

EDITORIAL

INVESTIGACIÓN

Efecto del grado de capacidad de disipación de energía sísmica seleccionado en las cantidades de obra de muros de concreto reforzado

Effect of the selected seismic energy dissipation capacity on the materials quantity for reinforced concrete walls
José MIGUEL BENJUMEA ROYERO, FREDY SAÚL SOTELÓ MONROY, CAMILO EDUARDO CELIS MELO, GUSTAVO CHIO CHO

Desarrollo y ensayo de un sensor químico de fibra óptica para la medición de concentraciones de dióxido de carbono

Development and testing of a chemical sensor of micro-structured optic fiber for measuring carbon dioxide concentrations
MARÍA ANGÉLICA ACOSTA PÉREZ, SIR ALEXCI SUÁREZ CASTRILLÓN, ALBERT MIYER SUÁREZ CASTRILLÓN

Análisis de elementos finitos con un continuo elástico lineal tipo Cosserat

Finite Element Analysis Using a Cosserat Linear Elastic Continuum
ALFONSO MARIANO RAMOS-CAÑÓN, LUIS FELIPE PRADA-SARMIENTO, CARLOS ALBERTO VEGA-POSADA

Identificación de patrones de variabilidad climática a partir de análisis de componentes principales, Fourier y clúster k-medias

Identifying patterns of climate variability from principal component analysis - PCA, Fourier and k-means clustering.
JUAN GABRIEL RUEDA BAYONA, CINDY JUDITH ELLES PÉREZ, EDGAR HUMBERTO SÁNCHEZ COTTE, ÁNGEL LEÓN GONZÁLEZ ARIZA, GERMÁN DANIEL RIVILLAS OSPINA

Computación con palabras para el análisis de factibilidad de proyectos de software

Computing with words to feasibility study of software projects
MARIETA PEÑA ABREU, CARLOS RAFAEL RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, PEDRO YOBANIS PIÑERO PÉREZ

11 ESTUDIO DE CASO

Impacto de la penetración de la energía solar fotovoltaica en sistemas de distribución: estudio bajo supuestos del contexto colombiano

Impact of penetration of solar PV energy in distribution systems: case of study based on assumptions of the colombian context
CARLOS ADRIÁN CORREA FLÓREZ, GEOVANNY ALBERTO MARULANDA GARCÍA, ANDRÉS FELIPE PANESSO HERNÁNDEZ

15

Prototipo para la compensación de armónicos en sistemas trifásicos

Prototype for harmonic compensation in three phase systems
ALFONSO ALZATE GÓMEZ, DUBERNEY MURILLO YARCE, RICARDO LEÓN SILVA CÁRDENAS

29

Evaluación del desgaste por abrasión de una mezcla drenante modificada con residuo de llanta triturada (GCR)

Evaluation of abrasion of a modified drainage mixture with rubber waste crushed (GCR)
YEE WAN YUNG VARGAS, JORGE ELIÉCER CORDOBA MAQUILÓN, HUGO ALEXÁNDER RONDÓN QUINTANA

43

REVISIÓN DE TEMA

Ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes tomadas con sistemas UAV

Orthomosaics and digital elevation models generated from images taken with UAV systems
JESÚS ORLANDO ESCALANTE TORRADO, JHON JAIRO CÁCERES JIMÉNEZ, HERNÁN PORRAS DÍAZ

55

Revisión del estado de arte en captación y aprovechamiento de aguas lluvias en zonas urbanas y aeropuertos

Review of the status of art collection and utilization of rain water in urban and airports
ADOLFO LEÓN AGATÓN, JUAN CARLOS CORDOBA RUIZ, URIEL FERNANDO CARREÑO SAYAGO

69

Instrucciones para los autores

Instructions for authors

SUSCRIPCIÓN

SIGN UP

Tecnura

p-ISSN: 0123-921X
Volumen 20 - Número 50
Octubre - Diciembre 2016

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica



UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Revista Tecnura • Volumen 20 – Número 50 • Octubre - Diciembre 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

Efecto de la capacidad de disipación de energía sísmica en las cantidades de obra de muros de concreto reforzado

Computación con palabras para la toma de decisiones en el análisis de factibilidad de proyectos de software

Prototipo para la compensación de armónicos en sistemas trifásicos

Ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes tomadas con sistemas UAV



# **Tecnura**

Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Facultad Tecnológica

Vol. 20 No. 50  
Octubre - Diciembre 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. 50

Octubre - Diciembre 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  
[director@julianhernandez.co](mailto:director@julianhernandez.co)

## 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**

PhD. Alejandro Garcés Ruíz  
Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia

PhD. Carlos Alberto Restrepo Patiño  
Universidad de Talca, Chile

PhD. Carlos Andrés Torres Pinzón  
Universidad Santo Tomás, Colombia

PhD. Eric Octavio Vallejo Rodríguez  
Universidad del Norte, Colombia

PhD. Héctor Javier Fuentes López  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

PhD. Jesús Aguilar Ruiz  
Universidad Pablo de Olavide, España

PhD. Juan Guillermo Londoño Lozano  
Columbia University, Estados Unidos

PhD. Ