy.

**Method:** The system consists of independent control modules and an information manager module; the control module regulates the luminaires using a microcontroller and a presence sensor, and exchanges data by means of a radio frequency transceiver; the manager module allows the access to the control modules from a Web interface. The prototype was implemented in a household located in the city of San José de Cúcuta, Colombia, during a 60 days period.

**Results:** The operation of the system diminished the total electricity consumption by 3,75 %, with a z-score of -1,93 that was obtained from the statistical analysis.

**Conclusions:** We concluded that the prototype is inexpensive in comparison to similar technologies available in the national and international markets, and it reduces the waste of electrical energy due to the consumption habits of the residents in the case study.

**Keywords:** Home automation, microcontroller, Raspberry Pi, Web interface.

---

## INTRODUCCIÓN

En el sector eléctrico colombiano predomina la generación de energía hidráulica. Gracias a las particularidades de su geografía, como la abundante disponibilidad de fuentes hídricas y el variado relieve, la producción de electricidad en el país es más limpia –en comparación con otros que utilizan gas y petróleo–, con lo cual se mantienen bajas emisiones de gases de efecto invernadero. Aunque esto representa una gran ventaja ecológica, la producción de este tipo de energía es sensible a los cambios climáticos. En épocas de lluvia, cuando los embalses funcionan a toda su capacidad, las hidroeléctricas llegan a cubrir hasta el 80 % de la demanda nacional; sin embargo, en épocas de sequía, esta producción puede verse reducida considerablemente, llegando a aportar solo el 42,9 % de esa generación (UPME, 2015). En estos periodos de baja generación hidráulica, el vacío debe ser cubierto por las termoeléctricas, las cuales, al quemar combustibles fósiles, pueden llegar a liberar todo el volumen de gases nocivos evitado por la generación limpia de energía.

Para reducir este impacto negativo de las épocas de sequía en las emisiones de gases es importante trabajar en mecanismos que logren unir esfuerzos en todos los ámbitos para generar un desarrollo

sostenible del sector desde dos perspectivas diferentes: generación y consumo (Pinzón, Santamaría y Corredor, 2014; Gualteros, Ortiz, Sanabria y Sabogal, 2011). En el área de la generación ya se han realizado estudios que proponen utilizar otros tipos de energía disponibles en temporadas de bajas precipitaciones, como la energía solar (Gonzalez *et al.*, 2012; Hernández, Díaz y Gordillo, 2009; Berrío y Zuluaga, 2014; Hernández, Cortés, Balaguera y Urueña, 2014) y la energía eólica (Caro *et al.*, 2015; Isaac *et al.*, 2010; Amaya, Saavedra y Arango, 2014), para generar energía eléctrica ecológica que respalde a la generación hidráulica.

Con respecto al consumo, en la sociedad colombiana cada vez es mayor la demanda energética por parte de las grandes ciudades, dando lugar a una crisis en este sector (González, Ferro y Tarazona, 2014). Un incremento en la cantidad de habitantes, la construcción de nuevas urbanizaciones y el aumento en el número de aparatos eléctricos en el hogar, producto del gran avance tecnológico de los últimos años, han llevado a que en la última década el consumo residencial sea el destino del 40,6 % de la producción energética total del país, siendo este sector el de mayor participación por encima del industrial y comercial.

Por esta razón, para reducir el consumo eléctrico en el país es necesario desarrollar un plan

de impacto a gran escala, cuyo objetivo sea disminuir, en primera instancia, el consumo por parte del sector residencial. En algunas zonas del país se han comenzado a realizar esfuerzos para buscar alternativas tecnológicas eficaces para afrontar esta problemática (Tapia *et al.*, 2013), pero en ocasiones no son lo suficientemente globales y flexibles para su aplicación (Céspedes, *et al.*, 2012). Gracias al gran avance e impacto de la domótica en la actualidad, se proyecta como uno de los caminos más eficientes para cumplir con este objetivo (Longo, Roscia y Zaninelli, 2015), basado en el desarrollo de sistemas de control de bajo costo que facilitan su implementación en la mayoría de los hogares colombianos (Quintana, Pereira y Vega, 2015), generando no solo un consumo sostenible de la energía sino una conciencia responsable sobre la participación de cada uno de los hogares del país en el tema.

Siendo la red de iluminación uno de los principales focos de desperdicio energético residencial en la actualidad (Carrion, 2013), y basados en previas investigaciones en este ámbito (García, Moctezuma y Villa, 2014); este trabajo presenta un sistema domótico que controla la iluminación de una vivienda, mediante módulos de control autónomos y un módulo gestor de información. El prototipo es escalable, de bajo consumo de energía, de bajo costo, y contribuye con la solución de la problemática energética mencionada. En primer lugar, se muestra la arquitectura del sistema con los distintos componentes y su interacción; posteriormente se presenta una evaluación del sistema en condiciones reales, y por último se plantean las conclusiones.

## METODOLOGÍA

La principal función del sistema domótico es realizar un control eficiente de la red de iluminación de la vivienda, por lo que se hace necesario monitorizar todos los elementos lumínicos de esta. La vivienda utilizada para esta investigación posee seis focos distribuidos en cuatro habitaciones,

una sala y una cocina, por lo que se requiere la implementación de seis módulos de control para evaluar y controlar los hábitos de consumo de sus habitantes.

A pesar de que los sistemas domóticos tradicionales utilizan líneas físicas de conexión, se opta por un protocolo de comunicación inalámbrica para la interacción de los dispositivos entre sí, como lo sugieren Nedelcu *et al.* (2009) y Vera, Barbosa y Pabón (2015). Lo anterior otorga tres características importantes al sistema definidas por Apolloni *et al.* (2010): escalabilidad completa para la integración de nuevos dispositivos, control autónomo para la toma de decisiones y plena operatividad por parte del usuario ante cualquier evento en el hogar. Estas dos últimas, aunque pueden presentarse en sistemas domóticos tradicionales, aumentan su eficiencia con el uso de la tecnología inalámbrica que ofrece mejoras en la transmisión de datos, acceso a lugares en condiciones complejas, bajo costo de implementación y de consumo energético (Nguyen, Nguyen, Kien, Cuong y Nguyen, 2015; Hernández *et al.*, 2010), entre otras muchas ventajas que se pueden explotar en diferentes tipos de aplicaciones (Filho, Ueyama, Faiçal, Guidoni y Villas, 2015; Leal, Albarracín y Ortega, 2009; Claros y Casanova, 2009).

En estas condiciones, una topología óptima para el sistema es una arquitectura distribuida (una de las dos formas de implementación basadas en la ubicación de la inteligencia del sistema), que permite agrupar toda la información en una central de gestión para almacenar y presentar datos que le dan al usuario la capacidad de supervisar y controlar todo el sistema, sin eliminar totalmente la autonomía de los módulos ubicados en las diferentes zonas de control (Herrera, 2005). Cada módulo es capaz de capturar información proveniente de los sensores, analizarla y ejecutar la acción pertinente a través de los actuadores, mientras el elemento central no indique lo contrario. Así, cada parte del sistema trabaja de acuerdo con las necesidades de cada sector, con una dependencia parcial de las

decisiones del usuario. Un diagrama general de la arquitectura del sistema se muestra en la figura 1.

De esta forma, existe un centro de operaciones, o central de gestión de información, con una serie de módulos interconectados inalámbricamente que controlan los focos lumínicos de toda la vivienda; la central de gestión implementa una plataforma de control que funciona como puente entre el usuario y el sistema. Teniendo en cuenta que la interoperabilidad es uno de los principales problemas de los sistemas domóticos en la actualidad, todos los componentes se diseñaron para que se acoplen de la mejor forma posible y darle, como se mencionó, una mejor escalabilidad al sistema en el futuro (Bonino, Castellina y Corno, 2009). A continuación se describe cada uno de los módulos del sistema.

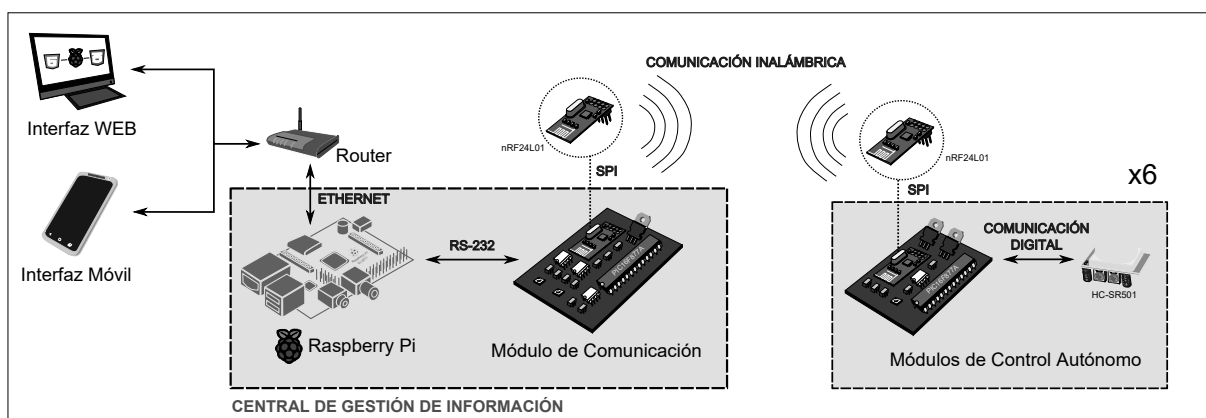
### Módulos de control: diseño del hardware

Para lograr la autonomía de cada módulo de control se integran los siguientes elementos para ejecutar las acciones de monitorización y control:

En primer lugar, un detector de movimiento, el sensor HC-SR501, que emplea un sensor PIR (*passive infrared sensor*) para medir la radiación infrarroja emitida por los objetos en su campo de visión, que permite detectar la presencia de personas a través de los cambios de temperatura en el lugar.

Como segundo elemento se integró un actuador encargado de realizar la acción final de control, en este caso encendiendo o apagando el bombillo de la habitación. El dispositivo escogido para realizar esta función es el triac BT134600 que puede soportar corrientes de hasta 4 A y voltajes de 600 V, características que sobrepasan ampliamente las necesidades eléctricas de los bombillos instalados en la residencia, previniendo de esta manera posibles fallas durante su funcionamiento continuo.

El tercer elemento que conforma cada módulo de control es el módulo de comunicación. Para implementar un canal de comunicación inalámbrica es necesario contar con módulos de radiofrecuencia que soporten el tráfico de datos del sistema. El módulo nRF24L01 es un transceptor inalámbrico que opera a una frecuencia de 2,4 GHz y ofrece una gran flexibilidad de operación, ya que permite utilizar hasta 128 canales diferentes para la comunicación, además de 255 direcciones por cada canal que pueden ser asignadas y configuradas de manera sencilla a través de un microcontrolador mediante la interfaz periférica serial (SPI, *serial peripheral interface*). Este módulo es el encargado de recibir y transmitir datos, desde y hacia la central de gestión ubicada en el módulo central, lo que posibilita, por una parte, recibir las órdenes dadas por el usuario, y por otra, enviar la información del estado del módulo.



**Figura 1.** Arquitectura general del sistema

**Fuente:** elaboración propia.

Por último, para llevar a cabo las funciones de control se seleccionó el microcontrolador PIC-16F877A de microchip. Este dispositivo ofrece un gran número de funciones que se adaptan a las necesidades del módulo de control, como entradas y salidas digitales, interrupciones internas y externas, y un módulo de comunicación SPI. El microcontrolador lleva a cabo varias funciones dentro del circuito, es el encargado de comprobar el estado de la salida digital del sensor, procesar esta información y realizar la acción pertinente a través del actuador. Controla además la comunicación con el módulo de radiofrecuencia a través del protocolo SPI y realiza ajustes en los tiempos de activación del actuador.

### Módulos de control: diseño del firmware

Para que el microcontrolador pueda llevar a cabo las funciones de control y comunicación con el módulo de radiofrecuencia, por medio del protocolo SPI, fue necesario desarrollar un *firmware* que reuniera las instrucciones necesarias para su correcto funcionamiento. Para tal fin se implementaron una serie de funciones que recogen y analizan los datos provenientes del sensor y de la central de gestión de información, y ejecutan la acción pertinente para cada caso.

El microcontrolador evalúa el estado del sensor de movimiento, para encender o apagar la bombilla, de acuerdo con la presencia o no de una persona en su lugar de monitorización. Al detectar movimiento, no solo se enciende la red de iluminación, sino que se inicia un temporizador que almacena su tiempo de activación.

El temporizador posee unos límites de operación, que al alcanzarse ejecutan acciones según el estado del actuador. Si este se encuentra desactivado, este tiempo se acumula en una variable que luego es almacenada como información de las horas, minutos y segundos que ha estado apagado el bombillo. Si el actuador está activado, este tiempo se acumula en una segunda variable similar que lleva el registro del tiempo que el bombillo

ha estado encendido. Se realiza además una comparación con el tiempo límite que debe estar activado el actuador, así, si estos tiempos son iguales, el actuador es desactivado. Si el sensor detecta un movimiento mientras el bombillo está encendido, esta segunda variable es reiniciada.

Por último, los módulos de control instalados en la vivienda son configurados para tener la capacidad de establecer una comunicación *half-duplex* con la central de gestión de información, ya sea para recibir órdenes provenientes del usuario o para transmitir la información de su estado actual, de una forma segura y eficaz para no generar retrasos en las acciones de control.

### Optimización del funcionamiento

Con el fin de prevenir el desperdicio de energía por parte del sistema y mejorar la experiencia de los usuarios, se incorporó en el *firmware* del microcontrolador la capacidad de ajustar automáticamente el tiempo límite que debe estar activado el actuador. De esta manera se evita que el bombillo esté encendido por un tiempo mayor o menor al establecido por las necesidades del usuario.

Esto se logra mediante el análisis del tiempo que transcurre entre movimientos de la persona que ocupa la habitación. Cada vez que se activa el sensor, el microcontrolador empieza a llevar un conteo del tiempo a través de una variable; si un nuevo movimiento es detectado antes de que esta variable llegue al límite permitido, su valor es almacenado en un vector y esta reinicia su cuenta. Este proceso se repite para almacenar un número determinado de datos y cuando el vector se llena se procesa la información guardada. De este procedimiento el módulo obtiene su nuevo límite de tiempo de activación del actuador y se ajusta a esta nueva configuración.

De la lógica de este proceso se puede concluir que el nuevo tiempo límite tiende a ser menor que el inicial, y así se podría llegar a presentar la situación de que sea tan pequeño que el sistema, en lugar de aportar al confort de los usuarios, se convierta

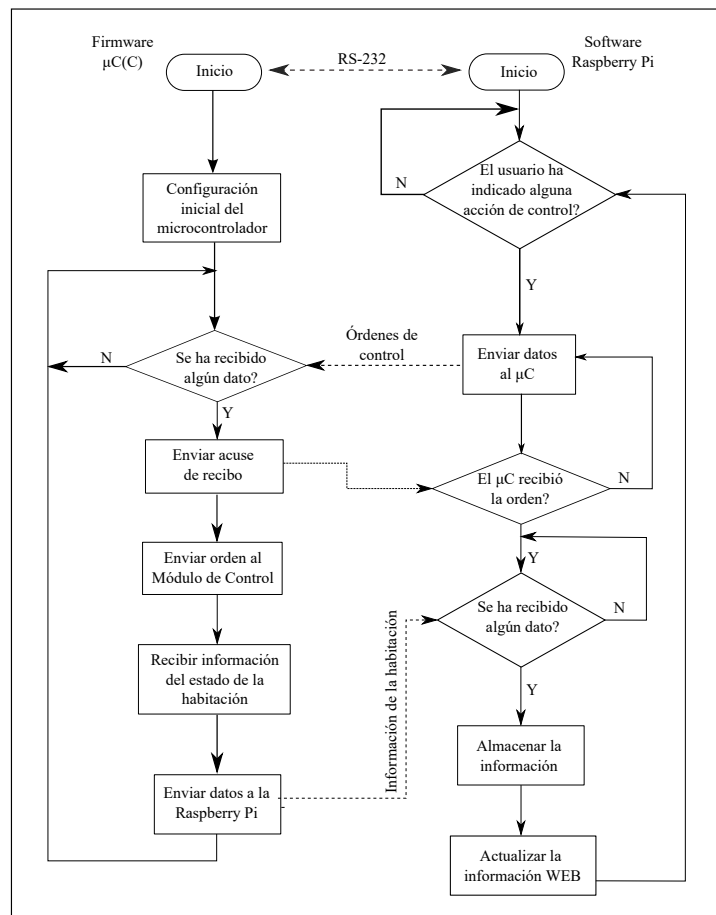
en una molestia al apagar las luces cuando todavía haya alguien en la habitación. Para evitar este inconveniente, el microcontrolador también analiza el tiempo que transcurre entre el apagado automático y la detección de un nuevo movimiento. Si este es lo suficientemente extendido, indica que la persona efectivamente abandonó la habitación y el valor del tiempo límite es el adecuado; por otra parte, si este tiempo es muy corto, indica que la persona continuaba en la habitación y el tiempo límite debería ser mayor al actual. Si esta última situación se repite un determinado número de veces, el módulo de control automáticamente incrementa el límite de tiempo de encendido y se ajusta a esta nueva configuración. Así, el módulo se adapta a los hábitos y costumbres de cada uno de sus usuarios de forma permanente.

### Central de gestión de información

Como se mencionó, a pesar de la autonomía de cada módulo de control, el sistema ofrece al usuario la opción de supervisar y modificar el estado de todos los componentes del sistema en cualquier momento. Por tal razón, a la hora de presentar la información del estado de la vivienda al usuario final, es necesario contar con un equipo servidor que se encargue de realizar dos funciones principales: por una parte, comunicarse con los módulos instalados en las diferentes habitaciones y almacenar los datos recibidos; y por otra, organizar la información en una interfaz para que el usuario pueda acceder a ella de manera sencilla y eficaz. Para lograr estos objetivos, la central de gestión de información integra dos dispositivos: un módulo de comunicación que se encarga de transmitir y recibir información, y un ordenador de placa reducida con la capacidad de alojar un servidor web donde se presentan de manera ordenada e interactiva los datos almacenados. El diagrama de flujo que representa la comunicación entre el módulo de control y el ordenador de placa reducida se muestra en la figura 2.

Con el propósito de implementar una interfaz gráfica para que el usuario acceda fácilmente a los datos y al control del sistema, es necesario analizar las diferentes posibilidades y elegir la más adecuada. Uno de los objetivos de este trabajo es brindar al usuario final la posibilidad de acceder al sistema a través de un *smartphone*. Para lograr esto, hay dos opciones que se pueden implementar: el desarrollo de una aplicación orientada al sistema operativo del *smartphone*, o el desarrollo de una aplicación web (IBM Corporation, 2012). La segunda opción ofrece una gran ventaja y es la portabilidad que adhiere al sistema, ya que al estar alojada en un servidor web, esta puede ser consultada desde cualquier dispositivo con acceso a internet, como ordenadores, tabletas y *smartphones*. La aplicación web fue entonces la opción elegida para implementar la interfaz de usuario, y para alojar el servidor web se escogió una Raspberry Pi, un ordenador de placa reducida de bajo costo que, gracias a sus notables características, ofrece grandes posibilidades a la hora de desarrollar aplicaciones que requieran acceso a través de internet (Computing at School, 2012).

En la Raspberry Pi se configuró el servidor HTTP Apache, un servidor web de código libre, que aloja los archivos necesarios para el correcto funcionamiento de la interfaz web. Esta última ofrece al usuario la posibilidad de controlar de manera interactiva el estado de las luces en el hogar. Para ello implementa llamadas a través de *php*, a programas desarrollados en lenguaje Python para traducir las órdenes y comunicarlas a los módulos de control. La Raspberry Pi se encarga además de activar y desactivar los sensores automáticamente, esto mediante un algoritmo desarrollado en Python en el cual se indica la hora en la que se debe realizar cada acción; cuando se ejecuta el comando para desactivar los sensores, la Raspberry también envía una solicitud a los diferentes módulos para actualizar la información de su estado y esta es almacenada para su posterior visualización por parte del usuario.



**Figura 2.** Algoritmos de control

**Fuente:** elaboración propia.

Para establecer una comunicación estable y segura con los módulos de control se diseñó una tarjeta con la capacidad de transmitir comandos, recibir datos y almacenar la información de manera ordenada. El *hardware* del módulo de comunicación está conformado por dos componentes principales: un módulo de radiofrecuencia nRF24L01 que se emplea para establecer una comunicación inalámbrica *half-duplex* con los módulos de control, y un microcontrolador PIC16F877A que gestiona los diferentes protocolos de comunicación empleados para intercambiar información con el ordenador de placa reducida y el módulo de radiofrecuencia, que almacena y gestiona los datos obtenidos. El intercambio de información entre el microcontrolador y el ordenador de placa

reducida se realiza a través del protocolo serial RS232 (*Recommended Standard 232*), utilizado por su fácil implementación y la confianza que ha mostrado en proyectos similares (Dobrescu, 2014).

### Interfaz web

En la interfaz de usuario se puede observar el estado de los bombillos de cada una de las habitaciones, enviar órdenes para encenderlos o apagarlos, y consultar estadísticas de consumo. Esta aplicación fue desarrollada en HTML (*hypertext markup language*) empleando hojas de estilo en cascada o CSS (*cascading style sheets*) a través de las cuales se pueden modificar características de los elementos que conforman la página entre otras

propiedades que aportan a mejorar su contenido visual. Ahora, para que la aplicación sea realmente útil, debe permitir al usuario interactuar con sus diferentes elementos, para ello es necesario contar con un algoritmo que tenga la capacidad de interpretar las órdenes, procesarlas y ejecutar las acciones indicadas dependiendo del caso. Esto se logra a través de JavaScript, un lenguaje de programación que permite crear algoritmos con gran capacidad para procesar información del entorno web y tomar decisiones (Gauchat, 2012). Estas herramientas dan a la aplicación gran versatilidad y permiten llevar a cabo las funciones de visualización y control requeridas por el sistema domótico.

## RESULTADOS

El objetivo principal de esta investigación era desarrollar un sistema de control domótico con la capacidad de reducir el consumo energético de una vivienda a través de la gestión de su sistema de iluminación. Para evaluar su desempeño, una vez instalado, el sistema fue puesto a prueba por un periodo de 60 días en los cuales se registró de forma diaria el consumo de energía eléctrica de la vivienda para valorar posteriormente su reducción o incremento por el aporte del sistema de control. Las especificaciones de potencia de los módulos de control y la central de gestión de información, se detallan en la tabla 1.

**Tabla 1.** Características de potencia de los dispositivos

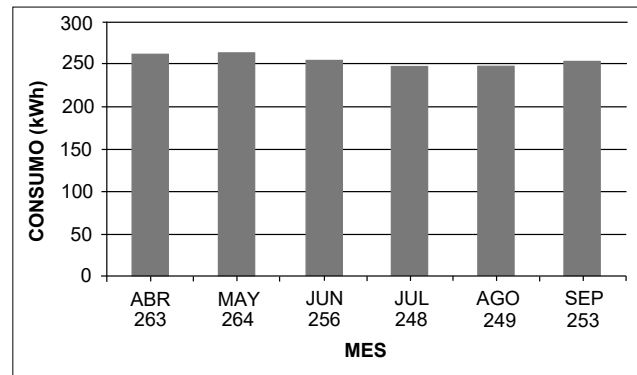
Dispositivo	Características		
	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (W)
Módulo de control	12	10	0,12
Central de gestión	5	560	2,80

**Fuente:** elaboración propia.

Antes de analizar los datos obtenidos se consultó el historial de consumo de la vivienda, tomando como base la información registrada en las

facturas de la empresa que presta el servicio de suministro de energía eléctrica.

La figura 3 ilustra el consumo de la vivienda en kWh para el periodo comprendido entre abril y septiembre de 2015.



**Figura 3.** Consumo de la residencia abril-septiembre de 2015

**Fuente:** elaboración propia.

Con base en la ecuación (1) y los valores de la figura 3 se obtuvo el consumo promedio de la vivienda bajo condiciones normales de 255,5 kWh.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

La prueba del dispositivo se dividió en dos etapas de 30 días cada una, tomando como referencia el periodo analizado en la figura 3, con el fin de obtener una comparación fiable del consumo del sistema. En la primera etapa se registró el consumo de la vivienda con los módulos de control instalados sin la capacidad de ajustar automáticamente el tiempo de encendido del bombillo y sin la central de gestión de información; de este modo, el sistema solo realizaba la acción de control sobre las luces encendiéndolas por un periodo fijo cada vez que el sensor detectaba un movimiento. Para realizar el registro del consumo durante la primera etapa se tomaron lecturas diarias del contador eléctrico instalado en la residencia, realizando un análisis sobre el comportamiento diario de la red.



Para los primeros treinta días de prueba el consumo diario máximo promedio fue de 9,6 kWh registrado el día 7, y el mínimo fue de 7,6 kWh registrado el día 21. El consumo energético total fue de 251,9 kWh con un promedio de 8,4 kWh por día. De los resultados de la primera etapa se puede observar que el consumo se mantuvo por debajo del promedio de los meses anteriores, con una disminución del 1,33 % equivalente a 3,4 kWh, lo cual quiere decir que el funcionamiento continuo del sistema no aporta al gasto eléctrico del hogar, sino que permite mantener un consumo eléctrico estable de la vivienda.

En el segundo periodo de prueba se modificó el *firmware* del sistema para incluir, por una parte, la capacidad de ajustar autónomamente el tiempo de encendido, y por otro lado la central de gestión de información. Para realizar el registro del consumo durante esta segunda etapa, se realizó el mismo proceso aplicado a la primera, ilustrando los resultados en la figura 4, realizando un contraste entre los dos periodos de prueba.

En esta etapa el consumo diario máximo fue de 8,7 kWh registrado el día 10, y el mínimo fue de 7,2 kWh registrado el día 12. El consumo energético total fue de 242,3 kWh con un promedio de 8,08 kWh por día. A partir de la ecuación (2) y de los datos de la figura 4, se determina la variabilidad del consumo de energía eléctrica en la

vivienda antes de implementar el sistema domótico, correspondiente a 6,83 kWh.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

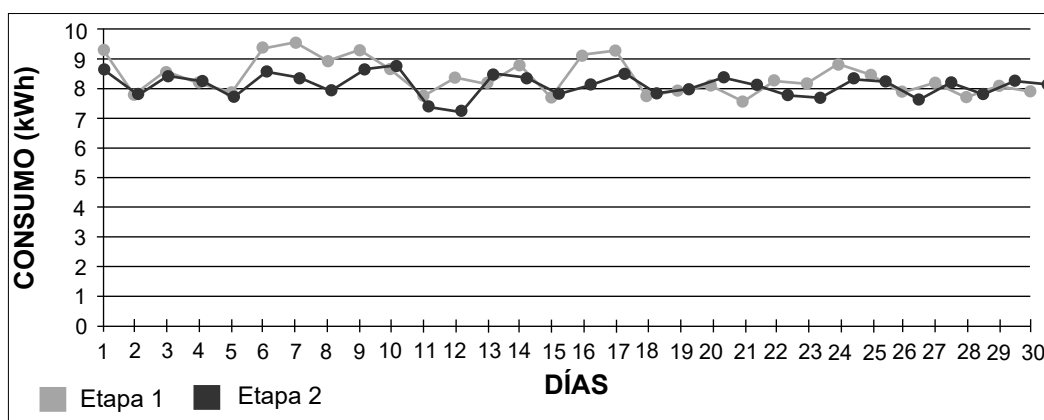
Teniendo en cuenta lo anterior, se puede determinar el número de desviaciones típicas entre los resultados obtenidos con el sistema y el promedio del consumo de la vivienda sin él, por medio de la ecuación (3).

$$Z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \quad (3)$$

$$Z = \frac{242,3kWh - 255,2kWh}{6,83kWh}$$

$$Z = -1,93$$

Esta variable calculada se conoce también como unidad tipificada. Es el número de desviaciones estándar que hay de diferencia entre el consumo con el sistema propuesto y el promedio anterior. El valor de -1,93 permite inferir que la reducción del consumo de energía eléctrica fue significativo y que no se debe a un evento aleatorio. Estos datos demuestran que las mejoras implementadas en el sistema contribuyeron a la disminución del consumo de energía eléctrica en la vivienda, a través de la gestión optimizada de su sistema de iluminación. La tabla 2 resume los resultados de las etapas de prueba realizadas.



**Figura 4.** Consumo eléctrico de la vivienda: etapa 1 vs. etapa 2

**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 2.** Resumen del consumo de la vivienda

Etapa de prueba	Consumo diario (kWh)			Consumo promedio mensual (kWh)	Reducción promedio (kWh)*
	Máx.	Mín.	Promedio		
Etapa 1	9,6	7,6	8,40	251,9	3,4
Etapa 2	8,7	7,2	8,08	242,3	13,2

\*Reducción promedio con respecto al consumo sin el sistema domótico.

**Fuente:** elaboración propia.

Por último, en la tabla 3 se realiza una comparación entre los principales elementos del sistema y algunas tecnologías análogas presentes en el mercado, con precios nacionales (I + D Electrónica, s.f.) e internacionales (eBay, s.f.) como lo indica Hincapie, Duarte y Sepúlveda (2015), donde se puede evidenciar que el sistema domótico presentado en esta investigación puede alcanzar una reducción de costos de entre el 70 y 85 % (variables según los accesorios necesarios para su aplicación) con respecto a sistemas similares, representando así una alternativa de bajo costo para su implementación en diferentes sectores sociales del país.

## CONCLUSIONES

El sistema de control domótico desarrollado tiene la capacidad de reducir el desperdicio de energía eléctrica producto de los hábitos de consumo de las personas que habitan en una vivienda, al realizar el control y gestión de su sistema de iluminación, con un ahorro de cerca del 3,75 % del consumo total, el cual es un valor significativo tomando en cuenta la variabilidad del consumo de meses anteriores ( $\sigma = 6,83$  kWh) y la unidad tipificada del consumo con el sistema domótico ( $z = -1,93$ ).

**Tabla 3.** Comparación de precios para diferentes dispositivos

	Dispositivo	Mercado nacional (COP)	Mercado internacional (USD)*	Porcentaje de ahorro aprox. (COP)
Dispositivos de comunicación inalámbrica	nRF24L01	27.000	3,15	70 – 80 %
	Zigbee Xbee S2	100.000	33,82	
	GSM/GPRS shield Arduino M95	150.000	25	
Dispositivos de control y procesamiento de datos	Microcontrolador PIC-16F877A	15.000	2,35	80 – 85 %
	Arduino Uno R3	70.000	7,35	
	Netduino	100.000	60,29	
Servidores	Raspberry Pi	150.000	38,82	80 %
	FPGA Nexys 3	780.000	250	
	Ordenador personal	700.000	230	

\*Los precios pueden variar de acuerdo al proceso de importación del equipo.

**Fuente:** elaboración propia.

La arquitectura híbrida empleada en el diseño del prototipo da como resultado un sistema de bajo costo, en comparación con tecnologías similares disponibles en los mercados nacional e internacional; además, el sistema es fácil de implementar en diferentes niveles económicos del país, con una gran escalabilidad para la incorporación de nuevos módulos de control sin necesidad de implementar grandes modificaciones en la estructura del sistema, ni en la vivienda donde está instalado.

La capacidad de configuración autónoma de los módulos de control para ajustar los tiempos de encendido de las luminarias, otorga al sistema gran flexibilidad para adaptarse a las necesidades de consumo que tengan los usuarios. Este proceso a su vez optimiza la gestión del consumo de energía al prevenir los desperdicios que pueda generar el funcionamiento continuo del sistema.

Con base en la apreciación de los residentes de la vivienda del caso de estudio, la experiencia de interactuar con el sistema de control domótico generó un impacto social y ambiental, porque creó conciencia en ellos sobre la importancia de consumir responsablemente la energía eléctrica necesaria para sus actividades diarias.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amaya M., P.A.; Saavedra M., A.J. y Arango Z., E.I. (2014). A statistical analysis of wind speed distribution models in the Aburrá Valley, Colombia. *CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro*, 5(5), 121-136.
- Apolloni, B.; Bassis, S.; Galliani, G.L. y Valerio, L. (2010). Wireless Domotic: An Enabling Platform for Granular Intelligence. En: *2010 5th International Conference on Future Information Technology (FutureTech)* (pp. 1-6). Busan, Corea del Sur. doi: 10.1109/FUTURETECH.2010.5482697
- Berrío, L.H. y Zuluaga, C. (2014). Smart Grid y la energía solar fotovoltaica para la generación distribuida: una revisión en el contexto energético mundial. *Ingeniería y Desarrollo*, 32(2), 369-396. doi: 10.14482/inde.32.2.4957
- Bonino, D.; Castellina, E. y Corno, F. (2009). Automatic domotic device interoperation. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 55(2), 499-506. doi: 10.1109/TCE.2009.5174413
- Caro, M.; Fonseca, J.; Jiménez, B.; Rodríguez, R. y Zapata, H. (2015). Integration of wind power plants into the Colombian power system. En: *2015 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM)* (pp. 264-269). Montevideo, Uruguay. doi: 10.1109/ISGT-LA.2015.7381165
- Carrion, D. (2013). Energy saving model through lighting management systems for residences. En *2013 Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)* (pp. 1-6). Bogotá, Colombia. doi: 10.1109/PEPQA.2013.6614955
- Céspedes, R.; León, R.A.; Salazar, H.; Ruiz, M.E.; Hidalgo, R. y Mejía, D. (2012). An appraisal of the challenges and opportunities for the Colombia Intelligent Program implementation. En: *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting* (pp. 1-6). San Diego, Estados Unidos. doi: 10.1109/PESGM.2012.6345383
- Claros L., R. y Casanova A., J.A. (2009). Sistema inalámbrico de adquisición de vibraciones orientado a la detección de movimientos sísmicos con tecnología Zigbee. *ITECKNE*, 6(1), 20-28. doi: 10.15332/iteckne.v6i1.292
- Computing at School (diciembre de 2012). *The Raspberry Pi Education Manual*. Recuperado de: [http://pi.cs.man.ac.uk/download/Raspberry\\_Pi\\_Education\\_Manual.pdf](http://pi.cs.man.ac.uk/download/Raspberry_Pi_Education_Manual.pdf)
- Dobrescu, L. (2014). Domotic embedded system. *2014 6th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)* (pp. 55-58). Bucarest, Rumania. doi: 10.1109/ECAI.2014.7090180
- eBay. (s.f.). Digilent Nexys 3 FPGA Board, Netduino Plus, Raspberry pi board. Recuperado de: <http://www.ebay.com/>
- Filho, G.P.R.; Ueyama, J.; Faiçal, B.S.; Guidoni, D.L. y Villas, L. A. (2015). ResiDI: An Intelligent Decision Platform for Residential Infrastructure Using Wireless Sensors and Actuators. *2015 XXXIII Brazilian Symposium on Computer Networks and*

- Distributed Systems (SBRC)* (pp. 237-245). Victoria, Brasil. doi: 10.1109/SBRC.2015.36
- García G., J.; Moctezuma M., E.O. y Villa L., F.H. (2014). FPGA implementation of a smart home lighting control system. En *2014 IEEE Fourth International Conference on Consumer Electronics Berlin (ICCE-Berlin)* (pp. 419-420). Berlín, Alemania. doi: 10.1109/ICCE-Berlin.2014.7034320
- Gauchat, J. (2012). *El gran libro de HTML5, CSS3 y Javascript*. Barcelona, España: Macompo.
- Gonzalez, D.; Ramos P., C.A.; Saavedra M., A.J.; Arango Z., E.I. y Carrejo, C.E. (2012). Modeling and control of grid connected photovoltaic systems. *Revista de Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 62, 145-156.
- González B., R.A.; Ferro E., R. y Tarazona B, G. (2014). Development of a uml framework for smart cities with forecasting electrical consumption in Colombia. *Revista Tecnura*, 18(Edición especial doctorado), 109-123. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.DSE1.a10
- Gualteros, M.; Ortiz, D.; Sanabria, S. y Sabogal, J. (2011). Possibilities for CDM project implementation in the framework of the usage of renewable energy in Colombia: An evolutionary approach. En: *2011 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America)* (pp. 1-5). Medellín, Colombia. doi: 10.1109/ISGT-LA.2011.6083204
- Hernández, J.; Díaz, N.L. y Gordillo, G. (2009). Design-dimensioning model for grid-connected photovoltaic systems. En: *2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC)* (pp. 1-5). Montreal, Canadá. doi: 10.1109/EPEC.2009.5420962
- Hernández M., J.A.; Cortés B., A.F.; Balaguera C., D.A. y Urueña S., M.A. (2014). Aplicación de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red: estado del arte. *Revista Tecnura*(Edición especial), 157-172. doi: 0.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.SE1.a12
- Hernández O., J.M.; Inzunza G., E.; Olgún T., J.E.; Soarez L., J.J.; Rousseau F., P.A. y Camargo W., C. (2010). Protocolo MAC aplicado a 802.15.4 eficiente en el consumo de energía. *Ingeniería e investigación*, 30(1), 71-74.
- Herrera Q., L.F. (2005). Viviendas inteligentes (Domótica). *Revista Ingeniería e Investigación*, 25(2), 47-53.
- Hincapie, D. M.; Duarte, G.G. y Sepúlveda, S.B. (2015). Low-cost and Reliable Wireless Communication System for Monitoring a Photovoltaic Source. En: *2015 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)* (pp. 1-5). Popayán, Colombia. doi: 10.1109/ColComCon.2015.7152088
- I + D Electrónica (s.f.). *Arduino Uno R3, PIC16F877A, Raspberry Pi*. Recuperado de: <http://www.didacticaelectronicas.com/>
- IBM Corporation (abril de 2012). *El desarrollo de aplicaciones móviles nativas, web o híbridas*. Recuperado de: [ftp://ftp.software.ibm.com/la/documents/gb/commons/27754\\_IBM\\_WP\\_Native\\_Web\\_or\\_hybrid\\_2846853.pdf](ftp://ftp.software.ibm.com/la/documents/gb/commons/27754_IBM_WP_Native_Web_or_hybrid_2846853.pdf)
- Isaac, I.; González, J.; Areiza, J.; Biechl, H.; Cardona, H. y Lopez, G. (2010). Large scale integration of wind energy in Colombia: Electrical analysis-part I. En: *2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA)* (pp. 231-238). Sao Paulo, Brasil. doi: 10.1109/TDC-LA.2010.5762887
- Leal G., J.L.; Albarracín, J.A. y Ortega B., H. (2009). Sistema de monitoreo SAS BEE – Un caso de integración y aplicación de nuevas tecnologías. *ITECKNE*, 6(2), 36-43.
- Longo, M.; Roscia, M.C. y Zaninelli, D. (2015). Net zero energy of smart house design. En: *2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)* (pp. 548-554). Taormina, Italia. doi: 10.1109/ICCEP.2015.7177544
- Nedelcu, A.V.; Sandu, F.; Machedon P., M.M.; Alexandru, M. y Ogrutan, P. (2009). Wireless-based remote monitoring and control of intelligent buildings. En: *IEEE International Workshop on Robotic and Sensors Environments* (pp. 47-52). Lecco, Italia. doi: 10.1109/ROSE.2009.5355999
- Nguyen, L.L.; Nguyen, M.T.; Kien, M.T.; Cuong, L.Q. y Nguyen, T.D. (2015). On the design of wireless access smart grid network on 868 MHz frequency band. En: *2015 2nd National Foundation for Science and Technology Development Conference*

on *Information and Computer Science (NICS)* (pp. 110-114). Ho Chi Minh City, Vietnam. doi: 10.1109/NICS.2015.7302173

Pinzón C., J.D.; Santamaría P., F. y Corredor R., A. (2014). Uso racional y eficiente de la energía en edificios públicos en Colombia. *Revista Científica*, 19, 93-103.

Quintana, B.; Pereira, V. y Vega, C. (2015). El factor para dignificar espacios de vivienda social se encuentra en la Domótica1. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 9(17), 81-89.

Tapia, A.; Bernal, C.; Rodríguez, G.; Soto, J.D. y Candelero, J.E. (2013). Energy efficiency and environmental impact of small markets in Barranquilla-Colombia. En: *2013 12th International Conference on*

*Environment and Electrical Engineering (EEEIC)* (pp. 77-81). Wroclaw, Polonia. doi: 10.1109/EEEIC.2013.6549593

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (2015). *Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano – marzo de 2015*. Recuperado en febrero de 2016, de: [http://www.siel.gov.co/portals/0/generacion/2015/Seguimiento\\_Variables\\_Marzo\\_2015.pdf](http://www.siel.gov.co/portals/0/generacion/2015/Seguimiento_Variables_Marzo_2015.pdf)

Vera R., C.A.; Barbosa J., J.E. y Pabón G., D.C. (2015). Parámetros de configuración en módulos XBEE-PRO S2B ZB para medición de variables ambientales. *Revista Tecnura*, 19(45), 141-157. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a11





## Técnicas inteligentes en la asignación de espectro dinámica para redes inalámbricas cognitivas

### Smart techniques in the dynamic spectrum allocation for cognitive wireless networks

Camila Salgado<sup>1</sup>, Hans Márquez<sup>2</sup>, Víctor Gómez<sup>3</sup>

**Fecha de recepción:** 28 de noviembre de 2015

**Fecha de aceptación:** 15 de mayo de 2016

**Cómo citar:** Salgado, C., Marquez, H., & Gomez, V. (2016). Técnicas inteligentes en la asignación de espectro dinámica para redes inalámbricas cognitivas. *Revista Tecnura*, 20(49), 135-153. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.3.a09

#### RESUMEN

**Objetivo:** El objetivo de este trabajo es estudiar las aplicaciones de las diferentes técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje autónomo en la asignación dinámica de espectro para redes inalámbricas cognitivas, es especial las distribuidas.

**Método:** El desarrollo del presente trabajo se realizó a través del estudio y análisis de algunas de las publicaciones más relevantes en la literatura actual por medio de la búsqueda en revistas internacionales indexadas en ISI y Scopus.

**Resultados:** Se determinaron las técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje autónomo más relevantes y con mayor aplicación en la asignación de espectro para redes inalámbricas cognitivas.

**Conclusiones:** La implementación de una técnica o del conjunto de las mismas depende de las necesidades en procesamiento de la señal, compensaciones en los tiempos de respuesta, disponibilidad de las muestras, capacidad de almacenamiento, capacidad de aprendizaje, robustez, entre otras.

**Palabras Clave:** aprendizaje autónomo, asignación dinámica de espectro, inteligencia artificial, radio cognitivas, redes inalámbricas.

#### ABSTRACT

**Objective:** The objective of this work is to study the applications of different techniques of artificial intelligence and autonomous learning in the dynamic allocation of spectrum for cognitive wireless networks, especially the distributed ones.

**Method:** The development of this work was done through the study and analysis of some of the most relevant publications in current literature through the search in indexed international journals in ISI and Scopus.

**Results:** the most relevant techniques of artificial intelligence and autonomous learning were determined. Also, the ones with more applicability in the allocation of spectrum for cognitive wireless networks were determined, too. .

<sup>1</sup> Ingeniera Electrónica y de Telecomunicaciones, magíster en Ciencia de la Información y las Comunicaciones. Docente Universidad ECCI. Bogotá, Colombia. Contacto: [lsalgadof@ecc.edu.co](mailto:lsalgadof@ecc.edu.co)

<sup>2</sup> Ingeniero Electrónico, magíster en Ciencia de la Información y las Comunicaciones. Analista de automatización ICFES, Bogotá, Colombia. Contacto: [Hmarquez@contratista.icfes.gov.co](mailto:Hmarquez@contratista.icfes.gov.co)

<sup>3</sup> Ingeniero Electrónico, especialista en Gestión de Proyectos en Ingeniería. Coordinador técnico certificación de producto Schneider Electric. Colombia. Bogotá, Colombia. Contacto: [victor.gomez@schneider-electric.com](mailto:victor.gomez@schneider-electric.com)

**Conclusions:** The implementation of a technique, or set of them, depends on the needs in signal processing, compensation in response times, sample availability, storage capacity, learning ability and robustness, among others.

**Keywords:** machine learning, dynamic spectrum access, artificial intelligent, cognitive radio, wireless networks.

## INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento de los nuevos servicios móviles, la prevista escasez del espectro radioeléctrico y su amplia subutilización han motivado el uso del modelo de acceso dinámico al espectro (DSA) (Haykin, 2005) y su principio se basa en un conjunto de técnicas soportadas en las teorías de la información y las telecomunicaciones. Así pues, el concepto DSA comprende los campos de acción como: los principios de optimización, la inteligencia artificial, el aprendizaje automático, entre otras (Xenakis, Passas y Merakos, 2014).

En radio cognitiva (CR), DSA incrementa la eficiencia espectral del sistema, permitiendo que los usuarios no licenciados, o usuarios cognitivos (CU), puedan utilizar las bandas del espectro espacio-temporalmente infrautilizadas bajo el precedente de ser transparente a los licenciados, o usuarios primarios (PU) (Xenakis, Passas y Merakos, 2014). La disponibilidad de un canal de transmisión está definida como la probabilidad de que un canal licenciado se encuentre disponible y pueda ser utilizado por un CU. Esta disponibilidad es un parámetro clave para el efectivo diseño de estrategias de selección de canales de comunicación. (Abdelaziz y ElNainay, 2014; Caleffi, Akyildiz, Paura, 2012; Cacciapuoti, Caleffi, Paura y Rahman, 2015).

Los principales avances en la optimización y en el aprovechamiento del espectro electromagnético para telecomunicaciones han tenido el planteamiento del paradigma de la CR como herramienta principal, cuyo objetivo primordial se enmarca en garantizar que la transmisión y recepción de los datos estén regidas por criterios de eficiencia

y calidad, a partir del precedente del estudio de comportamiento de los usuarios y de los estados de la red para la adaptación y repartición idónea o provechosa del espectro radioeléctrico (Abbas, Nasser y El Ahmad, 2015). En concordancia, las tecnologías de CR son consideradas el candidato perfecto para detallar y analizar el paradigma de la comunicación (Mitola III y Maguire Jr., 1999).

Un reto particular para dar cumplimiento a lo mencionado será emplear las técnicas adecuadas para garantizar la exactitud y la eficiencia en las comunicaciones. Así pues, las ciencias de la información serán la herramienta para el tratamiento y administración de datos, desde el estudio sistemático de los procesos y mediante algoritmos que dan un panorama de la implementación y aplicación a las posibles soluciones a las premisas que abordan la CR (Abbas, Nasser y El Ahmad, 2015).

La mayoría de los avances en investigación en CR han llevado a la sinergia de metodologías y técnicas en las teorías de la información hacia el aprovechamiento del espectro electromagnético. Entre las metodologías, se encuentran las ciencias de la computación. Específicamente, la inteligencia artificial (*artificial intelligence*) y el aprendizaje automático (*machine learning*). En consecuencia, estas áreas de la ciencia han permitido que los campos de acción de la tecnología se extiendan a subáreas del conocimiento, como la lógica difusa, los algoritmos genéticos, las redes neuronales, los modelos de Markov, las máquinas de soporte vectorial, etc. Si bien, la mayoría de técnicas empleadas de las existentes en la actualidad han tenido como principal desafío garantizar la optimización del espacio tiempo del espectro de frecuencias, más aun cuando día a día la demanda y los cambios en los

hábitos de consumo, propenden por la optimización de las técnicas de adaptabilidad (Abbas, Nasser y El Ahmad, 2015).

## TRABAJOS RELACIONADOS

En Hashem, Barakat yAttaAlla (2014) la eficiente distribución de canales para CRN ha de tener estudios y análisis sobre cuáles son las técnicas favorables para optimizar la asignación del espectro. Por tal razón, en el presente documento se detalla una solución a través de los pesos ponderados de cada canal en función de la actividad de los usuarios del sistema. Para ello, se ha considerado una red *ad hoc* para dar una solución específica basada en las entradas de estudio. En ese sentido, la red propuesta posee componentes características que están fundamentadas en el conjunto de nodos de PU y la configuración de nodos de CU. Así, los principales supuestos parten de la necesidad de establecer la *multihop wireless networks* como metodología eficaz que permite brindar mayor cobertura debido a los *multi-hop* y, a su vez, mejorar el rendimiento en los saltos de canales en la cobertura presente en los enlaces de comunicación.

A partir de lo anterior, la investigación detalla la creación de una CRN con la habilidad de clasificar canales en función de sus pesos. Así mismo, la clasificación está en función de la no ocupación de usuarios PU y el número de vecinos CU, empleando los rendimientos de cada canal para finalmente lograr mayor conectividad mediante la selección de bandas del espectro y garantizar disminución en la tasa de error de datos transmitidos. Por último, cabe resaltar que el modelo propuesto ha tenido buenos resultados, en comparación con los métodos tradicionales basados en selección aleatoria (*random channel selections*) y difusión selectiva (*selective broadcast*).

En Del Ser, Matinmikko, Gil-López y Mustonen (2012) se revisa el problema de asignación de canal de espectro donde cada nodo que compone la red se le asigna un canal de frecuencia teniendo en cuenta la optimización de la métrica de

rendimiento de la red y el nivel de interferencia entre nodos cercanos. Aunque los algoritmos genéticos han sido usados para solucionar este problema, sin embargo esta investigación se enfoca en usar para la solución de este problema un algoritmo de búsqueda de armonías heurística (HS) presentando resultados tanto en técnicas de asignación del espectro distribuida como asignación centralizada. Entre estos avances, se presenta un nuevo procedimiento de asignación distribuida de adaptación, lo que disminuye drásticamente la velocidad de transmisión requerida para el intercambio de control de tráfico entre los nodos con una penalización de rendimiento todavía insignificante. Extensos resultados de la simulación ejecutados a través de redes de tamaño creciente muestran que la técnica propuesta logra asignaciones de canales espectrales casi óptimas con baja complejidad computacional. Por otro lado, los resultados de evaluar el algoritmo HS superan ampliamente los algoritmos de asignación genéticamente inspirados. Finalmente, se muestra el enfoque de la asignación distribuida de adaptación propuesto para lograr un ahorro de ancho de banda de tráfico de control de más de 90 %.

En Hasegawa, Hirai, Nagano, Harada y Aihara (2014) se centra en algoritmos de optimización para mejorar el proceso decisorio en el uso de recursos de radio en redes cognitivas inalámbricas heterogéneas. En las redes con manejo centralizado, se propone un nuevo algoritmo de optimización cuya solución se garantiza que sea igual de óptima, para evitar un aumento exponencial de la complejidad computacional en redes inalámbricas en gran escala; por tanto, se modela el problema de optimización como un problema de costo mínimo de flujo y se encuentra una solución del problema en tiempo polinómico. Para las redes de gestión descentralizada, se propone un algoritmo distribuido utilizando la dinámica de minimización de la energía distribuida de la red neuronal Hopfield.

En Ma (2007) se estudia la técnica de acceso espectral distribuida para canales de interferencia



de múltiples bandas sobre redes de radio cognitiva (CRN). Se propone una novedosa técnica de asignación de portadora compartida (SCA) y técnica de asignación exclusiva (ECA), con división de frecuencia ortogonal de acceso múltiple (OFDMA) comparando su rendimiento bajo distintos parámetros del sistema. Basado en SCA se propone un método basado en la relación señal a ruido (SINR), umbral de Carga basado en *waterfilling* (IWF), que mejora la tasa de suma que el método original de IWF. Para ECA se propone un algoritmo de división OFDMA para lograr la equidad proporcional y el rendimiento cercano a lo óptimo. Variando diferentes parámetros como la máscara espectral, SNR, y el nivel de interferencia, se muestra que, con los resultados de la simulación, ECA es preferible frente a SCA en los casos de poca interferencia y para niveles de SNR medios y altos.

En Liu, Feng y Zhang (2012) se propone un nuevo enfoque de la asignación de espectro para CRN distribuidos, tomando en consideración que los sistemas de CR son capaces de detectar las condiciones ambientales reinantes y automáticamente la adaptación de los parámetros de funcionamiento, con el fin de mejorar el sistema y el rendimiento de la red. A partir de las capacidades de CR el enfoque de esta investigación se enfoca en optimizar cada dispositivo inalámbrico individual y sus enlaces de comunicación de un solo salto utilizando la información del ambiente de los dispositivos cercanos dentro de la red inalámbrica. Suponiendo nodos inalámbricos estacionarios, todos los enlaces de comunicación inalámbricos emplean multiplexación por división de frecuencia ortogonal no contigua (NC-OFDM) con el fin de permitir el acceso de espectro dinámico (DSA). El enfoque propuesto intenta reducir al mínimo la tasa de error de bit, minimizar la interferencia fuera de banda (OOB) y maximizar el rendimiento general utilizando una función de adecuación multiobjetivo. Para esto se emplean algoritmos genéticos los cuales se emplean para desarrollar la optimización necesaria.

En Naeem, Anpalagan, Jaseemuddin y Lee (2014) se presenta un estudio de asignación de recursos en CRN cooperativas. Asimismo se discuten los objetivos y protocolos utilizados en la literatura para la asignación de recursos en CRN cooperativa. Se destaca el uso de control de potencia, tipos de cooperación, las configuraciones de red y tipos de decisión utilizados en CRN cooperativa. Los sistemas de comunicación cooperativa, pueden aumentar la velocidad de datos de los sistemas de comunicación inalámbrica con los mismos valores de potencia y ancho de banda en sistemas de comunicaciones inalámbricas. Si la CR toma en cuenta el concepto de comunicación cooperativa esto podría significar un rendimiento mayor en la red inalámbrica.

Saranya, Santhkumar y Ruby (2014) analizan el rendimiento de los algoritmos de selección de canal, SURF y de difusión selectiva (SB) para seleccionar canales distribuidos en CRN. La CR es capaz de identificar las bandas con licencia están siendo infrautilizadas en el espectro y permite la reutilización a los CU, cada vez que el canal esté desocupado. El método de selección de canal distribuido se utiliza para la transferencia de datos en múltiples saltos. De ahí que la relación promedio de entrega se mejora y las interferencias perjudiciales causadas por los nodos de radio primarios se reducen de manera considerable. A través de simulaciones en NS-2 se analizan los resultados y se confirma que SURF prueba ser un método eficaz para la selección de canal.

Por su parte, Rehmani, Viana, Khalife y Fdida (2013) proponen una estrategia de selección de canal inteligente y distribuido para la difusión de datos eficiente en múltiples saltos de red de CR. La estrategia SURF clasifica los canales disponibles y los utiliza de manera eficiente para aumentar la fiabilidad de difusión de datos en las CRN *multi-hop*. La clasificación se realiza desde la no ocupación por parte del usuario principal y el número de vecinos de CR utilizando los canales. A través de extensas simulaciones en NS-2, se estudia el

comportamiento de SURF en comparación con cuatro enfoques relacionados. Los resultados de la simulación confirman que SURF es eficaz en la selección de los mejores canales para una comunicación eficiente y máxima accesibilidad de difusión en las CRN *multi-hop*.

Los autores Bayat, Louie, Li y Vucetic (2011) proponen un algoritmo de acceso al espectro distribuido, enfocado en la retransmisión de redes en radio cognitivo, con múltiples PU y múltiples CU. El eje central del algoritmo propuesto se enfoca en que los PU intercambien con los CU la cantidad de tiempo permitido de acceso en el espectro, de manera que ambos usuarios se encuentren compensados. Dentro del análisis numérico se observa que el algoritmo puede lograr un gran desempeño, comparable al alcanzado por un algoritmo de centralización óptima, y superando al algoritmo de emparejamiento aleatorio. También demuestra la capacidad de lograr, un alto número de intercambios con bajos gastos generales y menor complejidad. Gracias a la reemisión cooperativa, se obtiene una mayor velocidad de la que se lograría sin repetición cooperativa, es decir, en transmisión directa.

Liang, Lai y Halloran (2009) incorporan la idea de realizar una implementación distribuida que se ocupe de la mejor asignación de CU, para la detección de los PU, de manera que la probabilidad de error de detección se reduzca al mínimo. Proponen un algoritmo de eliminación, para encontrar de manera eficiente la mejor asignación; mediante la elaboración de conexión entre el problema actual, y el problema de inferencia en el contexto de modelos probabilísticos.

En Debroy, De y Chatterjee (2014) se realiza el diseño de un protocolo, de contienda, el cual es distribuido para control de acceso al medio (MAC), atendiendo el acceso al canal de los CU. El protocolo MAC propuesto permite un acceso libre de colisiones, para los canales de datos disponibles, y su utilización por los CU. Se resalta la parte de detección del espectro, la cual es aplicada por

los nodos, como sensores exclusivos. También se implementa, la provisión de la reserva de canales libres, por los CU durante periodos prolongados; para aumentar su uso sin causar interferencias perjudiciales en los PU. Estos autores muestran cómo el acceso ampliado a los recursos se puede ajustar para proporcionar una calidad, diferencial del servicio a los CU. Al final, evalúan el desempeño del protocolo mediante una simulación. En condiciones óptimas, el sistema propuesto permite a los CU en la red, utilizar todos los canales disponibles, superando los esquemas existentes MAC en las redes distribuidas.

## APRENDIZAJE EN CRN

Una CR se define como un sistema de comunicación inalámbrica inteligente, que es consciente de su entorno y utiliza la comprensión para aprender del entorno y adaptarse a las variaciones estadísticas en los estímulos de entrada (Haykin, 2005; Bkassiny, Li y Jayaweera, 2013).

Para Michalski (1995), hay tres condiciones principales para la inteligencia: 1) percepción, que es la capacidad de percibir el entorno y los estados internos para adquirir información; 2) aprendizaje, es la capacidad de transformar la información en conocimiento adquirido mediante el uso de metodologías de clasificación y generalización de hipótesis; 3) razonamiento, donde el conocimiento se utiliza para lograr ciertos objetivos (Bkassiny, Li y Jayaweera, 2013).

Como resultado, el aprendizaje está en el núcleo de cualquier dispositivo inteligente, incluyendo, en particular, los CR. Es la herramienta fundamental que permite a un CR adquirir conocimiento a partir de los datos observados.

Ahora bien, la percepción se puede lograr a través de las mediciones de detección del espectro. Esto permite que el CR identifique las actividades en curso de radiofrecuencia (RF) en su ambiente circundante. Después de la adquisición de las observaciones de detección, el CR intenta aprender de

ellos con el fin de clasificar y organizar las observaciones en categorías adecuadas (conocimiento). Por último, la capacidad de razonamiento permite al CR utilizar los conocimientos adquiridos a través del aprendizaje para lograr sus objetivos. Este proceso se llama ciclo-cognición (Mitola III y Maguire Jr., 1999; Bkassiny, Li y Jayaweera, 2013).

En Jayaweera y Christodoulou (2011) para CR autónomas, los *radiobots* pueden aprender de sus acciones anteriores mediante la observación a partir de índices de impacto de los resultados. Los resultados del aprendizaje se utilizan para actualizar la detección (es decir, la observación) y el acceso a los canales, es decir, la decisión, reglas de las aplicaciones DSA (Bkassiny, Jayaweera y Avery, 2011; Chen, Zhao y Swami, 2008; Haykin, 2005; Zhao y Swami, 2007).

### Características únicas de los problemas de aprendizaje de CR

La definición más ampliamente aceptada de CR es una radio que puede detectar y adaptarse a su medio ambiente (Clancy, Hecker, Stuntebeck y Shea, 2007; Haykin, 2005; Jayaweera y Christodoulou, 2011; Mitola, 2000). El término cognitivo implica la conciencia, percepción, razonamiento y el juicio. Como ya se señaló anteriormente, con el fin de CR para derivar el razonamiento y el juicio de la percepción, que debe poseer la capacidad de aprendizaje (Michalski, 1995). El aprendizaje implica que las acciones actuales deben basarse en observaciones pasadas y actuales del medio ambiente (Burbank, Hammons Jr. y Jones, 2008). De este modo, la historia cumple un papel importante en el proceso de aprendizaje de los CR. (Bkassiny, Li y Jayaweera, 2013).

Varios problemas de aprendizaje son específicos de las aplicaciones de CR debido a sus entornos de RF operativo. En primer lugar, debido a las observaciones ruidosas y los errores de detección, CR solo puede obtener observaciones parciales de sus variables de estado. El problema de aprendizaje

es, por consiguiente, equivalente a un proceso de aprendizaje en un entorno parcialmente observable y debe ser tratado en consecuencia.

En segundo lugar, los CR en CRN tratan de aprender y optimizar sus comportamientos simultáneamente. Por tanto, el problema es, naturalmente un proceso de aprendizaje multiagente. Por otra parte, la política de aprendizaje deseado puede fundamentarse ya sea en esquemas cooperativos o no cooperativos y cada CR podría tener el conocimiento total o parcial de las acciones de los otros usuarios cognitivos en la red. En el caso de observabilidad parcial, un CR podría aplicar algoritmos de aprendizaje especiales para estimar las acciones de los demás nodos de la red antes de seleccionar sus acciones apropiadas, como en Bkassiny, Li y Jayaweera (2013) o Claus y Boutilier (1998).

Por último, se desean métodos de aprendizaje autónomo con el fin de permitir a los agentes de la CR aprender por sí solos en un entorno de RF desconocido. En contraste con los usuarios inalámbricos con licencia, se espera que una CR pueda operar en cualquier banda de espectro disponible, en cualquier momento y en cualquier lugar (Jayaweera y Christodoulou, 2011). Por tanto, un CR no puede tener ningún conocimiento previo del entorno de RF de funcionamiento, como los niveles de ruido o interferencia, distribución de ruido o tráfico de usuario. En su lugar, debe poseer algoritmos de aprendizaje autónomo que puedan revelar la naturaleza subyacente del medio ambiente y de sus componentes. Esto hace del aprendizaje no supervisado el candidato perfecto para este tipo de problemas de aprendizaje en aplicaciones de CR (Bkassiny, Li y Jayaweera, 2013).

En resumen, las tres características principales que deben tenerse en cuenta en el diseño de algoritmos de aprendizaje eficaces para CR son:

- Aprender en entornos parcialmente observables.
- Aprendizaje multiagente en CRN distribuidos.
- El aprendizaje autónomo en entornos de RF desconocidos.

## APLICACIONES DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y EL APRENDIZAJE AUTÓNOMO EN CRN

### Teoría de juegos

Esta se utiliza como una herramienta en la toma de decisiones en la que varios jugadores se enfrentan a una serie de situaciones en donde deben tomar medidas que, en la mayoría de los casos, pueden afectar los intereses de los otros. En otras palabras, cada jugador decide sobre sus acciones en función del historial de acciones de los otros jugadores en rondas anteriores del juego. Así pues, la explicación anterior aplica en la CR, en donde cada RC es un jugador y cada acción se encuentra establecida por los parámetros de radio frecuencia del sistema, como: potencia de transmisión, selección de canales, entre otras (Bellhouse, 2007).

*Las aplicaciones de la teoría de juegos para CR*  
Existen varios tipos de juegos que se han adaptado a diferentes situaciones en CRN [98]. Juegos supermodulares se han utilizado para el control de potencia distribuida en Li, Chen, Li y Ma (2007), y Zhang y Zhao (2010), y para la adaptación de velocidad, en Pillutla y Krishnamurthy (2008).

El modelo de juego de Stackelberg se puede utilizar para implementar el comportamiento del RC en el arrendamiento de espectro cooperativo en el que los PU actúan como los juegos líderes y CU como los seguidores (Simeone *et al.*, 2008).

En los juegos de subastas, los jugadores son los compradores que debe seleccionar la estrategia de oferta adecuada con el fin de maximizar su utilidad percibida (es decir, el valor de los artículos adquiridos menos el pago al vendedor). El concepto de *juegos de subastas* ha aplicado con éxito al arrendamiento espectro dinámico de cooperación (DSL) en Jayaweera, Bkassiny y Avery (2011), y Jayaweera y Bkassiny (2011); así como a la asignación de espectro de problemas en Chen, Iellamo, Coupechoux y Godlewski (2010). Los fundamentos de los juegos de subastas y los desafíos abiertos

de la aplicación de juegos de subastas en el campo de la gestión del espectro se discuten en Losifidis y Koutsopoulos (2011).

Juegos estocásticos (o juegos de Markov) se pueden utilizar para modelar el comportamiento codicioso de una CR en un CRN, donde cada CR trata de aprender de su mejor respuesta y así mejorar sus estrategias en el tiempo (Fu y Van der Schaar, 2008).

En particular, el aprendizaje sin pérdida (*learning no-regret*) permite a los jugadores que inician y no están informados adquirir el conocimiento sobre su estado en el entorno del juego repetido (Latifa, Gao y Liu, 2012).

El concepto de *pérdida* se relaciona con el beneficio de un jugador que siente después de tomar una acción en particular. La acción que tenga la menor pérdida se actualiza con los pesos más altos y por tanto se seleccionan con mayor frecuencia (Latifa, gao y Liu, 2012).

El aprendizaje sin pérdida se aplicó en Latifa, Gao y Liu (2012) para permitir a un CR actualizar tanto su potencia de transmisión como las frecuencias de forma simultánea. En Zhu, Han y Başar (2010), se utiliza para detectar los nodos maliciosos en reconocimiento del espectro, mientras que en el aprendizaje sin pérdida se utilizó para lograr un equilibrio correlacionado en el acceso oportuno al espectro de los CR (Han, Pandana y Liu, 2007).

Recientemente, Xu *et al.* (2012) sugirieron una solución de aprendizaje estocástico de teoría de juegos para el acceso al espectro cuando no se conocen los datos a priori o las estadísticas de disponibilidad de canal o el número de CU. El modelo de Xu *et al.* (2012) proporciona una solución alternativa a los esquemas de acceso al espectro propuestos en [9].

### Red neuronal artificial

La primera red neuronal artificial fue presentada por el neurocientífico W. McCulloch y el matemático W. Pits en 1943 para el estudio del cerebro

humano. La idea de la red neuronal artificial (ANN) fue aplicada a modelos computacionales. En otras palabras, se tenía un conjunto de funciones no lineales con parámetros ajustables para dar respuesta a una salida deseada (He *et al.*, 2010). De manera que las redes neuronales podrían interactuar entre la experiencia y el aprendizaje debido al entrenamiento.

Aunque existe una numerable combinación de redes neuronales, en las RC se han implementado cuatro clases con resultados favorables: la primera, *multi-layer linear perceptron networks* (MLPN); la segunda, *nonlinear perceptron networks* (NPN); la tercera, *radial basis function networks* (RBFN), y la cuarta, como una aplicación de ANN en las CR.

#### *Aplicación de las ANN en la CR*

La mayoría de las diferentes combinaciones de las redes neuronales artificiales han sido adoptadas en la detección del espectro para CR (Fehske, Gaedert y Reed, 2005; Zhu, Liu, Weng y Yuan, 2008) como clasificador de señales utilizando la extracción de futuras señales de ciclo estacionario. Por tal razón, el uso de las ANN y la combinación de señales cicloestacionarias garantizan una clasificación estable, eficiente y fiable, reduciendo tiempos de procesamiento mediante la realización de una cantidad representativa de cálculos. No obstante, en Zhu, Liu, Weng y Yuan (2008) se emplea un algoritmo de detección de espectro basado en *wireless mesh networks*. Este último muestra un mejor rendimiento en la precisión y velocidad en comparación a los algoritmos por teoría bayesiana.

Así mismo, en Baldo y Zorzi (2008) se han empleado ANN para caracterizar la comunicación en tiempo real de las RC, con el propósito de medir los tiempos de ejecución que ofrece cierta capacidad de aprendizaje que puede ser explotado por los motores cognitivos. No obstante, en Ustundag y Orcay (2008), y Benidris, Benmammar y Bendimerad (2012) se han empleado ANN para la clasificación de patrones de transmisión.

## **Algoritmos metaheurísticos**

Este tipo de algoritmos es comúnmente empleado para resolver problemas computacionales en donde las entradas principales son definidas por el usuario sobre procedimientos genéricos basados en optimizaciones combinatorias. Por tal razón, son aplicados a complejos problemas computacionales a través de espacios de soluciones (Glover, 1986). Varios algoritmos metaheurísticos son descritos a continuación.

#### *Algoritmos evolutivos*

Su principal campo de acción se encuentra inmerso en la optimización y búsqueda de soluciones, inspirado en la evolución genética y la selección natural de las especies por naturaleza (Goldberg y Holland, 1988).

Los algoritmos evolutivos forman parte de las ciencias de la computación y su principal enfoque está determinado en la inteligencia artificial; siguiendo la terminología de la teoría de la evolución. Así pues, es común encontrar definiciones de los cromosomas y funciones de aptitud como descriptores de un algoritmo genético, en donde los cromosomas son representaciones abstractas de las soluciones candidatas y la función de aptitud está estrechamente relacionada con el objetivo del algoritmo para los procesos de optimización.

Una función ideal de aptitud debe presentarse para un procesamiento rápido, debido a que es importante anticiparse a las que serían varias evaluaciones para producir una sola generación y, de este modo, producir un resultado útil. En concordancia, un algoritmo genético mantiene una población de soluciones candidatas para un problema dado (He *et al.*, 2010), en donde se evalúa la condición física de la población para obtener aquellos individuos que pueden formar una nueva generación o experimentar mutación para seguir aumentando los niveles de aptitud.

### *Simulated annealing (SA)*

Este método está basado en la capacidad probabilística para aproximar un óptimo global de una función dada (Kirkpatrick y Vecchi, 1983). Este método metaheurístico ha sido ampliamente empleado para aproximar una optimización global de un gran espacio de búsqueda. Dicho de otro modo, este enfoque está motivado en el proceso de fundición de la metalurgia, en donde la elevación de la temperatura de una muestra puede reducir o eliminar defectos y lograr la perfecta cristalización del material (He *et al.*, 2010).

En cada caso, este algoritmo considera algunos vecinos de los estados actuales y, en cada paso, el algoritmo SA considera algunos vecinos de los estados actuales y probabilísticamente decide o bien mover el sistema en el estado o permanecer en los estados. Las probabilidades se eligen de modo que el sistema en última instancia, tiende a moverse a estados de menor energía. Normalmente, este paso se repite hasta que el sistema alcanza un estado que es lo suficientemente bueno para la aplicación o hasta que un presupuesto de cálculo en cuestión se ha agotado. El tamaño del espacio de búsqueda local es generalmente una función del nivel actual de energía o, a veces, el tiempo desde el inicio. De esta manera, el algoritmo recorre inicialmente en una amplia área del espacio de búsqueda que contiene buenas soluciones, haciendo caso omiso de pequeñas características de la función de energía, y cuando se mueve hacia las regiones de menor energía, el espacio de búsqueda se hace más estrecho y más estrecho (He *et al.*, 2010).

### *Tabu search (TS)*

Este método se basa en la optimización matemática de técnicas de búsqueda local, mediante el empleo de una estructura de memoria (Niyato y Hossain, 2009). Su principal modo de operación se basa en la búsqueda local o por vecindades en listas de almacenamiento. Así pues, los datos guardados son utilizados de diferentes maneras para guiar los procesos de búsqueda. Por ejemplo, cuando tenemos el proceso de búsqueda en una

región con más soluciones aceptables en donde se selecciona un conjunto de las mismas que se acercan a la necesidad actual.

### *Ant colony optimization (ACO)*

Esta técnica, está inspirada en el comportamiento de las hormigas en la búsqueda de caminos más cortos desde sus colonias a la fuente de alimentos más próxima (Dorigo y Blum, 2005). Los algoritmos desarrollados por las ciencias de la computación detallan la manera probabilista de solucionar problemas a rutas críticas presentes en el flujo continuo que empieza desde el planteamiento de un problema, hasta la obtención de una solución.

La implementación de este tipo de algoritmos ha estimulado la idea original de resolver problemas numéricos a partir de los preceptos de la naturaleza animal, en donde los algoritmos han de seguir los mismos patrones de alcance, adaptabilidad a los cambios y desafíos del entorno. Por consiguiente, los algoritmos por colonias de hormigas combinan la información de historial de eventos para luego crear una estructura de posibles soluciones y así concatenarlas a partir de sucesos anteriores.

### *Application of metaheuristic algorithms to CR*

Entre las principales aplicaciones de los algoritmos metaheurísticos encontramos el uso de técnicas para el aprendizaje con la ayuda de ejemplos de entrenamiento, más aún cuando la relación entre los parámetros y las medidas de rendimiento deseado, no se entienden bien (He *et al.*, 2010).

La optimización en la implementación de este tipo de técnicas es comúnmente empleado dada su alta capacidad para resolver problemas, cuya complejidad multidimensional puede ser abordada de forma autónoma. Por esta razón, los algoritmos genéticos han sido ampliamente adoptados para resolver optimización multiobjetivo y problemas de configuración dinámica en CRN, en respuesta al cambiante entorno inalámbrico de las redes de comunicación (Rondeau, Le, Rieser y Bostian, 2004; Newman *et al.*, 2007; Yong, Hong y Qing, 2009).

Las investigaciones desarrolladas en Rondeau *et al.* (2004) han evidenciado la aplicación de algoritmos genéticos como medio de adaptación de parámetros en la radio definida por *software*, para el entorno de radio comúnmente cambiante. Así mismo, en Newman *et al.* (2007) se plantea diseñar un motor cognitivo basado en algoritmos genéticos para controlar parámetros de radio, de una portadora y multiportadora.

En Hauris (2007) los algoritmos genéticos han sido empleados para adaptar los parámetros de RC en los vehículos autónomos. Estos forman una red inalámbrica dinámica geográficamente variable para la comunicación y el intercambio de información entre los vehículos y la estación base (BS) (He *et al.*, 2010). En otro escenario, Kim *et al.* (2008) plantean el modelo de implementación de un *software* operado por banco de pruebas de RC, con la capacidad de detección del espectro y la adaptabilidad en los motores cognitivos basados en algoritmos genéticos para la optimización de los parámetros de acceso dinámico del espectro.

### Modelo oculto de Markov (HMM)

El modelo oculto de Markov (*hidden Markov model*, HMM) es un modelo estadístico para describir y analizar el comportamiento dinámico de un fenómeno aleatorio complejo (Rabiner, 1989) que puede ser modelado como un proceso de Markov con estados observables y no observables. El HMM genera secuencias de símbolos de observación al hacer transiciones de estado a estado. Sin embargo, los estados están ocultos, y solo la salida es observable. En general, un proceso en el mundo real puede ser expresado como un proceso aleatorio que produce una secuencia de símbolos de observación o parámetros ocultos que generan los observables. Los símbolos o patrones pueden ser discretos o continuos dependiendo de los procesos específicos.

Un HMM por completo se puede especificar en una forma compacta de la forma  $\lambda = (A, B, \pi(1))$ , donde A es un estado de transición de la matriz de probabilidad con dimensiones  $N \times N$ , B es la

matriz probabilística de observación de símbolos  $K \times N$ ,  $\pi(1)$  y la probabilidad de vector de estado inicial tiene la dimensión  $N \times 1$ , N es el número de estados y  $k$  es el número de símbolos de observación distintos por estado.

### Aplicación de HMM en CR

Numerosas aplicaciones de algoritmos por HMM en CR han sido empleadas para construir sistemas específicos en la explicación de la ocurrencia de los símbolos o patrones observados. Este modelo se puede utilizar para identificar las secuencias de observaciones con el mismo patrón mediante la elección del modelo más probable para producir las secuencias observadas. Por tanto, un HMM se puede utilizar como un proceso de observación de motor cognitivo para reconocer o clasificar los estímulos recibidos y poder alcanzar la conciencia. Además, ya que puede reproducir las secuencias de entrenamiento, que puede ser utilizado para la predicción. Además, el aprendizaje se puede lograr mediante la creación de nuevos modelos (He *et al.*, 2010).

Diferentes propuestas han estado inmersas en el aprovechamiento del espectro radio eléctrico tal como de menciona en (Kim *et al.*, 2007), en donde la principal propuesta se basaba en el uso del HMM para procesar la señal ciclo estacionaria de detección de la señal primaria en RC. El método de detección del espectro se fundamenta en que el HMM puede detectar y clasificar las señales de bajo ruido con solo información limitada sobre el ancho de banda de la señal. No obstante, Ghosh, Cordeiro, Agrawal y Rao (2009) validan la existencia de un modelo de la cadena de Markov para la utilización del canal inalámbrico con datos en tiempo real medidos en la banda de paginación para, finalmente, formular el problema de detección de espectro usando un HMM.

### Rule-Based Systems (RBS)

En las ciencias de la computación, es una técnica empleada para manipular el conocimiento e interpretar la información de la mejor forma. Un

ejemplo cercano en la implementación de RBS (Ali, 2012), se puede apreciar en los sistemas expertos que utilizan reglas para hacer deducciones o elecciones. Su principal modo de articular la optimización de resultados tiene en cuenta las afirmaciones expuestas por He *et al.* (2010). La primera indica la lista de reglas permanentes, mientras que la segunda, el motor de inferencia (*inference engine*-IE). Esto hace deducir información o tomarla a partir de las entradas y en las reglas.

### Aplicación de RBS en CR

El razonamiento basado en reglas de motores cognitivos (RBR-CE) ha sido diseñado para la optimización de RC (Reed, 2006; Zhao *et al.*, 2007; Clancy, Kecker, Stuntebeck y Shea, 2007). En consecuencia, numerosas investigaciones han mostrado y evaluado este tipo de técnicas para el estándar IEEE 802.22, cuya utilización ha estado enfocada en la empleabilidad de espacios blancos en el espectro de frecuencia de los canales de TV más específicamente para aplicaciones inalámbricas de red de área rural (WRAN). Es así que la implementación de estas técnicas puede conseguir un rendimiento similar a los motores cognitivos sobre la base de los algoritmos genéticos con una complejidad computacional menor.

### Ontology (OBS)

Ontología es una definición formal de las ciencias de la computación en donde se catalogan variables necesitadas para establecer relaciones entre sí (Guarino, 1998). Como una representación formal, la ontología se convierte en la máquina comprensible, capaz de ser aceptada o compartida en un conjunto de datos útil. De esta manera, la ontología se utiliza para razonar acerca de los atributos del dominio o de interés. Guarino (1998) define las cuatro principales componentes de la ontología. En primer lugar, realizan una categoría de clase cuyos conjuntos de objetos están en el dominio de modelado. En segundo lugar, se presentan los casos en donde los individuos que pertenecen a las clases

estudiadas a través del modelado del dominio. En tercer lugar, la asignación de atributos al detallar las propiedades de los objetos y, en el cuarto lugar, las relaciones o enlaces entre varias entidades.

Las principales ontologías han sido aplicadas para facilitar el procesamiento de máquina. En consecuencia, los numerosos lenguajes de ontologías se han desarrollado desde la Web, debido al alto impacto en la Word Wide Web (He *et al.*, 2010).

### Case-Based System (CBS)

- El razonamiento basado en casos es una técnica de la inteligencia artificial, encargada de solucionar nuevos problemas basados en las soluciones del historial de eventos experimentados por el sistema [69]. En una CBS, una solución al nuevo problema se crea mediante la selección de los casos que son más relevantes para el problema, la reducción a los casos seleccionados a un solo caso, y la adaptación de este caso para amoldarse a la situación actual.
- Los algoritmos CBS son un tipo de programa experto que intenta imitar el comportamiento del ser humano en alguna temática con las mismas características decisorias para resolver problemas dentro de los dominios parcialmente entendidos. Así mismo, este sistema cuenta con la capacidad de proporcionar una explicación única ante los sucesos o decisiones que necesite tomar
- Una de las cuestiones clave de la CBS es que el rendimiento se basa en los casos anteriores. Si estos se han resuelto de forma incorrecta, es posible que los errores se propaguen a nuevos casos con falencias (He *et al.*, 2010). Además, para un dominio complejo en el que el sistema requiere una base de datos numerosa para representar sus características, rellenar y buscar una base de datos de casos específicos, puede llevar mucho tiempo y a veces puede llegar a tornarse compleja. En este caso, la integración con otras técnicas, como las RBS, puede ser necesaria para mejorar el rendimiento y reducir los tiempos de transferencia.



### Aplicación de CBS en CR

La numerosa combinación de estados de tráfico en las redes de comunicación puede ser estudiada para obtener patrones de actividad, modelos de ocupación, asignación de canales, etc. Lo anterior, a partir del historial de eventos de la red. Así, investigaciones recientes han evaluado diversos escenarios de radio y comparado con los algoritmos de optimización multiobjetivo, incluyendo la búsqueda de escala (*hill-climbing search*, HCS) en algoritmos genéticos.

En Le, Rondeau y Bostian (2007) se propone implementar una arquitectura de motor cognitivo junto con las CBR. Así mismo, se discuten las funcionalidades de los bloques de construcción en el ciclo de la cognición y de la búsqueda de sucesos pasados, incluyendo la conciencia medioambiental, el aprendizaje basado en casos, optimización multiobjetivo y la interfaz de *hardware* portátil. También se sugiere la implementación de los bloques de construcción.

### Lógica difusa

La lógica difusa resulta ser una posición relativa desde el observador principal. Sin embargo, las conclusiones de la técnica están respaldadas por métricas iniciales que describen el conjunto de valores admisibles de una muestra. De tal manera, la lógica difusa –aunque con una tasa de estudio aleatoria– permite obtener valores diferentes a los supuestos de verdadero o falso (Gavrilovska, Atanasovski, Macaluso y Da Silva, 2013).

La lógica difusa proporciona al sistema, razonamiento aproximado mediante conjuntos de reglas, con la capacidad de obtener condiciones de incertidumbre mediante la predicción de consecuencias, además de la capacidad de adaptarse a nuevas situaciones (Dadios, 2012).

Diferentes investigaciones (Abbas, Nasser y El Ahmad, 2015; Matinmikko, Del Ser, Rauma y Mustonen, 2013) han aplicado la teoría de lógica difusa en la CR para resolver los problemas en función de la asignación del ancho de banda, estudiando de antemano la interferencia y la

administración de la energía, los anteriores como métodos de evaluación en la correcta asignación del espectro. No obstante, diferentes resultados de estudios han detallado tópicos como la inferencia difusa centralizada, que asigna los anchos de banda correspondientes a la intensidad de tráfico y la prioridad del servicio. Así pues, esta última detalla cómo los CU tienen que presentar solicitudes de ancho de banda al administrador primario de la red (Abba, Nasser y El Ahmad, 2015). Del mismo modo el administrador analiza el tráfico desde la cola y verifica los retardos producidos por la demora en la transmisión de paquetes. En otras palabras se determina la latencia para el acceso a CU.

### Aprendizaje por refuerzo

Este método permite a los agentes *software* aprender de sus estados pasados con el fin de mejorar las acciones y movimientos futuros. La clave de su éxito se basa bajo la técnica de ensayo y error, maximizando la recompensa. Por lo cual, esta técnica consiste en la evaluación de los estados del medio ambiente de estudio, las normas para la transmisión entre estados, las acciones bajo los supuestos, la recompensa inmediata de las reglas de transición y, por último pero no menos importante, las reglas de transición de los agentes de *software* en un entorno dado (Busoniu, Babuska y De Schutter, 2008; Van Otterlo, 2012).

El aprendizaje por refuerzo ha sido incorporado en la CR específicamente en las telecomunicaciones móviles para la reducción de los retrasos de transmisión y para el mejoramiento de la calidad del servicio de los CU. Por esa razón, la investigación desarrollada por Abbas, Nasser y El Ahmad (2015) muestra la capacidad de implementar un sistema de errores y recompensas en función de cada decisión. Así pues, con la implementación de esta técnica, se tendría un óptimo desempeño en la toma de decisiones en la administración del espectro electromagnético. No obstante, la misma investigación detalló el proceso de modelar problemáticas de CR mediante algoritmos de Markov, en donde las

variables principales de estudio serían el costo y el tiempo de las transmisiones de datos.

### Máquinas de soporte vectorial

Las máquinas de soporte vectorial (SVM) son el conjunto de algoritmos que tienen la capacidad de aprender bajo la supervisión de un agente de *software*. Su principal modo de operación está en función de la regresión y la clasificación en el aprendizaje. Esta técnica es utilizada para llegar a márgenes de clasificación en un conjunto de datos (Han, Kamber y Pei, 2011). Por tanto, el principal objetivo de las SVM consiste en establecer un modelo de predicción en donde una entrada incierta puede ser identificada en una categoría u otra.

Una de las principales aplicaciones de esta técnica en CR se atribuye a Han *et al.* (2011), en donde las principales investigaciones objeto de estudio han sido encaminadas a generar algoritmos de clasificación de redes secundarias usadas en detección espectral y toma de decisiones. La clasificación es basada en secuencia de pulsos, extensión de repetición y el procesamiento en la circulación de datos.

Otra investigación interesante, desarrollada por Min Lin, Jian Ouyang (2013) muestra la adaptabilidad de las SVM para la solución de las CR en las áreas *beam-forming*; en donde parámetros importantes como la retrasmisión son estimulados para minimizar la potencia total de la estación base, garantizando en el mismo sentido, una adecuada calidad en el servicio de los PU y CU. No obstante, en las CRN se han empleado numerosos algoritmos SVM para resolver los problemas de optimización de filtrado espacial, por lo que esta última ha sido comúnmente implementada para el procesamiento de señales mediante redes de sensores en los procesos de transmisión y recepción de datos.

### ANÁLISIS DE TÉCNICAS

Las técnicas de inteligencia artificial son el núcleo de la mayoría de los procesos de la CR. Por

esa razón, en los siguientes apartados se presenta un resumen de las técnicas más favorables y cuyo análisis se centra en el aprovechamiento óptimo del espectro para comunicaciones. La tabla 1 describe las ventajas y desafíos de cada técnica.

Las redes neuronales artificiales son simulaciones matemáticas basadas en redes neuronales biológicas, que se utilizan principalmente para la coincidencia de patrones no lineales y modelos estadísticos (He *et al.*, 2010). Son capaces de describir las relaciones complejas entre los conjuntos de datos multidimensionales y tiene la capacidad de ser aprender bajo la ponderación de unos pesos de entrada.

Los algoritmos metaheurísticos de búsqueda no son muy eficientes cuando las reglas deben ser aprendidas de un conjunto de parámetros del sistema. Además, la eficacia de los algoritmos en sí puede ser mejorada mediante la fusión con otros algoritmos en conjunción con el aprendizaje. Por esto, mecanismos como el aprendizaje basado en el conocimiento previo (Mitchell, 1997) son ampliamente implementados como complemento y base de la estructura algorítmica.

El mayor desafío para los algoritmos metaheurísticos radica en la búsqueda de una hipótesis de espacio. Por definición, estas técnicas solo tratan de encontrar las mejores hipótesis desde el espacio de búsqueda y no pueden crear nuevas hipótesis más allá del espacio en donde son comprendidas.

Un enfoque basado en HMM analíticamente puede modelar un proceso estocástico complicado utilizando la secuencia de observación. Tanto la clasificación y la predicción se pueden lograr mediante un HMM. Sin embargo, el desarrollo de un HMM requiere una buena secuencia de entrenamiento, y el proceso de formación puede ser complejo computacionalmente (He *et al.*, 2010). Sin embargo, lo anterior no ha representado un impedimento para generar la articulación con otras técnicas de inteligencia artificial que a su vez han permitido el establecimiento de nuevos modelos (Rondeau, Rieser, Gallagher y Bostian, 2004).

**Tabla 1.** Comparación de diferentes técnicas inteligentes

Algoritmo	Fortalezas	Limitaciones	Opciones
Red neuronal artificial (ANN)	Habilidad para describir multitud de funciones conceptualmente escalables. Excelente para clasificación. Puede identificar nuevos patrones.	El entrenamiento puede ser lento dependiendo del tamaño de la red. Posible necesidad de tener más formación o aprendizaje.	Puede ser utilizada como una técnica de aprendizaje. Puede ser combinada con RBS.
Algoritmos metaheurísticos	Excelente para parámetros de optimización y aprendizaje. Puede usar otras técnicas de aprendizaje.	Formulación de espacios de reglas dificultosas cuando el aprendizaje no es restringido para parámetros de valores.	Puede ser empleado en conjunto con aprendizaje por RBS. Puede ser usado para la búsqueda de procesos.
Modelo oculto de Markov (HMM)	Buena clasificación. Fácilmente escalable. Puede predecir basado en la experiencia.	Requiere buen entrenamiento computacional complejo.	Basado en el conocimiento previo. CBS y RBS pueden ayudar a los HMM a determinar la observación para una específica aplicación y así superar problemas con nuevas aplicaciones.
Sistema basado en normas (RBS)	Implementación simple. Habilidad para establecer reglas futuras.	Reglas de derivación de procesos algo tediosos. Requiere del conocimiento o dominio perfecto que no siempre está disponible.	Puede ser combinado con CBS y OBS para un mejor trato con dominio no familiar.
Ontología (OBS)	Habilidad para deducir lógicamente. Habilidad para entender las capacidades de sí mismo y de otros.	Requiere perfecto dominio del conocimiento ontológico. Baja eficiencia para procesos sofisticados.	Puede ser combinado con CBS y RBS para mejorar eficientemente.
Sistema basado en casos (CBS)	Puede trabajar en situaciones caóticas con muchas variables. Permite rápida adquisición del conocimiento.	Se basa únicamente en el caso anterior. Requiere largos disponibilidad de memoria. Puede incluir irrelevantes patrones.	Puede ser combinado con CBS y RBS para resolver robustos sistemas que no confían únicamente en la experiencia.

**Fuente:** adaptada de He *et al.* (2010).

## CONCLUSIONES

En este trabajo se han revisado varias técnicas de inteligencia artificial que se han supuesto para proporcionar la capacidad de cognición de los motores cognitivos. Así mismo, la revisión bibliográfica detalla que muchas de las implementaciones permanecen rudimentarias tal vez debido a la naturaleza interdisciplinaria de los diferentes campos de actuación que describen la CR. Se muestran las técnicas de inteligencia artificial que han sido experimentadas para dar solución al aprovechamiento del espectro electromagnético

en las áreas de desarrollo de la CR. Las diferentes técnicas han sido empleadas para dar solución a diferentes tópicos, como: viabilidad en la disposición del espectro, consumo de energía, caracterización de canales, políticas locales, requisitos de usuario, disponibilidad en agujeros del espectro, entre otras.

Las técnicas de inteligencia artificial son esencialmente las herramientas principales para la CR. Las ventajas y desventajas en la adopción de una técnica u otra están en función de las necesidades específicas del objetivo o propósito al que se desea llegar.

La implementación de una técnica o del conjunto de estas depende de las necesidades en procesamiento de la señal, compensaciones en los tiempos de respuesta, disponibilidad de las muestras, capacidad de almacenamiento, capacidad de aprendizaje, robustez, entre otras.

Por último, el acceso dinámico al espectro ha recibido mayor importancia en la CR y se podría esperar que a futuro estas no dependan de la inteligencia artificial. Por lo que la mayor ganancia desde las redes de comunicación tendrá la capacidad de soportar una infraestructura reorganizada que pueda continuamente gestionar los elementos de la red, garantizando a su vez mejora en la calidad del servicio de los agentes del sistema. Sin embargo, de la aplicaciones de técnicas de inteligencia artificial deberá ser perfeccionada y ampliado en un proceso metacognitivo.

## FINANCIAMIENTO

Este trabajo es resultado de un proyecto de investigación financiado por la Universidad ECCI a través de la convocatoria interna No. 1 de 2014-2015.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbas, N.; Nasser, Y. y El Ahmad, K. (2015). Recent advances on artificial intelligence and learning techniques in cognitive radio networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 1, 1–20.
- Abdelaziz, S. y ElNainay, M. (2014). Metric-based taxonomy of routing protocols for cognitive radio ad hoc networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 40, 151–163.
- Ali, D.R. (2012). *Scalable Parameter Management using Casebased Reasoning for Cognitive Radio Applications*. Tesis de magíster. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Baldo, N. y Zorzi, M. (2008). Learning and adaptation in cognitive radios using neural networks. In *Consumer Communications and Networking Conference, 2008. CCNC 2008. 5th IEEE* (pp. 998–1003). IEEE.
- Bayat, S.; Louie, R.H.Y.; Li, Y. y Vucetic, B. (2011). Cognitive radio relay networks with multiple primary and secondary users: Distributed stable matching algorithms for spectrum access. *IEEE International Conference on Communications*. <http://doi.org/10.1109/icc.2011.5962935>
- Bellhouse, D. (2007). The problem of Waldegrave. *Electronic Journal for the History of Probability and Statistics*, 3(2), 1–12.
- Benidris, F.Z.; Benmammar, B. y Bendimerad, F.T. (2012). Comparative studies of artificial intelligence techniques in the context of cognitive radio. En: *International Conference on Multimedia Information Processing*. Muaskar, Argelia.
- Bkassiny, M., Jayaweera, S. K., & Avery, K. A. (2011). Distributed Reinforcement Learning based MAC protocols for autonomous cognitive secondary users. In *Wireless and Optical Communications Conference (WOCC), 2011 20th Annual* (pp. 1–6). IEEE.
- Bkassiny, M.; Li, Y. y Jayaweera, S.K. (2013). A survey on machine-learning techniques in cognitive radios. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 15(3), 1136–1159.
- Burbank, J.L.; Hammons Jr., A.R. y Jones, S.D. (2008). A common lexicon and design issues surrounding cognitive radio networks operating in the presence of jamming. In *Military Communications Conference, 2008. MILCOM 2008. IEEE* (pp. 1–7). IEEE.
- Busoni, L.; Babuska, R. y De Schutter, B. (2008). A comprehensive survey of multiagent reinforcement learning. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, 38(2), 156–172.
- Cacciapuoti, A.S.; Caleffi, M.; Paura, L. y Rahman, M.A. (2015). Channel availability for mobile cognitive radio networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 47, 131–136. <http://doi.org/10.1016/j.jnca.2014.10.002>
- Caleffi, M.; Akyildiz, I.F. y Paura, L. (2012). OPERA: Optimal routing metric for cognitive radio ad hoc networks. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 11(8), 2884–2894.
- Chen, L.; Iellamo, S.; Coupechoux, M. y Godlewski, P. (2010). An auction framework for spectrum

- allocation with interference constraint in cognitive radio networks. In *INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE* (pp. 1–9). IEEE.
- Chen, Y.; Zhao, Q. y Swami, A. (2008). Joint design and separation principle for opportunistic spectrum access in the presence of sensing errors. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 54(5), 2053–2071.
- Clancy, C.; Hecker, J.; Stuntebeck, E. y Shea, T.O. (2007). Applications of machine learning to cognitive radio networks. *Wireless Communications, IEEE*, 14(4), 47–52.
- Claus, C. y Boutilier, C. (1998). The dynamics of reinforcement learning in cooperative multiagent systems. En: *American Association for Artificial Intelligence AAI/IAAI* (pp. 746–752).
- Dadios, E.P. (2012). *Fuzzy Logic-Algorithms, Techniques and Implementations*. Croacia: InTech Ltd. <http://doi.org/10.5772/2663>
- Debroy, S.; De, S. y Chatterjee, M. (2014). Contention based multichannel MAC protocol for distributed cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 13(12), 2749–2762. <http://doi.org/10.1109/TMC.2014.2352260>
- Del Ser, J.; Matinmikko, M.; Gil-López, S. y Mustonen, M. (2012). Centralized and distributed spectrum channel assignment in cognitive wireless networks: A Harmony Search approach. *Applied Soft Computing Journal*, 12(2), 921–930. <http://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.10.001>
- Dorigo, M. y Blum, C. (2005). Ant colony optimization theory: A survey. *Theoretical Computer Science*, 344(2), 243–278.
- Fehske, A.; Gaeddert, J. y Reed, J.H. (2005). A new approach to signal classification using spectral correlation and neural networks. En: *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on* (pp. 144–150). IEEE.
- Fu, F. y Van der Schaar, M. (2008). Stochastic game formulation for cognitive radio networks. In *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2008. DySPAN 2008. 3rd IEEE Symposium on* (pp. 1–5). IEEE.
- Gavrilovska, L.; Atanasovski, V.; Macaluso, I. y Da Silva, L. (2013). Learning and reasoning in cognitive radio networks. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 15(4), 1761–1777.
- Ghosh, C.; Cordeiro, C.; Agrawal, D.P. y Rao, M.B. (2009). Markov chain existence and hidden Markov models in spectrum sensing. In *Pervasive Computing and Communications, 2009. PerCom 2009. IEEE International Conference on* (pp. 1–6). IEEE.
- Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & Operations Research*, 13(5), 533–549.
- Goldberg, D.E. y Holland, J.H. (1988). Genetic algorithms and machine learning. *Machine Learning*, 3(2), 95–99.
- Guarino, N. (1998). *Formal ontology in information systems: Proceedings of the first international conference (FOIS'98)*. Trento, Italy (Vol. 46). IOS press.
- Han, J.; Kamber, M. y Pei, J. (2011). *Data mining: concepts and techniques*. Burlington, Massachusetts: Elsevier.
- Han, Z.; Pandana, C. y Liu, K.J. (2007). Distributive opportunistic spectrum access for cognitive radio using correlated equilibrium and no-regret learning. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2007. WCNC 2007. IEEE* (pp. 11–15). IEEE.
- Hasegawa, M.; Hirai, H.; Nagano, K.; Harada, H. y Aihara, K. (2014). Optimization for centralized and decentralized cognitive radio networks. *Proceedings of the IEEE*, 102(4), 574–584. <http://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2306255>
- Hashem, M.; Barakat, S.I. y AttaAlla, M.A. (2014). Distributed channel selection based on channel weight for cognitive radio network. En: *Computer Engineering Conference (ICENCO), 2014 10th International* (pp. 115–120). IEEE.
- Hauris, J. F. (2007). Genetic algorithm optimization in a cognitive radio for autonomous vehicle communications. En: *Computational Intelligence in Robotics and Automation, 2007. CIRA 2007. International Symposium on* (pp. 427–431). IEEE.
- Haykin, S. (2005). Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. *Selected Areas in*

- Communications, IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23(2), 201–220.
- He, A.; Bae, K.K.; Newman, T.R.; Gaeddert, J.; Kim, K.; Menon, R.; ... Reed, J.H. (2010). A survey of artificial intelligence for cognitive radios. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(1-4), 1578–1592.
- Iosifidis, G. y Koutsopoulos, I. (2011). Challenges in auction theory driven spectrum management. *Communications Magazine, IEEE*, 49(8), 128–135.
- Jayaweera, S. y Christodoulou, C. (2011). Radiobots: Architecture, algorithms and realtime reconfigurable antenna designs for autonomous, self-learning future cognitive radios. UNM Technical Report: EECE-TR-11-0001.
- Jayaweera, S. K. y Bkassiny, M. (2011). Learning to thrive in a leasing market: an auctioning framework for distributed dynamic spectrum leasing (d-dsl). En: *IEEE Wireless Communications & Networking Conference (WCNC'2011), Cancún, México*.
- Jayaweera, S.K.; Bkassiny, M. y Avery, K.A. (2011). Asymmetric cooperative communications based spectrum leasing via auctions in cognitive radio networks. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 10(8), 2716–2724.
- Kim, K.; Akbar, I.A.; Bae, K.K.; Um, J.S.; Spooner, C.M. y Reed, J. H. (2007). Cyclostationary approaches to signal detection and classification in cognitive radio. In *New frontiers in dynamic spectrum access networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE international symposium on* (pp. 212–215). IEEE.
- Kim, J.M.; Sohn, S.H.; Han, N.; Zheng, G.; Kim, Y.M. y Lee, J.K. (2008). Cognitive radio software testbed using dual optimization in genetic algorithm. In *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2008. CrownCom 2008. 3rd International Conference on* (pp. 1–6). IEEE.
- Kirkpatrick, S. y Vecchi, M.P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671–680.
- Latifa, B.; Gao, Z. y Liu, S. (2012). No-regret learning for simultaneous power control and channel allocation in cognitive radio networks. En: *Computing, Communications and Applications Conference (ComComAp'12)* (pp. 267–271).
- Le, B.; Rondeau, T.W. y Bostian, C.W. (2007). Cognitive radio realities. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 7(9), 1037–1048.
- Li, J.; Chen, D.; Li, W. y Ma, J. (2007). Multiuser power and channel allocation algorithm in cognitive radio. In *Parallel Processing, 2007. ICPP 2007. International Conference on* (p. 72). IEEE.
- Liang, Y.; Lai, L. y Halloran, J. (2009). Distributed algorithm for collaborative detection in cognitive radio networks. *2009 47th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton)*, 394–399. <http://doi.org/10.1109/ALLERTON.2009.5394792>
- Lin, M.; Ouyang, J. y Zhu, W.P. (diciembre de 2013). BF design in cognitive relay networks via support vector machines. En: *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)* (pp. 3247-3252). IEEE. Atlanta, Georgia, EE. UU.
- Liu, Y.; Feng, Z.Y. y Zhang, P. (2012). Optimized in-band control channel with channel selection scheduling and network coding in distributed cognitive radio networks. *Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 19(2), 48–56. [http://doi.org/10.1016/S1005-8885\(11\)60245-8](http://doi.org/10.1016/S1005-8885(11)60245-8)
- Ma, Y. (2007). Distributed spectral access schemes for cognitive radio networks. *Proceedings-IEEE Military Communications Conference MILCOM*, 1–7. <http://doi.org/10.1109/MILCOM.2007.4454877>
- Matinmikko, M.; Del Ser, J.; Rauma, T. y Mustonen, M. (2013). Fuzzy-Logic Based Framework for Spectrum Availability Assessment in Cognitive Radio Systems. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 31(11), 2173–2184.
- Michalski, R.S. (1995). Learning and Cognition. En: *WOCFAI* (pp. 507–510). Citeseer.
- Mitchell, T.M. (1997). *Machine Learning*. Computer Science Series. Edición internacional. Nueva York: McGraw-Hill.
- Mitola III, J. y Maguire Jr., G.Q. (1999). Cognitive radio: making software radios more personal. *Personal Communications, IEEE*, 6(4), 13-18.
- Mitola, J. (2000). Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio. Ph.D. dissertation. Estocolmo, Suecia: Computer Communication

- System Laboratory, Department of Teleinformatics, Royal Institute of Technology (KTH).
- Naeem, M.; Anpalagan, A.; Jaseemuddin, M. y Lee, D.C. (2014). Resource allocation techniques in cooperative cognitive radio networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 16(2), 729–744. <http://doi.org/10.1109/SURV.2013.102313.00272>
- Newman, T.R., Barker, B.A.; Wyglinski, A.M.; Agah, A.; Evans, J.B. y Minden, G.J. (2007). Cognitive engine implementation for wireless multicarrier transceivers. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 7(9), 1129–1142. <http://doi.org/10.1002/wcm.486>
- Niyato, D. y Hossain, E. (2009). Cognitive radio for next-generation wireless networks: An approach to opportunistic channel selection in IEEE 802.11-based wireless mesh. *Wireless Communications, IEEE*, 16(1).
- Pillutla, L.S. y Krishnamurthy, V. (2008). Game theoretic rate adaptation for spectrum-overlay cognitive radio networks. En: *Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM 2008. IEEE* (pp. 1–5). IEEE.
- Rabiner, L.R. (1989). A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition. *Proceedings of the IEEE*, 77(2), 257–286.
- Reed, J.H. (2006). *Development of a cognitive engine and analysis of WRAN cognitive radio algorithms phase II*. Report Submitted to ETRI, MPRG, Virginia Tech.
- Rehmani, M.H.; Viana, A.C.; Khalife, H. y Fdida, S. (2013). SURF: A distributed channel selection strategy for data dissemination in multi-hop cognitive radio networks. *Computer Communications*, 36(10-11), 1172–1185. <http://doi.org/10.1016/j.comcom.2013.03.005>
- Rondeau, T.W.; Le, B.; Rieser, C.J. y Bostian, C.W. (2004). Cognitive radios with genetic algorithms: Intelligent control of software defined radios. In *Software defined radio forum technical conference* (pp. C3–C8). Citeseer.
- Rondeau, T. W., Rieser, C. J., Gallagher, T. M., & Bostian, C. W. (2004). Online modeling of wireless channels with hidden markov models and channel impulse responses for cognitive radios. In *Microwave Symposium Digest, 2004 IEEE MTT-S International* (Vol. 2, pp. 739–742). IEEE.
- Saranya, N.; Santhkumar, W.E. y Ruby, E.D.K. (2014). A survey on distributed channel selection technique using surf algorithm for information transfer in multi-hop cognitive radio networks. *Proceedings–2014 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence, CSCI 2014, 1*, 96–100. <http://doi.org/10.1109/CSCI.2014.23>
- Simeone, O., Stanojev, I., Savazzi, S., Bar-Ness, Y., Spagnolini, U. y Pickholtz, R. (2008). Spectrum leasing to cooperating secondary ad hoc networks. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 26(1), 203–213.
- Ustundag, B. y Orcay, O. (2008). Pattern based encoding for cognitive communication. In *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2008. CrownCom 2008. 3rd International Conference on* (pp. 1–6). IEEE.
- Van Otterlo, M. (2012). Solving relational and first-order logical markov decision processes: A survey. En: *Reinforcement Learning* (pp. 253–292). Springer.
- Xenakis, D.; Passas, N. y Merakos, L. (2014). Multi-parameter performance analysis for decentralized cognitive radio networks. *Wireless Networks*, 20(4), 787–803.
- Xu, Y.; Wang, J.; Wu, Q.; Anpalagan, A. y Yao, Y.-D. (2012). Opportunistic spectrum access in unknown dynamic environment: A game-theoretic stochastic learning solution. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 11(4), 1380–1391.
- Yong, L.; Hong, J. y Qing, H.Y. (2009). Design of Cognitive Radio Wireless Parameters Based on Multi-objective Immune Genetic Algorithm. In *Communications and Mobile Computing, 2009. CMC'09. WRI International Conference on* (Vol. 1, pp. 92–96). IEEE.
- Zhang, X. y Zhao, J. (2010). Power control based on the asynchronous distributed pricing algorithm in cognitive radios. In *Information Computing and Telecommunications (YC-ICT), 2010 IEEE Youth Conference on* (pp. 69–72). IEEE.

- Zhao, Q. y Swami, A. (2007). *A survey of dynamic spectrum access: signal processing and networking perspectives*. DTIC Document.
- Zhao, Q., Tong, L., & Swami, A. (2005). Decentralized cognitive MAC for dynamic spectrum access. En: *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on* (pp. 224–232). IEEE.
- Zhao, Q., Tong, L., Swami, A., & Chen, Y. (2007). Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: A POMDP framework. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 25(3), 589–599. <http://doi.org/10.1109/JSAC.2007.070409>
- Zhao, Y.; Gaeddert, J.; Morales, L.; Bae, K.; Um, J.S. y Reed, J.H. (2007). Development of radio environment map enabled case-and knowledge-based learning algorithms for IEEE 802.22 WRAN cognitive engines. En: *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2007. CrownCom 2007. 2nd International Conference on* (pp. 44–49). IEEE.
- Zhu, Q.; Han, Z. y Başar, T. (2010). No-regret learning in collaborative spectrum sensing with malicious nodes. In *Communications (ICC), 2010 IEEE International Conference on* (pp. 1–6). IEEE.
- Zhu, X.-L.; Liu, Y.-A.; Weng, W.-W. y Yuan, D.-M. (2008). Channel sensing algorithm based on neural networks for cognitive wireless mesh networks. In *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008. WiCOM'08. 4th International Conference on* (pp. 1–4). IEEE.







## Generación de mapas de ruido (industrial) desde sistemas de información geográfica. Un acercamiento desde la literatura

### Generation of maps of noise (industrial) from geographic information systems. An approach from the literature

Gustavo Andrés Romero Duque<sup>1</sup>, Jairo Acero Calderón<sup>2</sup>, Marcela Jaimes Becerra<sup>3</sup>

**Fecha de recepción:** 28 de febrero de 2014

**Fecha de aceptación:** 15 de mayo de 2016

**Cómo citar:** Romero Duque, G., Calderón Acero, J., & Jaimes Becerra, M. (2016). Generación de mapas de ruido (industrial) desde sistemas de información geográfica. Un acercamiento desde la literatura. *Revista Tecnura*, 20(49), 152-166. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.3.a10

#### RESUMEN

**Contexto:** El ruido en el ámbito laboral, en todo tipo de actividades productivas, representa un peligro y realmente no se ha valorado en su real dimensión. Poco se ha visto que las partes interesadas hayan determinado la urgencia de manejar programas de control del ruido. Por lo tanto, las pérdidas resultantes de los tratamientos médicos y el ausentismo, representados en el cuidado de la salud y servicios sociales, resultan en costos ocultos relacionados con el trabajo que afectan directamente el producto interno bruto en cualquier país.

**Método:** Este artículo recopila diferentes estudios de caso en todo el mundo. Los estudios se dividieron para su revisión en los estudios generales sobre los efectos del ruido de la mano de obra y luego particularizado de acuerdo a los efectos del ruido industrial en la salud de los trabajadores. A un nivel de control, la evaluación y medición del ruido se define mediante el uso de herramientas tales como mapas de ruido y sus respectivas derivaciones, además de bases de datos espaciales.

**Resultados:** De acuerdo a la recopilación de información y el análisis de la misma observamos que a mediano plazo las economías van estar disminuidas en un porcentaje importante debido a las consecuencias generadas por la exposición al ruido. La información específica se encuentra en el desarrollo del artículo.

**Conclusiones:** Los datos aportados por los estudios de caso señalan la necesidad que Colombia, país que no es ajeno a este fenómeno, y que adicionalmente tiene la gran desventaja de no contar con estudios significativos en el campo del análisis de ruido, deberá fortalecer los estudios basados en datos espaciales como mecanismo de medición y control.

**Financiamiento:** Fundación universitaria Los Libertadores.

**Palabras clave:** Mapa de ruido, Ruido, Sistema de información geográfica.

#### ABSTRACT

The noise in the workplace, in all kinds of productive activities, represents a menace and it true has

- 1 Ingeniero de producción, candidato a magíster en Ingeniería Industrial. Docente tiempo completo Fundación Universitaria Los Libertadores. Bogotá, Colombia. Contacto: [garomerod@libertadores.edu.co](mailto:garomerod@libertadores.edu.co)
- 2 Administrador industrial, especialista en Salud Ocupacional, candidato a magister en Gestión de Proyectos. Docente de tiempo completo Fundación Universitaria los Libertadores. Bogotá, Colombia. Contacto: [jcalderona@libertadores.edu.co](mailto:jcalderona@libertadores.edu.co)
- 3 Ingeniera de Sistemas, magíster en Ingeniería Área Informática y Ciencias de la Computación. Docente de tiempo completo Fundación Universitaria los Libertadores. Bogotá, Colombia. Contacto: [bmjaimesb@libertadores.edu.co](mailto:bmjaimesb@libertadores.edu.co)

not been truly assessed in its real dimension. Little has been seen from the people concerned in this matter to give the urgency to manage noise control programs.

Therefore, disposals resulting from medical treatments and absenteeism, represented in health care and social services, result in labor-related hidden costs that directly affect the gross domestic product in any country.

**Method:** This article compiles different studies worldwide. The studies were divided for revision into general studies about the effects of labor noise and then, particularized according to the effects of

industrial noise on workers' health. At a control level, the evaluation and measurement of noise is defined by using tools such as noise maps and their respective derivations in addition to spatial databases.

**Conclusions:** The data provided by the case studies points to the need in Colombia, a country that is no stranger to this phenomenon, and additionally has the great disadvantage of not having significant studies in the field of noise analysis.

It strengthens studies based on spatial data and measurement and control mechanism.

**Keywords:** Geography information system, Noise, Noise map.

## INTRODUCCIÓN

El ruido, una sensación auditiva desagradable que con exposiciones prolongadas conlleva a una disminución progresiva de la capacidad auditiva, genera como consecuencia, disminución de la calidad de vida del individuo e impactos negativos en su productividad.

Se ha establecido que las personas que están expuestas al ruido a niveles superiores a 85 decibeles ponderados (en adelante dBA), sufren pérdida de la audición. Esta pérdida es de carácter neurosensorial, bilateral y simétrica, lo cual implica lesión en el interior del oído, por soportar frecuencias más altas (3k, 4k o 6k Hz) y luego se extiende a las frecuencias más bajas (0,5k, 1k, 2k Hz). (Subroto y Dhattrak, 2008).

El oído es un órgano muy sensible y al ser sometido a niveles altos de ruido puede sufrir modificaciones anatómicas hasta llegar a la pérdida definitiva de la audición. Esta patología tiene dos etapas: en la primera se presenta una hipoacusia que se alivia completamente después de un periodo de descanso y realiza cambios temporales en el umbral auditivo, y la segunda se produce cuando se sigue expuesto crónicamente al ruido y ocurren cambios permanentes, lo que ocasiona, por un lado, un daño irreversible en el órgano de Corti,

además de la hipoacusia neurosensorial, evidente después de estar expuesto de 10-15 años al estímulo auditivo casual (Otárola, Otárola y Finkelshtein, 2006).

Otro inconveniente que ocasiona el ruido es la generación de costos en la industria, debido a la pérdida de la productividad, la educación especial y los cuidados médicos que se ocasionan por la pérdida de la audición en los trabajadores (Díaz, 2006).

Por estas razones, las industrias deben establecer programas de vigilancia para monitorear a los trabajadores que están expuestos a niveles de ruido que impliquen un riesgo para su salud y que puedan adquirir sordera profesional (Sánchez y Albornoz, 2006).

En este artículo de revisión se consolidan diferentes estudios sobre los efectos del ruido laboral en la salud del individuo, así como sus controles, mediante herramientas para la gestión y evaluación del ruido, como los mapas industriales que permiten georreferenciar los resultados con diferentes metodologías y cálculos.

Las bases de datos, otro componente del artículo, indican cómo se constituye una infraestructura de datos espaciales aplicando, los geoprocесamientos, en interacción con los sistemas de información geográfico y los sistemas de posicionamiento geográfico.

Actualmente en las empresas manufactureras se ha encontrado una importante incidencia negativa en la salud auditiva de los operarios y funcionarios que permanecen mayor tiempo en el área donde se localiza la planta de producción (Shigiang, Rui-xiang, Kun y Yu, 2008) o donde se encuentren las máquinas.

## ESTUDIOS SOBRE LOS EFECTOS DEL RUIDO LABORAL

Se han realizado muchos análisis sobre las consecuencias del ruido laboral sobre los trabajadores. Entre otros, se tienen:

En el estado de Aragua (Venezuela) se realizó un estudio con 122 trabajadores de la zona industrial de la ciudad La Victoria, de donde se obtuvo que el 30,4 % de los trabajadores presentaron problemas auditivos. El 70,4 % de los trabajadores manifestó dificultades extraauditivas, siendo las más frecuentes, el insomnio en 49,1 %, la irritabilidad en el 40 % y la cefalea en 31,9 % de los casos. El 11,4% refirió problemas en el área sexual; 19,1 % de los trabajadores expresaron ser hipertensos por la exposición laboral al ruido; en 33,5 % de ellos se diagnosticó ansiedad, y en 5,8 % depresión. El 27 % recibió incapacidad de forma permanente y total (Martínez, 1995).

En Turquía, 126 trabajadores se vieron expuestos a altos niveles de ruido de hasta ocho horas diarias en una planta de energía hidroeléctrica. Aunque la empresa les había proporcionado protectores auditivos a los trabajadores, estos no los utilizaban. Se diagnosticó a 71 de los 126 trabajadores expuestos al ruido con deficiencia auditiva. Esta se generó durante los primeros diez años de exposición, sin embargo, se detectó un mínimo de cambio de umbral permanente en un periodo de 40 años (Celik, Yalcin, y Öztürk, 1998).

En Chipre (Eleftheriou, 2002) se realizó un estudio a más de 90 empresas con una muestra de 200 personas y del cual se obtuvieron los siguientes resultados: 71,6 % de los trabajadores encuestados estuvieron expuestos a una dosis menor que la

permitida para su turno, mientras que el resto (28,4 %) era expuesto a una dosis más alta. De un total de 90 instalaciones industriales, 14 expusieron a sus trabajadores a dosis de ruido que superaban el valor límite en un 100 %. El 27,8 % de los encuestados presentó un ligero cambio permanente del umbral entre 20 y 30 dB, mientras que el 7,7 % de los examinados tuvieron una grave discapacidad con un desplazamiento permanente del umbral superior a 30 dB. El porcentaje de las personas que presentaron alguna discapacidad auditiva fue del 35,5 %.

En la ciudad de Sivas (Turquía) se investigó sobre el ruido generado por fábricas de hormigón poligonal, hierro y acero, cemento y textiles mediante un estudio que fue practicado a 256 trabajadores de estas industrias. El nivel de perturbaciones por ruido industrial que manifestaron los trabajadores se encontró en un 73,83 %. El porcentaje de trabajadores que, según la empresa, expresó problemas de audición fue: 30,86 % en la empresa de concreto hormigón transversal; 33,33 %, en la de cemento; 23,96 %, en la de hierro y acero, y en las fábricas textiles, 40 %. El 85,94 % de los trabajadores no tienen pruebas de audición periódica. Los accesorios de protección del oído se utilizan en las industrias con una tasa de 32,94 % (Atmaca, 2005).

Se realizó un estudio a 82 trabajadores de la fábrica de Productos Lácteos Escambray, de Cumanayagua (Cienfuegos, Cuba); la empresa está conformada por tres líneas de producción: fábrica de helados, de quesos y pasteurizadora. Fueron analizadas 24 áreas, 15 (62,5 %) tenían niveles de ruidos igual o superior a 85 dBA, y fue la pasteurizadora la zona que presentó mayor número de problemas de niveles de ruido elevado (85,7 %); la fábrica de quesos solo tuvo tres áreas (42,9 %) con niveles superiores a 85 dBA. El estudio determinó que la empresa en un 100 % de las áreas estudiadas, presentaba ruido continuo y no intermitente (Moreno, Martínez y Rivero, 2006).

Otro estudio fue realizado a 98 trabajadores de la Carpintería de Aluminio Tomás Álvarez Breto, situada en La Habana. La empresa fue dividida en 13 áreas de las cuales se comprobó que solamente

cuatro presentaban niveles de ruido iguales o inferiores a 85 dBA, el resto presentó niveles altos de ruido. Se determinó que el 78 % de los trabajadores tenían hipoacusia y solamente 22 % obtuvieron resultados normales. En los puestos donde el personal era rotado no se presentaron problemas auditivos. Se determinó que la disminución de la audición se presentó en un mayor porcentaje en las mujeres (45,9 %) que en los hombres (32,7 %) (Hernández y González, 2008).

En Venezuela, en una industria papelera, se realizaron audiometrías a sus trabajadores y mediciones de la intensidad del ruido ambiental. Los trabajadores estaban expuestos a niveles superiores de 85 dBA; aquellos expuestos a ruido contaban con mecanismos de protección como tapones y orejeras, ya que según las políticas corporativas, pero no eran utilizados por ellos. La mayoría de los trabajadores de los grupos expuestos a ruido presentaron problemas de audición (Guevara *et al.*, 2008).

En la empresa Raja Tren de pasajeros (Irán), se realizó un estudio donde se establecieron dos grupos (154 y 146 trabajadores) que en su actividad se exponían a niveles de ruido alto y bajo, respectivamente. Se les aplicó un test de sangre, con métodos enzimáticos para estimar triglicéridos (TG), colesterol total (CT) y los niveles de lipoproteínas de alta densidad (HDL). El análisis mostró que trabajar en un lugar con alta exposición al ruido y el aumento de las horas laborales por semana, hizo que se incrementará el TG sérico en el grupo de alta exposición. Los niveles de CT y HDL no presentaron un aumento significativo en ninguno de los dos grupos, con lo cual fue posible determinar que el ruido crónico aumenta la presión arterial sistólica, entre los trabajadores sobre todo de sexo masculino (Mehrdad, 2011).

En Egipto, en 15 diferentes industrias, se realizaron estudios sobre sus niveles de ruido (con sonómetros), llevándose a cabo tomas en intervalos de cada 10 minutos durante periodos de 8 horas diarias y a una altura de 1,2 m sobre el suelo. Se estableció que los trabajadores debían soportar niveles de ruido que superaban los 90 dBA así: industria

de comida 71,4 dBA, bebidas 73,1 dBA, ropa 74,5 dBA, madera 80,7 dBA, muebles 83,6 dBA, servicio de lavandería de hospital 86,2 dBA, molino de trigo 87,4 dBA, establecimiento de impresión 89,3 dBA, central eléctrica 91,5 dBA, taller de trabajo de metal 92,6 dBA, mantenimiento de vehículos 93,1 dBA, mantenimiento para trenes 94,7 dBA, fábrica de aluminio 97,2 dBA, fábrica de hierro 98,5 dBA y obras de remache 100,4 dBA. Por medio de este estudio también se logró establecer que zonas residenciales presentaban niveles de ruido de 91,5 dBA cuando lo permisible es de 60 dBA. Los niveles máximos de ruido permisibles en las zonas educativas son 50 dBA, mientras que el nivel de ruido medido era 89,3 dBA. Los niveles máximos de ruido permisibles en áreas industriales son 70 dBA, mientras que el ruido medido en esta área fue de 98,5 dBA (Sayed, 2011).

## EFFECTOS QUE CAUSA EL RUIDO INDUSTRIAL EN LA SALUD DE LOS TRABAJADORES

A través de diversos estudios se ha establecido que el oído humano se ve afectado cuando se somete a niveles elevados de ruido y que la pérdida de la audición puede ser producida por ruido, sustancias ototóxicas y trauma acústico. De estas, la más frecuente, pérdida auditiva por ruido, afecta considerablemente la calidad de vida y se establece como enfermedad profesional. En la actualidad es fácil diagnosticarla por medio de la PTA (audiometría de tonos bajos) y la implementación de la OAE (prueba de emisiones otoacústicas) con estas pruebas es la mejor forma de establecer la hipoacusia neurosensorial ocupacional en los trabajadores expuestos. Así, la prueba que presenta mayor sensibilidad para detección de daño coclear es la OAE o la PTA (Gómez, 2012).

El ruido además genera efectos no auditivos como dilatación de las pupilas, agitación respiratoria, aumento de la presión arterial, menor irrigación sanguínea, disminución de la secreción gástrica, aumento del colesterol, aumento de

la glucosa en la sangre, insomnio, fatiga, estrés, depresión, irritabilidad, histeria, neurosis, aislamiento social y falta de deseo sexual (Sánchez y Albornoz, 2006) Estos deterioros se presentan de una manera más rápida durante los primeros diez años de la exposición al ruido, luego su progreso es más lento (Celik, Yalcin y Öztürk, 1998).

También, el ruido tiene efectos sobre la salud como (Chávez, 2006):

- Malestar: ya que interrumpe las actividades que se están realizando. Este se comienza a experimentar a partir de niveles de 50 dBA
- Interferencia con la comunicación: una conversación moderada donde el locutor se encuentra a un metro, el nivel de presión se establece entre 50 dBA y 55 dBA. Hablando a gritos se puede alcanzar a 75 dBA u 80 dBA. Se establece que un ruido de fondo con niveles superiores a 40 dBA provocará dificultades en la comunicación oral. A partir de 65 dBA de ruido, la conversación se torna extremadamente difícil.
- Pérdida de atención, de concentración y rendimiento: el ruido interfiere con la percepción y esto ocasiona problemas en la realización de una labor.
- Trastornos en el sueño: el ruido puede ocasionar dificultad para conciliar el sueño, también puede producir que se altere la presión arterial, arritmia cardiaca y movimientos corporales.
- Pérdida de la capacidad auditiva.
- Estrés.
- Habitación al ruido: el organismo se habitúa al ruido a mediano o largo plazo.

En algunos países, como la India, la pérdida de la audición se determinó como enfermedad indemnizable desde 1948 bajo la Ley del Seguro Estatal de Empleados y la Ley de Indemnización por Accidentes del Trabajo (1923). Pero no fue sino en 1996 que se presentó el primer caso de compensación y cerca de 250 trabajadores solamente están recibiendo indemnización por pérdida de la audición (Subroto y Dhattrak, 2008).

## CONTROL DEL RUIDO

Se ha podido establecer que es fácil identificar los niveles de ruido que son peligrosos y técnicamente se puede realizar su control por medio de la aplicación de tecnología comercial, remodelando o transformando el equipo/proceso (Suter, Naturaleza y efectos del ruido, 2001).

Así mismo, la pérdida de audición es totalmente prevenible, esto se puede lograr por medio de controles de ingeniería y que los empleadores proporcionen a sus trabajadores al menos dos medios de protección: a) elementos de protección personal (EPP), que son los controles más comunes y b) las decisiones administrativas, como la rotación de turnos periódicos y limitar la exposición al ruido cuando los niveles excedan los 85 dB (Gómez, 2012).

Para prevenir la pérdida de la audición se debe: disminuir la exposición al ruido, usar tapones en los oídos cuando se va a estar expuesto a periodos largos de ruido, usar materiales que absorban el ruido y lo disminuyan en la casa o en el trabajo, no utilizar varias máquinas ruidosas al mismo tiempo, y tratar de evitar oír el ruido indeseable con otros sonidos y realizar periódicamente un examen de audición para evaluar su capacidad auditiva (Gómez, 2012).

Un mecanismo de protección contra el ruido de los trabajadores son los protectores auditivos; cuando estos se van a seleccionar se debe tener en cuenta el personal que lo va a utilizar, la compatibilidad con otros equipos de seguridad y las condiciones de trabajo como temperatura, humedad y presión atmosférica (Subroto y Dhattrak, 2008).

Los países en desarrollo se han concentrado en el control del ruido por medio de normas tendientes a establecer como límite de exposición permisible 85 dBA y un factor de acumulación (relación de interdependencia tiempo/intensidad) de 3 dB, y métodos técnicos, como la implementación de pruebas audiométricas periódicas, utilización de protectores auditivos, la formación y el mantenimiento de registros (Suter, 2001).

Cuando una empresa establece un programa de control de ruido, lo primero que debe realizar

es determinar cuál es el ruido aceptable en su industria, de esta forma puede establecer si se debe construir una nueva planta, ampliar sus instalaciones o comprar nuevos equipos. Después debe distribuir los equipos y los procedimientos según el ruido que estos generen, buscando que los procesos/máquinas más ruidosos estén juntos y separados de las áreas más silenciosas por zonas de ruido intermedio (Driscoll, 2001).

El siguiente paso es determinar las fuentes del ruido. Existen algunas técnicas que contribuyen a identificar el origen o la fuente del ruido (Driscoll, 2001):

- Medir el espectro de frecuencias y representar los datos gráficamente.
- Medir el nivel sonoro, en dBA, en función del tiempo.
- Comparar los datos de frecuencias con equipos o líneas de producción similares.
- Aislar componentes con controles temporales o conectar y desconectar un equipo tras otro, siempre que sea posible.

El primer paso del proceso de control del ruido es tratar directamente la fuente. El ruido también se puede controlar mediante cerramientos y barreras acústicas, que bloqueen o protejan al receptor de la vía sonora directa. Otra manera de controlarlo es instalando garitas o cabinas insonorizadas y de esta forma se aísla al empleado del ruido excesivo. Igualmente, se deben crear turnos de trabajo para que el empleado pueda recuperarse del ruido (Driscoll, 2001).

## EVALUACIÓN Y MEDICIÓN DEL RUIDO

En las industrias es necesario que se realicen mediciones de emisión de ruido de fuentes fijas, para esto se debe tener en cuenta las siguientes condiciones generales (Echeverri, 2011):

- Los datos deben ser obtenidos a través de un sonómetro clase 1 o clase 2 según la norma

IEC 61672-1:2002 o cualquiera que la sustituya. Estos deben ser calibrados según la norma IEC 60942:2003.

- Deben existir condiciones atmosféricas adecuadas, es decir, tiempo seco y los pavimentos y las superficies sobre las que se efectúen las mediciones deben estar libres de humedad.
- La Resolución 627 del 7 de abril de 2006, del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, determina que los niveles de presión sonora medida se deben corregir por impulsividad, tonalidad, condiciones meteorológicas, horarios, tipos de fuentes y receptores.

Existen parámetros para la medición de la emisión de ruido proveniente de fuentes fijas, los principales son (Echeverri, 2011):

- Nivel de presión sonora continuo equivalente con filtro de ponderación A, LAeq,T y ponderación temporal rápida (F).
- Nivel de ruido residual, LAeq, T, residual, medido como nivel de presión sonora continuo equivalente con filtro de ponderación A y ponderación temporal rápida (F) o como nivel de permanencia L90.

El tiempo de medición es de una (1) hora y esta se puede realizar de forma continua o con intervalos no menores a 15 minutos, para capturar la información necesaria se deben realizar como mínimo 3 mediciones de 5 minutos cada una, para que los resultados sean representativos. Al realizar la medición se debe hacer en el día y cuando la emisión de ruido sea mayor. Se deben hacer 2 procesos de medición, uno con la(s) fuente(s) de emisión de ruido funcionando, durante el periodo de mayor emisión, para obtener el nivel de presión sonora continuo equivalente con filtro de ponderación A, LAeq,1h, y otro sin la(s) fuente(s) funcionando, para determinar el ruido residual, LAeq, 1h, residual (Echeverri, 2011).

Para la evaluación de la calidad acústica de recintos cerrados existen principalmente tres

criterios: *noise criteria curves* (NC), *room criteria curves* (RC) y *balanced noise criteria curves* (NCB); sin embargo, es este último el que ha adquirido la mayor relevancia dado que considera un mayor rango de bandas de frecuencias. Estas curvas fueron creadas con el propósito de que el ruido de fondo no interfiera con el tipo de actividad que se desarrolla en un determinado recinto, permitiendo, además, que la comunicación entre las personas sea satisfactoria (Chávez, 2006).

El ruido es medido con instrumentos como: sonómetros, dosímetros y equipos auxiliares. Los sonómetros se clasifican por su precisión, desde el más preciso (tipo 0) hasta el más impreciso (tipo 3). El filtro más utilizado es la red de ponderación A. A los sonómetros modernos para que arrojen resultados más detallados se les conectan filtros de banda de octava y de tercio de banda de octava (Denisov y Suvorov, 2001).

Según la norma internacional (ISO 2204, 1979) determina que el ruido se puede medir según tres tipos de métodos:

a) De control: las zonas de trabajo son medidas con un sonómetro, utilizando un número limitado de puntos de medida.

b) De ingeniería: El nivel sonoro es medido a través del factor de ponderación A. El número de puntos de medición y las gamas de frecuencias se determinan en función de los objetivos de medición. Se deben registrar los factores temporales.

c) De precisión: las mediciones globales del nivel sonoro se complementan con mediciones en banda de octava o de tercio de octava y se registran historiales de intervalos de tiempo apropiados en función de la duración y las fluctuaciones del ruido.

El ruido en el trabajo se puede medir bajo dos criterios básicos (Denisov y Suvorov, 2001):

- Se puede medir la *exposición* a la cual está sometido cada trabajador.
- Los *niveles* de ruido pueden medirse en varias áreas, realizando un mapa de ruido para determinar las áreas de riesgo.

## MAPAS DE RUIDO, HERRAMIENTA PARA LA GESTIÓN Y EVALUACIÓN DEL RUIDO

La diversificación de las actividades humanas significa que un número creciente de ciudadanos está expuestos a distintas fuentes de ruido, a ambientes sonoros complejos (ruidos combinados).

Varios estudios han puesto de manifiesto el impacto del ruido en el bienestar y la salud humana (Pierrete *et al.*, 2012) y definiendo que existe una relación causal entre el nivel sonoro y el grado de molestia que genera en las personas, aunque las características físicas y culturales del individuo pueden relativizar el nivel de impacto que tiene el ruido sobre la salud (Martínez y Moreno, 2005).

Desde hace tiempo la sociedad está concientizada en las implicaciones que tiene el ruido en el medio ambiental y en la salud. Como resultado, distintas entidades y personas han propuesto y desarrollado acciones encaminadas al control y a la reducción del ruido. Una de las herramientas más importantes para la evaluación y la gestión del ruido ambiental es la que se denomina *mapa de ruido* (Ayuntamiento de Leganés, 2011).

Los mapas de ruido se han utilizado para examinar los efectos de la contaminación acústica en sitios como aeropuertos, instalaciones de fábricas, rutas de carretera y comunidades residenciales cercanas. Su desarrollo ha permitido generar medidas correctivas como la rezonificación de áreas industriales/residenciales, así como la construcción de pantallas acústicas para reducir el efecto del ruido en alguna zona (Suebsak, Tawan y Supphawat, 1999).

Teniendo en cuenta lo trabajado por la Comunidad Europea en aspectos de evaluación, control y gestión del ruido (ambiental o industrial), se puede definir un mapa de ruido como:

[...] la presentación de datos sobre una situación acústica existente o pronosticada en función de un indicador de ruido, en la que se indicará el rebasamiento de cualquier valor límite pertinente vigente,

el número de personas afectadas en una zona específica o el número de viviendas expuestas a determinados valores de un indicador de ruido en una zona específica (Parlamento Europeo, 2002).

Asimismo, define un mapa estratégico de ruido como “un mapa diseñado para poder evaluar globalmente la exposición al ruido en una zona determinada, debido a la existencia de distintas fuentes de ruido, o para poder realizar predicciones globales para dicha zona” (Parlamento Europeo, 2002).

El desarrollo de los mapas de ruido puede generarse de forma experimental o bajo cálculo matemático. Los mapas que se realizan de forma experimental suponen una mayor necesidad de recursos (humanos y económicos) iniciales, siendo lentos de realizar y su utilidad se alcanza en la etapa de diagnóstico, por llevar datos tomados *in situ*, lo que le da fiabilidad a la información (Simón *et al.*, 2008).

Para la vigilancia del medio ambiente (en este caso el factor ruido) el aspecto de datos es de particular relevancia. De hecho, hoy existe mucha demanda por parte de los ciudadanos, grupos de activistas e incluso administraciones municipales para el uso de tecnologías participativas para hacer frente a la contaminación (D’Hondt, Stevens y Jacobs, 2013), las cuales si se aplica correctamente, pueden lograr la misma precisión que las técnicas estándar de mapas de ruido (D’Hondt, Stevens y Jacobs, 2013).

De igual modo, el desarrollo de los mapas de calculados presenta una mayor flexibilidad (se puede mapear mayor área de estudio), son económicamente más asequibles y su actualización es más fácil. Sus defectos radican en el hecho de que sus resultados dependen del modelo matemático utilizado y en el conjunto de datos de entrada que se introducen para su cálculo (Simón *et al.*, 2008).

En principio, un mapa de ruido consiste en una representación espacial de datos sobre una situación acústica existente o pronosticada en función de un índice de ruido. En el caso más general,

representa los niveles sonoros mediante un conjunto de líneas isófonas realizados a partir del cálculo de niveles sonoros en puntos receptores que abarcan toda la zona de estudio. Sin embargo, los mapas de ruido también pueden representar la superación de algún valor límite, el número de personas afectadas o el número de viviendas expuestas a un determinado valor del índice de ruido (Ayuntamiento de Leganés, 2011).

Conviene recordar que la cartografía acústica presenta muchas más posibilidades: mapas verticales, mapas con información numérica en puntos receptores, mapas de análisis de contribución de las distintas fuentes, mapas con población expuesta, etc. (Segués, 2005).

## MAPAS DE RUIDO INDUSTRIAL

El desarrollo de mapas de ruido en las últimas dos décadas ha sido ampliamente trabajado, la mayoría de las grandes ciudades cuentan con departamentos técnicos de control de la contaminación acústica que elaboran habitualmente mapas de ruido y planes de actuación; es decir, existen ya procedimientos y una experiencia importante para la gestión del ruido ambiental (Segués, 2005).

Sin embargo, en un entorno más pequeño, como una oficina de negocios o un piso de una fábrica, el uso de un mapa de ruido es todavía limitado, en parte debido a la dificultad en la construcción de curvas de ruido (Suebsak, Tawan y Supphawat, 1999).

Un mapa de ruido industrial busca medir los niveles de ruido en empresas o fábricas industriales, tanto a nivel interno como el impacto a su alrededor. Busca, también, definir las emisiones generadas por las fuentes fijas que se encuentran en el interior de las empresas, para ello, es necesario determinar la distribución de la fábrica y en ella la ubicación de las máquinas. Una vez que se conocen los niveles de ruido en todos los puntos de interés, las curvas de ruido se pueden construir (Suebsak, Tawan y Supphawat, 1999).



## METODOLOGÍA DE ELABORACIÓN DE MAPAS

Antes de empezar a trabajar un mapa de ruido, es necesario establecer los requisitos y determinantes de dicho mapa; saber si se realizará un mapa general o específico sobre la(s) fuente(s), la escala de trabajo y precisión de los datos, los índices acústicos y resultados del mapa (Segués, 2005).

Luego se selecciona la técnica que se va a emplear (Segués, 2005): medidas con sonómetros (Icontec, 1992), métodos de previsión, o combinación de medidas y previsiones

Los mapas desarrollados bajo técnicas de medida directa (sonómetros) resultan costosos (recursos y tiempo), pero sus resultados reflejan un buen nivel de precisión. Los que se desarrollan con métodos de previsión presentan ventajas prácticas con buena fiabilidad de sus resultados, pero muchas veces establecer el comportamiento de las fuentes de ruido (cálculos) requiere un muy buen nivel de manejo de modelos matemáticos (Segués, 2005).

Los primeros mapas de ruido realizados en los años ochenta y noventa, se elaboraron con medidas experimentales (Recuero, Gil y Grundman, 1996) y es más adelante donde se empieza a componer una correcta elaboración a través de un plan de muestreo (Sommerhoff, Recuero y Suárez, 2004).

Las metodologías de muestreo espacial con medidas experimentales más empleadas para realizar mapas de ruido son (Ausejo, 2010): a) metodología de retícula o rejilla: dividiendo la zona bajo estudio mediante una rejilla de una distancia fija y realizar las medidas en los nodos de la rejilla (Recuero, Gil y Grundman, 1996) b) metodología de viales o tráfico: realizando una categorización de las vías y muestrear diferentes puntos de las vías asumiendo que las de la misma categoría presentarán niveles de ruido similares (Romeu y Jiménez, 2006); c) muestreo en zonas específicas: se suele emplear cuando se desea cubrir una zona específica en la que se centraliza un ruido específico, como el del ocio nocturno; d) metodología en función de los usos del suelo: se realiza teniendo

en cuenta las características del suelo, en función de las categorías de planificación territorial de la aglomeración: uso comercial, uso residencial, etc. (Romeu y Jiménez, 2006); e) metodología de las zonas aleatorias: es habitual emplear esta metodología cuando no se puede trazar una retícula, no procede la utilización del método de viales o porque no hay una zona específica en la que se centre el ruido (Pavón y Recuero, 2006).

## MÉTODOS DE CÁLCULO PARA MAPAS DE RUIDO

El desarrollo del método de cálculo de focos industriales/focos puntuales (Gobierno Vasco, 2005) es uno de los más utilizados y estipula considerar las normas ISO que aportan el desarrollo del cálculo de las emisiones de fuentes puntuales (ISO 3740, 2000) y su cálculo de propagación (ISO 9613, 1993), así como la determinación de emisiones de áreas industriales.

En Bogotá, la legislación aplicable a la problemática de ruido en la ciudad (SDMA, 2013), es entre otras, la norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiente (Resolución 627/06 MAVDT) y la que establece la clasificación empresarial por impacto sonoro UCR que permite valorar las industrias y establecimientos, respecto a su nivel de generación de ruido (Resolución DAMA 832/00).

Así, se deben definir focos puntuales y sobre los mismos (día, tarde y noche) medir el nivel de potencia, describiendo la geometría del foco, su ubicación y direccionalidad. Para lo anterior se debe tener en cuenta que medir la presión sonora cerca al foco conlleva determinar los niveles de potencia de sonido con métodos de ingeniería (ISO 3744, 2010) y métodos de inspección (ISO 3746, 2010).

## BASES DE DATOS ESPACIALES

Desde las primeras civilizaciones se vio la necesidad de representar de manera pictórica los datos espaciales. En el siglo XVIII en Europa se constituyó la Geographical Information Society a partir

del establecimiento de los organismos de gobierno nacional con objeto de producir mapas catastrales y topográficos de todos los países. Estos institutos continúan vigentes. Incluso, a través de los dos últimos siglos los mapas se habían elaborado en estilos individuales; sin embargo, aún existen estándares dentro de la cartografía que no se han roto (Peña, 2010).

Las *bases de datos espaciales* surgen de la necesidad de almacenar y representar datos geográficos. Estas se constituyen en una *base de datos electrónica* que además de registrar y facilitar la administración de información trascendental de un dominio de negocio en un medio digital, permiten almacenar información de tipo espacial (Álvarez, 2009).

Una ventaja especial que proporciona la estructuración digital de la información es el análisis geoestadístico; la mayoría de *software* especializados en los sistemas de información geográfica (SIG), como el *ArcGis*, *Quantum Gis* o el *GvSig*, presentan módulos para el análisis exploratorio de los datos espaciales y herramientas para crear superficies estadísticas (Miranda, Ubaque y Pinzón, 2015).

## INFRAESTRUCTURA DE DATOS ESPACIALES (IDE)

El Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) se mantiene como la entidad rectora de la geografía colombiana y de acuerdo con su misión, en su plan de desarrollo se definen las siguientes funciones (Arias, 2006):

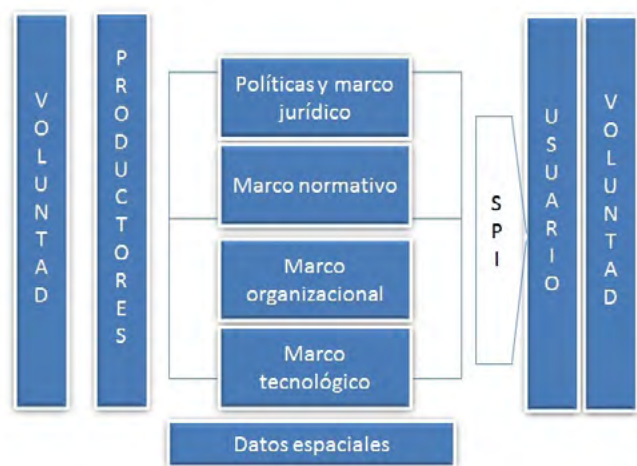
- Incrementar el conocimiento y entendimiento de la visión, los conceptos y beneficios de las IDE.
- Evaluar e implementar el uso de metodologías comunes para la producción y mantenimiento de los datos fundamentales de soporte a las IDE.
- Contribuir con la generación de estrategias de cooperación entre el IGAC y otras

organizaciones del orden nacional e internacional para promover y difundir el desarrollo de las IDE.

- Contribuir con el desarrollo de soluciones comunes para el descubrimiento, acceso y uso de los datos geoespaciales como respuesta a las necesidades de las comunidades.

El IGAC (2001) –como coordinador de la Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales (ICDE), la cual es la suma de políticas, estándares, organizaciones y recursos tecnológicos que facilitan la producción, el acceso y el uso de la información geográfica de cubrimiento nacional, para apoyar el desarrollo económico y social del país– busca, entre otros, objetivos documentar los datos cartográficos básicos y temáticos producidos y facilitar el acceso a ellos (metadatos) y armonizar los sistemas de información para asegurar la interoperabilidad de los datos (estándares –comité de normalización de datos espaciales–) mediante la implementación de la Norma Técnica Nacional de Metadatos Geográficos (NTC4611) (IGAC, 2000).

La columna vertebral de la IDE y de los sistemas cartográficos son los *datos espaciales* (figura 1). Los diversos marcos que componen para el



**Figura 1.** Modelo conceptual de la IDEMEX.

**Fuente:** Esparza (2006).

caso, la Infraestructura de Datos Mexicanos (IDEMex), están orientados hacia los *datos espaciales*. La IDEMEX es el conjunto de políticas, marco jurídico, organizacional, normativo y tecnológico, necesarios para la efectiva creación e integración de datos espaciales y que faciliten la disponibilidad, acceso, compartición y aprovechamiento de estos, como parte del Sistema Público de Información (SPI) (Esparza, 2006).

## GEOPROCESAMIENTO APLICADO

Eficientes herramientas para extraer información de datos espaciales son cruciales para organizaciones que toman decisiones basadas en conjuntos robustos de datos espaciales, como: la NASA (Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio), la NIMA (Agencia Nacional de Imágenes y Cartografía) y la NSI (Instituto Nacional del Cáncer). Estas organizaciones están repartidas a través de muchos dominios de aplicación, incluyendo: ecología, administración del medio ambiente, seguridad pública, transporte, ciencias de la Tierra, epidemiología y la climatología (Ravikumar y Gnanabaskaran, 2010).

Teniendo en cuenta estudios tanto sociales como económicos, y en especial en los modelos econométricos, es necesario considerar las variables espaciales que se encuentran en el trabajo con datos georreferenciados; ya que los sucesos que ocurren en una ubicación tienen influencia en otra que aparentemente es remota (Acevedo y Velásquez, 2008).

Ejemplo de eso es el proyecto de Pacheco (2012), el cual obtuvo el índice de erosión potencial a través del tratamiento de datos edáficos, pluviométricos y térmicos, generando imágenes en mapas de tipo ráster, con una resolución espacial de 100 metros a través de interpolación.

Es recomendable una clase de mecanismo de despliegue de datos meteorológicos sobre la base del modo G/S el cual se basa en HGML (*hyper geographic markup language*) que es un estándar de intercambio uniforme. Para el caso de los datos

meteorológicos que se caracterizan por ser densos y complicados. De acuerdo con el concepto de “conurrencia de la información” y “el servicio de polimerización”, los cuales agrupa la tecnología de procesamiento geográfico ArcGIS (Chen, Miao, Yang y Xirong, 2011).

La tecnología de SIG se utilizó para integrar datos de la malaria en Colombia, de diversas fuentes para un período reciente y hacer distintos análisis espaciales en las cinco zonas endémicas identificadas. La base de datos espacial desarrollada permitió el ingreso periódico de datos para el seguimiento de la enfermedad y así evaluar oportunamente la efectividad de las estrategias adoptadas para la disminución de la incidencia (Molina, 2008).

## INTEROPERABILIDAD EN LOS SIG

Considerando las dificultades en la interoperabilidad entre los archivos que generan los SIG, y que luego se pretendan manejar a través de otro SIG, es posible resolver empleando el formato “dxf”, pero a costa de pérdida de información y es allí donde surge la necesidad en la estandarización de la geo información (Bernabé, Manso y González, 2007).

Debido a que los datos espaciales son salvados en formato binario, representa un inconveniente para el uso y para compartir los datos. Con objeto de unificar la administración de los datos espaciales se propone mapear datos basado en XML (lenguaje de marcas extensible) en la base de datos relacional-espacial; esto, además de resolver los dos inconvenientes mencionados, proporciona la manera de acceder sistemas heterogéneos y como cualquier Web GIS garantiza el radio de uso de la información (Ye, Zang y Li, 2011).

## SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GEOGRÁFICO (GPS)

En contraste con el posicionamiento de vehículos, la localización de individuos con precisión está cobrando importancia, en especial en casos de

salud, como es el caso de pacientes con demencia, entre otros, en donde se recomienda la arquitectura Mobile Guardian que se basa en un GPS y en GSM (*management system geographic*) (Wu, Yang, Liu y Dong, 2008).

Como proyecto estratégico para el desarrollo de Colombia, se estableció un convenio de cooperación entre el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) y el IGAC para generar los productos cartográficos de soporte a los operativos censales, así como la cartografía básica. El IGAC ha avanzado en el establecimiento del Marco Geocéntrico Nacional de Referencia MAGNA y el uso de tecnologías GPS (*global positioning system*), para suministrar el sistema de coordenadas de precisión al cual se vinculan los diferentes tipos de cartografía para el censo y otros proyectos (Arias, 2006).

## CONCLUSIONES

El uso de los SIG cada vez es mucho más amplio para muchos dominios de aplicación, esto sumado a la globalización y la proliferación de las redes, lleva a una necesidad de estandarizar las herramientas de *software* empleadas; es de anotar que en los años más recientes la mayoría de entidades orientadas a la cartografía digital usan la tecnología ESRI.

Las industrias en el mundo, por lo general, presentan ruido por encima de 85 decibeles, causando enfermedades auditivas irreversibles y otras asociadas al ruido, como: insomnio, irritabilidad, cefalea, problemas sexuales, hipertensión entre otras a mediano y largo plazo de exposición y al sistema productivo, pérdidas que aún no se cuantifican.

Por otra parte es importante destacar la importancia de investigar acerca del ruido ocupacional luego de conocer que el industrial puede generar afecciones, siendo entre otras la más grave, la perforación de manera permanente de la membrana timpánica del oído.

Las empresas en algunos sectores industriales, como las de metalmecánica, textil, alimentaria, plásticos, artes gráficas, entre otras, que son altamente generadoras de ruido, carecen por lo general de programas que lo controlen y, por ende, hay una falencia de una cultura de autocuidado, con lo cual se evidencia poco conocimiento y manejo acerca de este tema.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo B., I. y Velásquez C., E. (2008). Algunos conceptos de la econometría espacial y el análisis exploratorio de datos espaciales. *Ecos de Economía*, 27, 28-30.
- Álvarez P., V.L. (2009). *Bases de datos espacio-temporales*. México: Universidad Veracruzana.
- Arias Duarte, L.P. (2001). El Instituto Geográfico Agustín Codazzi y su gestión como entidad líder de América en la construcción de infraestructura de datos espaciales (IDE). *Revista Cartográfica*, 73, 63-76.
- Arias D., L.P. (2006). La cartografía digital del Censo General 2005 como estrategia para materializar resultados de la infraestructura colombiana de datos espaciales. *Revista Cartográfica*, 82, 157-168.
- Atmaca, E.P. (2005). Industrial Noise and Its Effects on Humans. *Journal of Enviromental Studies*, 14(6), 721-726.
- Ausejo, P.M. (19 de abril de 2010). Mapas de ruido. Recuperado el 15 de julio de 2013, de: <http://www.aislacustic.com/servicios/mapas-de-ruido>
- Ayuntamiento de Leganés (2011). *Mapa estratégico de ruido de la ciudad de Leganés*. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid.
- Bernabé, M.A.; Manso, M.A. y González, M.E. (2007). La docencia universitaria sobre infraestructura de datos espaciales. *Revista Cartográfica*, 83, 17-35.
- Celik, O.Y.; Yalcin, S y Öztürk, A. (1998). Noise parameters in industrial workers exposed. *Auris Nasus Larynx*, 25(4) 369-375.
- Chávez M., J.R. (2006). Ruido: efectos sobre la salud y criterio de su evaluación al interior de recintos. *Ciencia & Trabajo*, 8(20), 42-46.

- Chen, K.; Miao, F.; Yang, W. y Xirong, G. (2011). Research on meteorological data display based on G/S model. *IEEE*, 683-686.
- Denisov, E.I. y Suvorov, G. (2001). Medición del ruido y evaluación de la exposición. En J. M. Stellman, M. McCann y L. Warshaw. *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo* (p. 47.6-47.8). Organización Internacional del Trabajo.
- D'Hondt, E.; Stevens, M. y Jacobs, A. (02 de octubre de 2013). Participatory noise mapping works! An evaluation of participatory sensing as an alternative to standard techniques for environmental monitoring. *Pervasive and Mobile Computing*, 9(5), 681-694.
- Díaz A., J. (2006). El ruido en el trabajo: alcance de un problema global. (39). Recuperado el 21 de noviembre de 2013, de: [http://www.construmatica.com/construpedia/El\\_Ruido\\_en\\_el\\_Trabajo.\\_Alcance\\_de\\_un\\_Problema\\_Global](http://www.construmatica.com/construpedia/El_Ruido_en_el_Trabajo._Alcance_de_un_Problema_Global)
- Driscoll, D.P. (2001). Técnicas de control del ruido. En: J.M. Stellman, M. McCann y L. Warshaw. *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo* (pp. 47.8-47.12). Organización Internacional del Trabajo.
- Echeverri L., C.A. (2011). Protocolo para medir la emisión de ruido generado por fuentes fijas. *Revista Ingenierías*, 10(18), 51-60.
- Eleftheriou, P.C. (2002). Industrial noise and its effects on human hearing. *Applied Acoustics*, 63(1) 35-42.
- Esparza R., L.G. (2006). Los datos, fundamento de una Infraestructura de Datos Espaciales. La experiencia mexicana. *Revista Cartográfica*, 82, 9-18.
- Gobierno Vasco (1 de mayo de 2005). *Sistema de consulta, información y gestión de focos de ruido ambiental. Guía metodológica para la realización de mapas de ruido*. Comunidad Autónoma Vasca, España: Departamento de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente.
- Gómez M., M.J. (2012). Ruido industrial: efectos en la salud de los trabajadores expuestos. *Revista CES Salud Pública*, 3(2), 174-183.
- Guevara, H.; Lugo, F.; Cardozo, R.; González, S.; Ortuño, M.; Sánchez, C. y Rivero, E. (2008). Exposición a ruido, solventes orgánicos y capacidad auditiva de trabajadores de una empresa papelera. *Revista Informe Médico*, 10(3), 149-158.
- Hernández, D.A. y González, M.B. (2008) Alteraciones auditivas en trabajadores expuestos al ruido industrial. *Medicina Seguridad Trabajo*, 53(208), 1-11.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas (Icontec) (1992). *NTC 3428, Sonómetros-Medidores de la intensidad de sonido*, 2-22.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2000). *Acta de Acuerdo ICDE No. 1*.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2001). *Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales (ICDE)*. Cartagena de Indias.
- ISO 2204. (1979). *International Organization for Standardization*. Recuperado el 17 de septiembre de 2013, de: [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail.htm?csnumber=7007](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=7007).
- ISO 3740 (2000). *Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources — Guidelines for the use of basic standards*. International Organization for Standardization. Recuperado el 20 de 07 de 2013, de [http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=1260](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=1260)
- ISO 3744. (2010). *Acoustics — Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure — Engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane*. International Organization for Standardization. Recuperado el 19 de octubre de 2013, de: [http://www.iso.org/iso/iso\\_catalogue/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=52055](http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=52055)
- ISO 3746. (2010). *Acoustics — Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure — Survey method using an enveloping measurement surface over a reflecting plane*. International Organization for Standardization. Recuperado el 27 de octubre de 2013, de: [http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=52056](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=52056)
- ISO 9613. (1993). *Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere*. International Organization for Standardization. Recuperado el 24 de julio de 2013, de: [http://www.iso.org/iso/iso\\_catalogue/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=17426](http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=17426)

- Martínez S. y Moreno.J. (2005). Análisis espacio-temporal con SIG del ruido ambiental urbano en Madrid y sus distritos. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 5, 219-249.
- Martínez, M.D. (1995). Efectos del ruido por exposición laboral. *Salud de los Trabajadores*, 3(2), 93-101.
- Mehrdad, R.M. (2011). Relationship between Exposure to Industrial Noise and Serum Lipid Profile. *Acta Medica Iranica*, 49(11), 725-729.
- Miranda, J.P.; Ubaque, C.A. y Pinzón, J.P. (2015). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. *Tecnura*, 149- 164.
- Molina, A.M. (2008). Sistema de Información Geográfica para el Análisis de la Distribución Geográfica de la Malaria. *EIA*, 9, 91-111.
- Moreno, R.R.; Martínez, D.A. y Rivero, P.D. (2006). Pesquisa auditiva en trabajadores expuestos al ruido industrial. *Revista Cubana Medicina General Integrada*, 22(3).
- Otárola, M.F.; Otárola, Z.F. y Finkelstein, K. A. (2006). Ruido laboral y su impacto en salud. *Ciencia & Trabajo*, 8(20), 47-51.
- Pacheco G., A. (2012). El índice de erosión potencial en la vertiente norte del Waraira Repano. *Revista Colombiana de Geografía*, 21(2), 85-97.
- Parlamento Europeo (18 de julio de 2002). *Diario oficial de las comunidades europeas*. Recuperado el 21 de 11 de 2013, de: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2002:189:0012:0012:ES:PDF>
- Pavón, I. y Recuero, M. (2006). *Noise maps: a tool for the demarcation of risk areas of noise exposure in the surface mining industry*. Ponencia en la ICSV13 The Thirteenth International Congress on Sound and Vibration. Viena.
- Peña L., J. (2010). *Sistemas de gestión geográfica aplicados a la gestión del territorio*. San Vicente (Alicante): Editorial Club Universitario.
- Pierrette, M.; Marquis-Favre, C.; Morel, J.; Rioux, L.; Vallet, M.; Viollon, S. y Moch, A. (17 de enero de 2012). Noise annoyance from industrial and road traffic combined noises: A survey and a total annoyance model comparison. *Journal of Environmental Psychology and a total annoyance model comparison*, 32(2), 178-186.
- Ravikumar, K. y Gnanabaskaran, A. (2010). ACO based spatial Data Mining for Traffic Risk Analysis. *IEEE. International Conference on Innovative Computing Technologies*, 1-6.
- Recuero, M.; Gil, C. y Grundman, J. (1996). Mapa de ruido de San Sebastián de los Reyes. Metodología de medidas y resultados. *Revista de Acústica*, Número extraordinario, 51-54.
- Romeu, J. y Jiménez, S. (2006). Spatial sampling for night levels estimation in urban environments. *Journal of the Acoustical Society of America*, 120(2), 791-800.
- Sánchez, V.M. y Albornoz, V.C. (2006). Estrategia frente a la problemática del ruido ocupacional. *Ciencia & Trabajo*, 8(20), 58-64.
- Sayed A., A. (2011). Levels of industrial noise and annoyance in Egypt. *Applied Acoustics*, 72(4),221-225.
- Secretaría Distrital del Medio Ambiente (SDMA) (2013). Información general sobre la problemática de ruido. Recuperado el 17 de octubre de 2013, de: <http://ambientebogota.gov.co/ruido>
- Segués, E.F. (23 de marzo de 2005). *Estrategia de elaboración de un mapa de ruido*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Recuperado el 20 de 09 de 2013, de: <http://www.vitoria-gasteiz.org/wb021/http/contenidosEstaticos/adjuntos/38988.pdf>
- Shigiang, W.; Ruixiang, S.; Kun, Y. y Yu, W. (2008). The research of noise induced tympanic membrana perforation in cotton textile industry. *IEEE. Conference publications*, 1587-1790.
- Simón, F., Morales, E., y otros. (20 de 10 de 2008). *Caracterización del ruido de la ciudad de Belem*. Acustica 2008, Universidad de Coimbra. 1-8. Recuperado el 02 de noviembre de 2013, de: [http://digital.csic.es/bitstream/10261/8157/1/Caracterizacion\\_ruido\\_Belem.pdf](http://digital.csic.es/bitstream/10261/8157/1/Caracterizacion_ruido_Belem.pdf)
- Sommerhoff, J.; Recuero, M. y Suárez, E. (2004). Community noise survey of the city of Valdivia, Chile. *Applied Acoustics*, 65(4), 643-656.
- Subroto S. y Dhattrak, S.V. (2008). Occupational noise-induced hearing loss in India. *Indian Journal of*

- Occupational and Environmental Medicine*, 12, 53-56.
- Suebsak, N.; Tawan S. y Supphawat, B. (1999). Analytical procedure for constructing noise contours. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 23(1-2), 123-127.
- Suter, A.H. (2001). Naturaleza y efectos del ruido. En: J.M. Stellman, M. McCann y L. Warshaw, *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo* (pp. 472-476). Organización Internacional del Trabajo.
- Wu, Q.; Yang, X.; Liu, H. y Dong, H. (2008). Mobile Guardian: A novel positioning and monitoring system for outdoor special users based on GPS. *IEEE International Symposium*, 560-600.
- Ye, O.; Zang, J. y Li, J. (06 de 2011). The application and research of data mapping in spatial-relational database. *IEEE. Computer Science and Service System (CSSS)*, 2011 (pp. 791-794).





UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

## INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

Revista *TECNURA*  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Facultad Tecnológica

### CONTENIDO

- Alcance y política editorial de la revista
- Tipos de artículos aceptados
- Formato del artículo
- Envío de artículos
- Procedimiento para la publicación
- Arbitraje de artículos
- Contacto

### 1. ALCANCE Y POLÍTICA EDITORIAL DE LA REVISTA

La revista *Tecnura* es una publicación institucional de la Facultad Tecnológica de la Universidad Francisco José de Caldas, de carácter científico-tecnológico con periodicidad trimestral, que se publica los meses de enero, abril, julio y octubre. Su primer número apareció en el segundo semestre del año 1997 y hasta la fecha ha mantenido su regularidad.

Las áreas temáticas de interés de la revista *Tecnura* están enfocadas a todos los campos de la ingeniería, como la electrónica, telecomunicaciones, electricidad, sistemas, industrial, mecánica, catastral, civil, ambiental, entre otras. Sin embargo, no se restringe únicamente a estas, también tienen cabida los temas de educación y salud, siempre y cuando estén relacionados con la ingeniería. La revista publica únicamente artículos de investigación científica y tecnológica, de reflexión y de revisión. En consecuencia, durante la fase de evaluación editorial inicial se rechazarán los artículos cortos y reportes de caso.

La revista *Tecnura* está dirigida a docentes, investigadores, estudiantes y profesionales

interesados en la actualización permanente de sus conocimientos y el seguimiento de los procesos de investigación científico-tecnológica, en el campo de las ingenierías. Tiene como misión divulgar resultados de proyectos de investigación realizados en el área de las ingenierías, a través de la publicación de artículos originales e inéditos, realizados por académicos y profesionales pertenecientes a instituciones nacionales o extranjeras del orden público o privado. Los artículos presentados deben ser trabajos inéditos escritos en español o inglés; sin embargo, tendrán preferencia los artículos que muestren conceptos innovadores de gran interés, que traten sobre asuntos relacionados con el objetivo y cobertura temática de la revista.

*Tecnura* es una publicación de carácter académico indexada en el Índice Bibliográfico Nacional Publindex (IBN) de Colciencias (Colombia) en la categoría A2, en los Índices Regionales Scielo Colombia (Colombia) y Redalyc (México), además de las siguientes bases bibliográficas: INSPEC del Institution of Engineering and Technology (Inglaterra), Fuente Académica Premier de EBSCO (Estados Unidos), CABI (Inglaterra), Index Corpernicus (Polonia), Informe Académico de Gale Cengage Learning (México), Periódica de la Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (España) y Dialnet de la Universidad de la Rioja (España). También hace parte de los siguientes directorios: Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal Latindex (México), Índice Bibliográfico Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (España), DOAJ (Suecia), Ulrich de Proquest (Estados Unidos).



*Tecnura* es una revista arbitrada mediante un proceso de revisión entre pares de doble ciego. La periodicidad de la conformación de sus comités Científico y Editorial está sujeta a la publicación de artículos en revistas indexadas internacionalmente por parte de sus respectivos miembros.

La Universidad Distrital Francisco José de Caldas, sus directivas, el Editor, el Comité Editorial y Científico no son responsables por la opinión y criterios expresados en el contenido de los artículos y estos se publican bajo la exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento del Comité Editorial.

Además de la versión impresa, la revista *Tecnura* tiene también una versión digital disponible en su página web: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

## 2. TIPOS DE ARTÍCULOS ACEPTADOS

De acuerdo con la clasificación del Índice Nacional de Publicaciones Científicas y Tecnológicas (Publindex-Colciencias), la revista *Tecnura* recibe postulaciones de artículos inéditos de los siguientes tipos:

**Artículos 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.

**Artículos de reflexión:** documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico y recurriendo a fuentes originales.

**Artículo de revisión:** documento resultado de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de las 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 al menos 50 referencias.

## 3. FORMATO DEL ARTÍCULO

### 3.1 Del lenguaje y estilo apropiado para la redacción de artículos

- Deben emplearse estructuras de oraciones simples, evitando las que sean demasiado largas o complejas.
- El vocabulario empleado debe ser básico y común. Los términos técnicos deben explicarse brevemente; asimismo, el significado de las siglas debe presentarse la primera vez que estas aparecen en el texto.
- Los autores son responsables de que su trabajo sea conducido de una manera profesional y ética.

### 3.2 De la extensión de los documentos

Los artículos no deben tener una extensión de más de 25 páginas en tamaño carta y a doble espacio, con márgenes simétricas de 3 cm. Solo en el caso de los artículos de revisión las 25 páginas no incluyen las referencias bibliográficas.

### 3.3 Del formato de presentación

Los artículos presentados deben ser trabajos inéditos escritos en español o inglés y deben digitalizarse en Microsoft Word (2003 en adelante), cumpliendo con las siguientes indicaciones:

Letra *Times New Roman* de 12 puntos (a excepción de que se requiera lo contrario para algunos apartados).

- Una columna a doble espacio.
- Todas las márgenes de 3 cm.
- Los párrafos se justifican, y no debe haber espacio entre los consecutivos.
- No incluir saltos de página o finales de sección.
- Si se desea resaltar palabras o frases del texto, no usar letra negrita sino letra cursiva.
- Los decimales se deben señalar con coma (,) y no con un punto.

- Los millares y millones se deben señalar con un espacio fino.
- Evitar las notas de pie de página.
- Se debe utilizar nomenclatura arábica hasta el tercer nivel únicamente.

### 3.4 De la estructura del documento

Los trabajos deben tener la siguiente estructura y cumplir con los siguientes requisitos:

#### *Composición de un artículo*

Todos los artículos remitidos para su evaluación y posible publicación por parte de la revista *Tecnura* deben tener por lo menos los siguientes componentes:

- Título en español e inglés.
- Información de los autores.
- Resumen en español e inglés.
- Palabras clave en español e inglés.
- Introducción.
- Conclusiones.
- Trabajo futuro (opcional).
- Agradecimientos (opcional).
- Referencias bibliográficas.

Si el artículo es de investigación científica y tecnológica deben tener, además de lo anterior, los siguientes componentes:

- Metodología.
- Resultados.
- Financiamiento.

#### *Título*

El título del artículo deberá ser corto o dividido en título y subtítulo, atractivo para el lector potencial y escrito en mayúscula sostenida. Este debe aparecer centrado entre las márgenes, escrito con letra *Times New Roman*, en negrita, tamaño de fuente 18. El título del artículo debe ir en español e inglés separado por un espacio doble. Máximo 20 palabras.

#### *Autores*

Después del título debe escribirse el (los) nombre(s) completo(s) del (los) autor(es), acompañado de los datos biográficos básicos: título de pregrado, título de posgrado, ocupación o cargo, afiliación institucional (institución donde labora), dependencia, ciudad, país y correo electrónico. La información anterior debe ir inmediatamente debajo del nombre del autor.

#### *Resumen*

Debe establecer el objetivo y alcance del trabajo, una descripción clara y concisa de la metodología, los resultados y las conclusiones obtenidas. Máximo 250 palabras.

#### *Palabras clave*

Debe escogerse entre tres y diez palabras clave, escritas en español con letra *Times New Roman*, en negrita y cursiva.

Las palabras clave deben estar escritas en orden alfabético y ser de uso estandarizado, para lo cual se sugiere utilizar bases de datos internacionales según el área del conocimiento. Por ejemplo, en el área de Eléctrica y Electrónica se sugiere utilizar el tesoro de la UNESCO que se pueden encontrar en la página: <http://databases.unesco.org/thessp>.

#### *Abstract*

Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés del texto que aparece en el resumen en español.

#### *Keywords*

Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés de la lista de palabras clave en español.

Las *keywords* deben estar escritas en el orden de las palabras clave y ser de uso estandarizado, para lo cual se sugiere utilizar bases de datos internacionales según el área del conocimiento. Por ejemplo, en el área de Eléctrica y Electrónica se sugiere utilizar los Tesoros de la IEEE y/o World Bank que se pueden encontrar en las siguientes páginas respectivamente: [http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy\\_v101.pdf](http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy_v101.pdf), <http://multites.net/mtsql/wb/site/default.asp>

### *Introducción*

Debe describir el planteamiento general del trabajo, así como contexto, antecedentes, estado de arte de la temática abordada, objetivo y posible alcance del trabajo.

### *Metodología*

La redacción de este apartado debe permitir a cualquier profesional especializado en el tema replicar la investigación.

### *Resultados*

Explicación e interpretación de los hallazgos. Si es necesario, se puede presentar una discusión breve y enfocada a la interpretación de los resultados.

### *Conclusiones*

Implicación de los resultados y su relación con el objetivo propuesto.

### *Financiamiento*

Mencionar la investigación asociada de la cual se derivó el artículo y la entidad que avaló y financió dicha investigación.

### *Agradecimientos*

Preferiblemente deben ser breves y deben incluir los aportes esenciales para el desarrollo del trabajo.

### *Ecuaciones*

Deben aparecer centradas con respecto al texto principal. Las ecuaciones deben ser referenciadas con números consecutivos (escritos entre paréntesis cerca al margen derecho). Las ecuaciones se citan en el texto principal empleando la palabra ecuación y seguida del número entre paréntesis. Las ecuaciones deben ser elaboradas en un editor de ecuaciones apropiado y compatible con el paquete de software InDesign, por ejemplo, el editor de ecuaciones de Windows.

### *Tablas*

Para el caso de realización de tablas se recomienda que estas no sean insertadas como imágenes,

considerando que en este formato no pueden ser modificadas. El encabezado de cada tabla debe incluir la palabra Tabla (en negrita) seguida del número consecutivo correspondiente y de un breve nombre de la tabla. El encabezado debe estar escrito con letra Times New Roman, en cursiva y tamaño de fuente 9.

No se presentan cuadros sino tablas y estas se deben levantar automáticamente desde el procesador de textos. Las tablas deben ir nombradas y referenciadas en el artículo, en estricto orden. Toda tabla debe tener en su parte inferior la fuente de la que fue tomada, o mencionar que es autoría de los autores si es el caso.

### *Figuras*

Todas las figuras o fotografías deben enviarse en formato PNG o TIFF con una resolución mínima de 300 DPI, adaptadas a escala de grises.

El pie o rótulo de cada figura debe incluir la palabra Figura (en negrita) seguida del número consecutivo correspondiente y de una breve descripción del contenido de la figura. El pie de figura debe estar escrito con letra Times New Roman, en cursiva y tamaño de fuente 9. Las figuras deben ir nombradas y referenciadas en el artículo, en estricto orden. Toda figura debe tener también la fuente de la que fue tomada, o mencionar que es autoría de los autores si es el caso.

### *Símbolos*

Los símbolos de las constantes, variables y funciones en letras latinas o griegas –incluidos en las ecuaciones– deben ir en cursiva; los símbolos matemáticos y los números no van en cursiva. Se deben identificar los símbolos inmediatamente después de la ecuación. Se deben utilizar las unidades, dimensiones y símbolos del sistema internacional.

Cuando se empleen siglas o abreviaturas, se debe anotar primero la equivalencia completa, seguida de la sigla o abreviatura correspondiente entre paréntesis y en lo subsecuente se escribe solo la sigla o abreviatura respectiva.

### Referencias bibliográficas

El estilo de citación de referencias adoptado por la revista **Tecnura** es APA sexta edición. Las citas, referencias bibliográficas e infografía se incluyen al final del artículo. Las referencias bibliográficas deben ordenarse alfabéticamente de acuerdo con el primer apellido del primer autor, sin numeración.

Solo deben aparecer las referencias que fueron citadas en el texto principal del trabajo, en las tablas o en las figuras. Es decir, en la lista no deben aparecer otras referencias aunque hayan sido consultadas por los autores para la preparación del trabajo. Sugerimos utilizar herramientas como: *Citas y bibliografía* de Microsoft Word (para APA sexta edición versión 2013 o superior), *Zotero*, *Mendeley*, entre otras.

El llamado de una referencia bibliográfica se inserta en el texto, en el punto pertinente, bajo ciertas características:

- Si la oración incluye el apellido del autor, solo se debe escribir la fecha dentro de un paréntesis, ejemplo:  
Cuando Vasco (2012), analizó el problema de presentado en ....
- Cuando no se incluye el autor en la oración, debe ir entre el paréntesis el apellido y la fecha.  
La investigación de materiales dio una visión en el área (Martínez, 2012).
- Si el documento u obra tiene más de dos autores, se debe citar la primera vez con todos los apellidos.  
1990. (Fernández Morales, Villa Krieg & Caro de Villa, 2008) ....
- En las menciones siguientes, solo se debe escribir el primer apellido del autor, seguido de un "et al".  
En cuanto al estudio de las aguas, Fernández Morales et al. (2008) encontraron que ...
- Cuando el documento u obra tiene más de seis autores, se debe utilizar desde la primera mención el "et al".

A continuación se describen una serie de ejemplos de las referencias más utilizadas, según

el estilo de referencias adoptado por la revista *Tecnura*:

### Publicaciones Periódicas:

#### Forma Básica

Apellidos, A. A., Apellidos, B. B. & Apellidos, C. C. (Fecha). Título del artículo. *Título de la publicación*, volumen (número), pp. xx-xx. doi: xx.xxxxxxx

#### Artículo básico

Guevara López, P., Valdez Martínez, J., Agudelo González, J., & Delgado Reyes, G. (2014). Aproximación numérica del modelo epidemiológico SI para la propagación de gusanos informáticos, simulación y análisis de su error. *Revista Tecnura*, 18(42), 12 -23. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.4.a01>

#### Artículo web

Rodríguez Páez, S., Fajardo Jaimes, A., & Páez Rueda, C. (2014). Híbrido rat-race miniaturizado para la banda ISM 2,4 GHZ. *Revista Tecnura*, 18(42), 38-52. Recuperado de <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/8059/9675>

### Libros:

#### Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). *Título*. Ciudad: Editorial.  
Apellidos, A. A. (Año). *Título*. Recuperado de <http://www.xxxxxx.xxx>  
Apellidos, A. A. (Año). *Título*. doi: xx.xxxxxxx  
Apellidos, A. A. (Ed.). (Año). *Título*. Ciudad: Editorial.

#### Libro con autor

Goleman, D. (2000). *La inteligencia emocional: Por qué es más importante que el cociente intelectual*. México: Ediciones B.

#### Libro con editor:

Castillo Ortiz, A. M. (Ed.). (2000). *Administración educativa: Técnicas, estrategias y prácticas gerenciales*. San Juan: Publicaciones Puertorriqueñas

### **Libro versión electrónica:**

Montero, M. & Sonn, C. C. (Eds.). (2009). *Psychology of Liberation: Theory and applications*. [Versión de Springer]. doi: 10.1007/978-0-387-85784-8

### **Informe técnico:**

Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). *Título*. (Informe Núm. xxx). Ciudad: Editorial

### **Informe con autores**

Weaver, P. L., & Schwagerl, J. J. (2009). U. S. *Fish and Wildlife Service refuges and other nearby reserves in Southwestern Puerto Rico*. (General Technical Report IITF-40). San Juan: International Institute of Tropical Forestry.

### **Informe de una agencia del gobierno**

Federal Interagency Forum on Child and Family Statistics. *America's Children: Key National Indicators of Well-Being, 2009*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office. Recuperado de <http://www.childstats.gov/pubs/index.asp>

### **Tesis**

Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). *Título*. (Tesis inédita de maestría o doctorado). Nombre de la institución, Localización.

### **Tesis inédita, impresa**

Muñoz Castillo, L. (2004). *Determinación del conocimiento sobre inteligencia emocional que poseen los maestros y la importancia que le adscriben al concepto en el aprovechamiento de los estudiantes*. (Tesis inédita de maestría). Universidad Metropolitana, San Juan, PR.

### **Tesis de base de datos comercial**

Santini Rivera, M. (1998). *The effects of various types of verbal feedback on the performance of selected motor development skills of adolescent males with Down syndrome*. (Tesis doctoral). Disponible

en la base de datos ProQuest Dissertations and Theses. (AAT 9832765).

### **Tesis web**

Aquino Ríos, A. (2008). *Análisis en el desarrollo de los temas transversales en los currículos de español, matemáticas, ciencias y estudios sociales del Departamento de Educación*. (Tesis de maestría, Universidad Metropolitana). Recuperado de [http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis\\_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf](http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf)

### **Estándares o patentes**

Forma Básica

Apellidos, A. A. Título de la patente. País y número de la patente. Clasificación de la patente, fecha de concesión oficial. Número y fecha de solicitud de la patente, paginación.

Hernández Suárez, C. A., Gómez Saavedra, V. A., & Peña Lote, R. A. Equipo medidor de indicadores de calidad del servicio de energía eléctrica para usuario residencial. Colombia., 655. G4F 10/0, 15 de Marzo 2013. 27 de Octubre 2011, 147

## **4. ENVÍO DE ARTÍCULOS**

Los autores deben enviar sus artículos a través de la aplicación para tal fin del Open Journal System en formato digital, adjuntando la carta de presentación y el formato de información artículo-autores.

### **4.1 Carta de presentación**

El artículo debe ir acompañado de una carta de presentación dirigida al director y editor de la revista, Ing. Cesar Augusto García Ubaque, donde incluya:

- Solicitud expresa de considerar su artículo para publicarlo en la revista Tecnura.
- Título completo del trabajo.
- Nombres completos de todos los autores del trabajo.
- Certificación de la originalidad y el carácter inédito del trabajo.

- Exclusividad de su remisión a la revista *Tecnura*.
- Confirmación de la autoría con la firma de todos los autores.

Esta carta deberá estar firmada por todos los autores, escanearse y enviarse junto con los demás documentos solicitados.

#### 4.2 Formato de información artículo-autores

El artículo además debe ir acompañado de un formato de información sobre el artículo y sus autores, el cual se puede descargar de la página web de la revista *Tecnura*: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>, en la sección "Formatos y Documentos". Es importante completar todos los campos de información solicitados, algunos de ellos tienen comentarios para aclarar mejor lo que se está solicitando. El formato no debe escanearse.

#### 4.3 Artículo

Artículo en formato digital (Word 2003 en adelante) que cumpla con todas las normas de presentación descritas en el capítulo 3, "Formato del artículo", de la presente en las instrucciones a los autores.

### 5. PROCEDIMIENTO PARA LA PUBLICACIÓN

El procedimiento que sigue la revista *Tecnura* para la evaluación y posible publicación de los trabajos enviados por los autores es el siguiente en orden cronológico:

1. Envío del artículo acompañado de la carta de presentación y el formato de información por parte de los autores.
2. Notificación al autor de correspondencia de la recepción del artículo.
3. Verificación del tema del artículo con respecto a las áreas de interés de la revista.
4. Verificación de las normas de presentación por parte del monitor de la revista.
5. Notificación al autor de correspondencia de la evaluación de las normas de presentación.

6. Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a la evaluación de las normas de presentación.
7. Envío del artículo a los árbitros seleccionados.
8. Notificación del inicio del proceso de arbitraje del artículo.
9. Notificación a los autores de la decisión tomada por el Comité Editorial y de las evaluaciones hechas por los árbitros.
10. Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a las evaluaciones de los árbitros.
11. Estudio de la versión final del artículo y de las evaluaciones de los árbitros por parte del Comité Editorial.
12. Envío por parte de los autores de la carta de cesión de derechos al editor de la revista.
13. Envío de la versión con corrección de estilo y diagramada a los autores.
14. Verificación de errores y aprobación final de la versión con corrección de estilo y diagramada por parte de los autores.
15. Publicación del artículo en el número correspondiente de la revista *Tecnura*.
16. Notificación a los autores de la publicación del número de interés.
17. Envío de un ejemplar de la revista a cada autor del artículo publicado.

### 6. PROCESO DE ARBITRAJE DE ARTÍCULOS

Considerando la periodicidad trimestral de la revista, el Comité Editorial realiza cuatro convocatorias anuales para la recepción de artículos, aproximadamente en los meses de febrero, mayo, agosto y noviembre. Los artículos serán recibidos hasta la fecha máxima establecida en cada convocatoria.

Una vez recibidos los artículos el monitor de la revista realizará una primera evaluación de forma para verificar que cumplan con todos los elementos mencionados en esta guía de instrucciones a los autores. Luego de recibir nuevamente el artículo con las correcciones de forma solicitadas por el

monitor de la revista, este será sometido a evaluación por tres pares académicos (paulatinamente se espera incorporar un mayor número de pares externos que participen en el proceso).

Cada artículo remitido a la revista *Tecnura* es revisado por dos pares académicos externos a la institución de los autores, mediante un proceso de "revisión entre pares" (*Peer-review*) de doble-ciego, garantizando el anonimato de los autores y evaluadores; se considera confidencial todo trabajo recibido y así se le exige a sus evaluadores.

Las posibles conclusiones de los resultados de la evaluación por parte de los árbitros son únicamente tres: publicar el artículo sin modificaciones, publicar el artículo con modificaciones o no publicar el artículo.

Posteriormente, el Comité Editorial toma la decisión de publicar o no los artículos, con base en los resultados de las evaluaciones realizadas por los árbitros asignados. En caso de existir contradicciones en las evaluaciones con respecto a la publicación de un artículo, el Comité Editorial enviará el artículo a un tercer árbitro y se inclinará por las dos evaluaciones que tengan el mismo concepto respecto a la publicación del artículo.

En cada convocatoria el autor de correspondencia debe sugerir al menos cuatro posibles evaluadores externos a su institución laboral, los cuales deben ser especialistas en el tema específico del artículo remitido, tener al menos maestría y por lo menos dos deben ser internacionales. Los posibles evaluadores pueden pertenecer a una universidad o industria, pública o privada; de estos se debe proporcionar el nombre completo, su formación académica más alta, su afiliación institucional y su correo electrónico. Estos cuatro potenciales

evaluadores serán analizados por el Comité Editorial a fin de ampliar la base de datos de los árbitros de la revista *Tecnura*.

El Comité Editorial de la revista *Tecnura* se reserva los derechos de impresión, reproducción total o parcial del artículo, así como el de aceptarlo o rechazarlo. Igualmente, se reserva el derecho de hacer cualquier modificación editorial que estime conveniente; en tal caso el autor recibirá por escrito recomendaciones de los evaluadores. Si las acepta, deberá entregar el artículo con los ajustes sugeridos dentro de las fechas fijadas por la revista para garantizar su publicación dentro del número programado.

## 6. CONTACTO

Para cualquier solicitud de información adicional puede comunicarse a través del correo electrónico de la revista *Tecnura*: [tecnura@udistrital.edu.co](mailto:tecnura@udistrital.edu.co), [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com), o por mensajería con el Ing. Cesar Augusto García Ubaque, Director y Editor de la revista *Tecnura*, a la dirección:

Revista Tecnura

Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305.

Facultad Tecnológica

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Transversal 70 B N. 73 a 35 sur

Teléfono: 571 – 3238400 Extensión: 5003

Celular: 57-3153614852

Bogotá D.C., Colombia

Email:

[tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co](mailto:tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co), [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com)

Página web:

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



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

## INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

### *Tecnura journal* District francisco José de caldas university Faculty of technology

#### CONTENT

- **Scope and editorial policy of the journal**
- **Type of accepted articles**
- **Article format**
- **Article submission**
- **Publication procedure**
- **Article arbitration**
- **Contact**

#### SCOPE AND EDITORIAL POLICY OF THE JOURNAL

*Tecnura journal* is an institutional publication of the Faculty of Technology from University Francisco José de Caldas. It is a scientific and technological publication with quarterly periodicity, which is published in January, April, July and October. The first issue appeared in the second semester of 1997 and up to now it has maintained its regularity.

The areas of interest of *Tecnura journal* are focused on all engineering fields such as electronics, telecommunications, electricity, systems, industrial, mechanics, cadastral, civil, environmental, among others. However, it is not restricted to those; it also has room for education and health issues, as long as they are related to engineering. The journal will only publish concerning scientific and technological research, reflection and revision. In consequence, during the initial editorial evaluation, short articles and case reports will be rejected.

*Tecnura Journal* is addressed for professors, researchers, students and professionals interested in permanent update of their knowledge and follow-up of scientific-technologic processes in the field of engineering. *Tecnura Journal* has as mission to disseminate results of research projects in

the areas of engineering, through the publication of original and unpublished articles, conducted by academics and professionals accredited by public or private national or foreign institutions. Articles submitted to *Tecnura journal* must be unpublished works written in Spanish or English; nevertheless, preference will be given to articles that show innovative concepts of great interest, related to the objective and scope of the journal.

*Tecnura* is an academic publication indexed in the Índice Bibliográfico Nacional Publindex (IBN) from Colciencias (Colombia) at the category A2, in the Regional Index Scielo Colombia (Colombia) and Redalyc (México); as well as of the following bibliographic databases: INSPEC of the Institution of Engineering and Technology (England), Fuente Académica Premier of EBSCO (United States), CABI (England), Index Copernicus (Poland), Informe Académico of Gale Cengage Learning (México), Periódica from the Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (Spain) and Dialnet from the Universidad de la Rioja (Spain). It is also part of the following directories: Online Regional Information System for Scientific journals from Latin America, Caribbean, Spain and Portugal Latindex (México), Bibliographic Index Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (Spain), DOAJ (Sweden) and Ulrich of Proquest (United States).

*Tecnura* is a journal arbitrated by a revision process among double blind peers. The schedule of the conformation of its scientific and editorial committee is subject to the publication of articles in internationally indexed journals by their members.

District University Francisco José de Caldas, its directors, the editor, the editorial and scientific committee are not responsible for the opinions and the criteria expressed in the content of the articles



and they are published under the exclusive responsibility of the authors and do not necessarily reflect the ideas of the editorial committee.

In addition to the printed version, Tecnura journal also has a digital version available in its web page: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>

## TYPE OF ARTICLES ACCEPTED

According to the classification of the Scientific and Technological Publications National Index (Publindex-Colciencias), *Tecnura* journal receives nominations of unpublished articles on the following topics:

- ***Scientific and technological research articles:*** document that presents, in a detailed manner, the original results of research projects. The generally used structure contains four main parts: introduction, methodology, results and conclusions.
- ***Reflection articles:*** document that presents research results from an analytic, interpretative or critic perspective from the author, dealing with a specific topic and adopting original sources.
- ***Review article:*** document that results from a research where the results of published or unpublished research on a science or technology field are analyzed, systematized and integrated, in order to state the advances and tendencies in development. It is characterized for presenting a careful bibliographical review of at least 50 references.

## ARTICLE FORMAT

### About the appropriate language and style for articles writing

- Authors must use simple sentence structures, avoiding those too long or complex.
- The vocabulary used must be basic and common. Technical language must be briefly explained; also, the meaning of the acronyms must be given the first time they appear in the text.
- The authors are responsible for their work to be conducted in a professional and ethic manner.

### About the length of articles

The articles should not exceed 25 pages in letter size and double space, with symmetric margins of 3 cm. Only in the case of review articles, these 25 pages do not include references.

### About the presentation format

Submitted articles must be unpublished works written in Spanish or English, and must be typed in Microsoft Word (2003 and beyond), complying with the following indications:

- *Times New Roman* letter, 12 point (except it is required for some sections).
- One column, double-spaced.
- All the margins 3 cm.
- Paragraphs should be justified without spaces between consecutives and without cutting words.
- Do not include page breaks or section finals.
- If you want to emphasize words or phrases from the text, do not use bold letters but italic.
- Decimals should be pointed with comma (,) and not with period (.).
- Thousands and millions should be pointed with a fine space.
- Avoid footnotes.
- Arabic nomenclature must be used only until the third level.

### About the article structure

The papers must have the following structure and comply with the following requirements:

### Composition of an article

All the articles submitted for evaluation and possible publication by the Tecnura Journal must have at least the following components:

- Title in Spanish and English.
- Information about the authors.
- Abstract in Spanish and English.

- Key words in Spanish and English.
- Introduction.
- Conclusions.
- Future work (optional).
- Acknowledgements (optional).
- Bibliographical references.

If the article is related to scientific and technological research must have, in addition to the above, the following components:

- Methodology.
- Results.
- Financing.

### *Title*

The title of the article must be short or divided in title and subtitle, attractive for the potential reader and written in capital letters. It should appear centered between the margins, written in *Times New Roman* letter, in bold, font size 18. The title of the article has to be in Spanish and English separated by double space. Maximum 20 words.

### *Authors*

After the title the complete name(s) of the author(s) must be written, with their basic biographical data: undergraduate degree, graduate degree, occupation or position, institutional affiliation (institution where they work), dependency, city, country and e-mail. The above information must be immediately below the author's name.

### *Abstract*

The scope and purpose of the work must be established giving a clear and concise description of the methodology, results presented and the conclusions obtained. Maximum of 250 words.

### *Keywords*

Between three and ten keywords must be chosen, written in English with *Times New Roman* letter in bold and italic.

Key words must be written in alphabetic order and must be as standard as possible, for which it is suggested the use of international databases according to the area of knowledge. For example, in the area of Electrics and Electronics it is suggested to use the IEEE thesaurus and World Bank thesaurus that can be accessed at the following web pages respectively:

[http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy\\_v101.pdf](http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy_v101.pdf)

<http://multites.net/mtsql/wb/site/default.asp>

### *Abstract in Spanish*

Translation to the Spanish language of the text that appears in the abstract, it must be correct and precise.

### *Keywords in Spanish*

Translation to the English language of the keywords in Spanish, they must be correct and precise.

Keywords must be written in the order of the English version and must be as standard as possible, for which it is suggested the use of international databases according to the area of knowledge. For example, in the area of Electrics and Electronics it is suggested to use the UNESCO thesaurus that can be found at the following web pages:

<http://databases.unesco.org/thessp>

### *Introduction*

The general idea of the work must be described, its context, backgrounds, state of the art of the topic, objectives and possible scope of the work.

### *Methodology*

The writing of this part must allow any specialized professional in the topic to replicate the research.

### *Results*

Explanation and interpretation of the findings. If necessary, a brief discussion focused on the interpretation of the results can be presented.

### *Conclusions*

Implication of the results and their relation to the proposed objective.

### *Financing*

Mention the associated research from which the article was derived and the entity that endorsed and financed the research.

### *Acknowledgments*

They should preferably be brief and include the essential contributions for the development of the paper.

### *Equations*

Equations must appear centered with respect to the main text. They must be referenced with consecutive numbers (written in parenthesis close to the right margin). Equations are cited in the main text employing the word equation, and followed by the number in parenthesis. Equations must be made in an appropriate equation editor and compatible with "InDesign" software, as for example the equation editor of Windows.

### *Tables*

In the case of implementation of tables, it is recommended that these are not inserted as images, considering that in that format they cannot be modified. The title of each table must include the word table (in italic) followed by the corresponding consecutive number and a brief name of the table. The heading must be written in TNR letter, italic and font size 9.

Charts are not presented but tables and they should be automatically raised from the text processor. Tables should be named and referenced in the article, in strict order. Every table must have at the bottom the source from which it was taken, or to mention self-authorship if it is the case.

### *Figures*

All the figures or pictures have to be sent in JPG or PNG format with a minimum resolution of 300 DPI, adapted to gray scale.

The footnote or name of each figure must include the word figure (in italic) followed by the corresponding consecutive number and a brief description of the content of the figure. The footnote of the figure must be written in *Times New Roman* letter, italic and font size 9. Figures must be named and referenced in the article, in strict order. Every figure must have at the bottom the source from which it was taken, or to mention self-authorship if it is the case.

### *Symbols*

The symbols of the constants, variables and functions in Latin or Greek letters –included in the equations- must be in italic; the mathematical symbols and the numbers do not go in italic. The symbols must be identified immediately after the equation. Units, dimensions and symbols of the international system must be used

When using acronyms or abbreviations, the complete equivalence should be written first, followed by the corresponding acronym or abbreviation in parenthesis and from there it is only written the respective acronym or abbreviation.

### *Bibliographic references*

The adopted reference citation style by *Tecnura* journal is APA sixth edition. The cites, bibliographic references and infography are included in the last part of the article. The bibliographic references must be alphabetically ordered according to the author's first surname, without numbering.

There should only appear the cited references in the main body of the work, in tables or in figures. It means, in the list there should not appear other references although they have been consulted by the authors for the work preparation. We suggest using tools such as: Cites and bibliography from Microsoft Word (for APA sixth edition version 2013 or superior), Zotero, Mendeley, among others.

The call for a bibliographic reference is inserted in the text, at the pertinent point, under certain characteristics:

- If the sentence includes the author's surname, it should only be written the date into a parenthesis, for instance:

Cuando Vasco (2012), analizó el problema de presentado en ....

- When the author is not included in the sentence, surname and date must be into a parenthesis.

La investigación de materiales dio una visión en el área (Martínez, 2012).

- If the document or work has more than two authors, the first cite must include all the surnames. 1990. (Fernández Morales, Villa Krieg & Caro de Villa, 2008) ....

- In the following mentions, it must only be written the author's first surname, followed by "et al.".

En cuanto al estudio de las aguas, Fernández Morales et al. (2008) encontraron que ...

- When the document or work has more than six authors, it must be used from the first mention "et al.".

Next it is described a series of examples of the more used references, according to the reference style adopted by *Tecnura* journal:

### **Periodical Publications:**

#### Basic Form

Surnames, A. A., Surnames, B. B. & Surnames, C. C. (Date). Article's title. *Title of the publication*, volume (number), pp. xx-xx. doi: xx.xxxxxxx

#### Basic article

Guevara López, P., Valdez Martínez, J., Agudelo González, J., & Delgado Reyes, G. (2014). Aproximación numérica del modelo epidemiológico SI para la propagación de gusanos informáticos, simulación y análisis de su error. *Revista Tecnura*, 18(42), 12 -23. doi:http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.4.a01

#### Web article

Rodríguez Páez, S., Fajardo Jaimes, A., & Páez Rueda, C. (2014). Híbrido rat-race miniaturizado para la banda ISM 2,4 GHz. *Revista Tecnura*, 18(42),

38-52. Recuperado de <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/8059/9675>

### **Books:**

#### Basic Form

Surnames, A. A. (Year). *Title*. City: Editorial.

Surnames, A. A. (Year). *Title*. Recovered from <http://www.xxxxxx.xxx>

Surnames, A. A. (Year). *Title*. doi: xx.xxxxxxxx

Surnames, A. A. (Ed.). (Year). *Title*. City: Editorial.

#### Book with author

Goleman, D. (2000). *La inteligencia emocional: Por qué es más importante que el cociente intelectual*. México: Ediciones B.

#### Book with editor:

Castillo Ortiz, A. M. (Ed.). (2000). *Administración educativa: Técnicas, estrategias y prácticas gerenciales*. San Juan: Publicaciones Puertorriqueñas

#### Book electronic version:

Montero, M. & Sonn, C. C. (Eds.). (2009). *Psychology of Liberation: Theory and applications*. [Versión de Springer]. doi: 10.1007/ 978-0-387-85784-8

### **Technical report:**

#### Basic Form

Surnames, A. A. (Year). *Title*. (Report No. xxx). City: Editorial

#### Report with authors

Weaver, P. L., & Schwagerl, J. J. (2009). *U. S. Fish and Wildlife Service refuges and other nearby reserves in Southwestern Puerto Rico*. (General Technical Report IITF-40). San Juan: International Institute of Tropical Forestry.

#### Report from a Government agency

Federal Interagency Forum on Child and Family Statistics. *America's Children: Key National Indicators of Well-Being, 2009*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office. Recuperado de <http://www.childstats.gov/pubs/index.asp>

**Thesis****Basic form**

Surnames, A. A. (Year). Title. (Unpublished master or doctorate thesis). Institution name, Location.

**Unpublished thesis, printed**

Muñoz Castillo, L. (2004). *Determinación del conocimiento sobre inteligencia emocional que poseen los maestros y la importancia que le adscriben al concepto en el aprovechamiento de los estudiantes*. (Tesis inédita de maestría). Universidad Metropolitana, San Juan, PR.

**Commercial database thesis**

Santini Rivera, M. (1998). *The effects of various types of verbal feedback on the performance of selected motor development skills of adolescent males with Down syndrome*. (Tesis doctoral). Disponible en la base de datos ProQuest Dissertations and Theses. (AAT 9832765).

**Web thesis**

Aquino Ríos, A. (2008). *Análisis en el desarrollo de los temas transversales en los currículos de español, matemáticas, ciencias y estudios sociales del Departamento de Educación*. (Tesis de maestría, Universidad Metropolitana). Recuperado de [http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis\\_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf](http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf)

**Standards or patents****Basic form**

Surnames, A. A. Title of the patent. Country and number of the patente. Classification of the patent, date of official license. Number and date of patent request, pagination.

Hernández Suárez, C. A., Gómez Saavedra, V. A., & Peña Lote, R. A. Equipo medidor de indicadores de calidad del servicio de energía eléctrica para usuario residencial. Colombia., 655. G4F 10/0, 15 de Marzo 2013. 27 de Octubre 2011, 147

**ARTICLE SUBMISSION**

Authors must submit their articles through the application Open Journal System in digital format, attaching the cover letter and the article-authors format.

**Cover letter**

The article must be submitted with a cover letter addressed to the director and editor of the journal, Engineer Cesar Augusto Garcia Ubaque, including:

- Specific request to consider your article to be published in Tecnura journal.
- Full title of the article.
- Full names of all the authors of the paper.
- Certification of the originality and unpublished character of the paper.
- Exclusivity of submission to Tecnura journal.
- Authoring confirmation with signature of all the authors.

This letter must be signed by all the authors, scanned and sent with the remaining requested documents.

**Article-authors information format**

The article has to be submitted with an information format about the article and its authors which can be downloaded from the web page of Tecnura journal <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>, in the section "Forms and Documents". It is important to complete all the fields of information requested, some of them have comments to clarify better what is being requested. The format must not be scanned.

**Article**

Article in digital format (Word 2003 and later editions) that complies with all the presentation rules described in chapter three, "Article structure", of this guide of instructions for authors.

## PUBLICATION PROCEDURE

The procedure to be followed by Tecnura journal for the evaluation and possible publication of the papers sent by the authors is the following in chronological order:

1. Delivery of the article with the cover letter and the information format by the authors.
2. Notification to the author about the reception of the article.
3. Verification of the presentation rules by the monitor of the journal.
4. Notification to the author about the evaluation of the presentation rules.
5. Submission of corrections made by the authors related to the evaluation of presentation rules.
6. Submission of the articles to the selected arbitrators.
7. Notification of the beginning of the arbitration process of the article.
8. Notification to the authors about the decision made by the editorial committee, and about the evaluations made by the arbitrators.
9. Delivery of the corrections made by the authors with respect to the evaluations made by the arbitrators.
10. Study of the final version of the article and the evaluations of the arbitrators by the editorial committee.
11. Delivery by the authors of the letter that surrenders right to the editor of the journal.
12. Submission of the version with style corrections and diagrammed to the authors.
13. Verification of errors and final approval of the version with style corrections and diagrammed by the authors.
14. Publication of the article in the corresponding number of Tecnura journal.
15. Notification to the authors of the number of interest.
16. Delivery of a copy of the journal to each one of the authors of the published article.

## ARTICLE ARBITRATION PROCESS

Considering the quarterly periodicity of the journal, the Editorial Committee makes four calls every year for the submission of articles, approximately in the months of February, May, August and November. The articles will be received until the date established in the call.

Once received the articles, the monitor of the journal will make an initial form evaluation to verify the completion of the elements mentioned in this guide of instructions to authors. After receiving again the article with the requested corrections by the journal's monitor, the paper will be submitted to evaluation by three academic peers (through time it is expected to include more external peers to participate in the process).

Each article sent to Tecnura journal is checked by two expert academic peers external to the institution of the authors, by a process of "Peer-review" of double blind, guaranteeing the anonymity of authors and evaluators; every paper sent is considered confidential and so it is demanded to evaluators.

Possible conclusions of the result of the evaluation by the judges are only three: publish the article without modifications, publish the article with modifications and not publish the article.

Subsequently, the Editorial Committee takes the decision to publish or not the articles, based on the results of the evaluations made by the assigned arbitrators. In case of contradictions in the evaluations with respect to the publication of an article, the editorial committee will send the article to a third peer and will be inclined for the two evaluations that have the same concept with respect to the publication of the article.

In each call the main author must suggest at least four possible external arbitrators to his work institution evaluators, who must be specialists in the specific topic of the article sent and must have at least Masters level, and at least two must to be international. Potential evaluators can belong to a university or industry, public or private; their

complete names must be provided, highest academic formation, institutional affiliation and e-mail. The editorial committee will analyze these four potential evaluators in order to enrich the database of arbitrators of *Tecnura* journal.

The Editorial Committee of *Tecnura* journal reserves the right to print, reproduce total or partially the article, as the right to accept or reject it. In the same way, it has the right to make any editorial modification that considers necessary; in this case the author will receive written recommendations from the evaluators. If accepted, authors must deliver the article with the suggested adjustments within the dates given by the journal to guarantee its publication in the programmed number.

## CONTACT

For any additional information request, please send an e-mail to *Tecnura* journal [tecnura@udistrital.edu.co](mailto:tecnura@udistrital.edu.co), [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com) or by mail to Cesar Augusto Garcia Ubaque, Director and Publisher of *Tecnura* Journal, to the following address:

*Tecnura* Journal  
Journals Room, Block 5, Office 305.  
Faculty of Technology  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Transversal 70 B N. 73 a 35 sur  
Phone: 571-3238400 Extension: 5003  
Mobile: 57-3153614852  
Bogotá D.C., Colombia  
Email:  
[tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co](mailto:tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co), [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com)  
Web page:  
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

## SUSCRIPCIÓN

### Revista *Tecnura*

Nombre completo: \_\_\_\_\_

Institución u organización: \_\_\_\_\_

Factura a nombre de: \_\_\_\_\_

Dirección de envío: \_\_\_\_\_

Ciudad: \_\_\_\_\_ Departamento, Estado o provincia: \_\_\_\_\_

Código postal: \_\_\_\_\_ Apartado aéreo / P.O. Box: \_\_\_\_\_

País: \_\_\_\_\_ Correo electrónico: \_\_\_\_\_

Teléfono: \_\_\_\_\_ Fax: \_\_\_\_\_ Firma: \_\_\_\_\_

Tabla de costos de suscripción:

Región	1 Año	2 Años
Bogotá	40 000 COP	70 000 COP
Colombia	45 000 COP	80 000 COP
América Latina y el Caribe	40 USD	70 USD
Estados Unidos y Canadá	40 USD	70 USD
Otras regiones	60 USD	100 USD

**Nota:** los precios tanto en dólares como en pesos incluyen el valor del envío.

Diligenciar el formato de suscripción y enviarlo por correo junto con la copia del recibo de consignación a la dirección postal que aparece en el parte inferior de esta página o escaneado a los correos electrónicos [tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co](mailto:tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co) y [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com). La consignación nacional se realiza en el Banco de Occidente a nombre de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en la cuenta de ahorros número 230-81461-8.

### Canje y suscripciones

Enviar a Ing. César Augusto García Ubaque, PhD.

Director y Editor Revista *Tecnura*

### Biblioteca

Facultad Tecnológica

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Transversal 70B No. 73A - 35 sur

Teléfono: +57 - 1 - 7311542

Celular: +57 - 3153614852

Bogotá, D.C., Colombia

Correo electrónico: [tecnura@udistrital.edu.co](mailto:tecnura@udistrital.edu.co) [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com)

Tecnura en internet: <http://tecnura.udistrital.edu.co>





UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

## SIGN UP

### *Tecnura journal*

Full name: \_\_\_\_\_  
Institution or organization: \_\_\_\_\_  
Invoice name: \_\_\_\_\_  
Mailing address/address: \_\_\_\_\_  
City: \_\_\_\_\_ Department, state or province: \_\_\_\_\_  
Zip code: \_\_\_\_\_ P.O. Box: \_\_\_\_\_  
Country: \_\_\_\_\_ E-mail: \_\_\_\_\_  
Phone number: \_\_\_\_\_ Fax: \_\_\_\_\_ Signature: \_\_\_\_\_

Table of subscription costs:

Región	1 year	2 year
Bogotá	23 USD	40 USD
Colombia	26 USD	46USD
Latin America and The Caribbean	40 USD	70 USD
The United States of America and Canada	40 USD	70 USD
Other regions	60 USD	100 USD

**Note:** prices in both dollars and pesos include the value of the shipment.

Fill out the subscription form and mail it along with a copy of the receipt of consignment to the e-mail address that appears in the bottom of this page or scanned to the following E-mails: [tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co](mailto:tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co) and [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com). The national bank deposit is done in Banco de Occidente in the name of Universidad Distrital Francisco José de Caldas in the savings account number 230-81461-8.

#### **Exchange and Subscription**

Send Ing Cesar Augusto Garcia Ubaque PhD.  
Editor and Publisher Tecnura Journal

#### **Library**

Technology Faculty  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Transversal 73A No. 70B-35 Sur  
Phone: +57 - 1 - 7311542  
Mobile: +57-3153614852  
E-mail: [tecnura@udistrital.edu.co](mailto:tecnura@udistrital.edu.co), [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com)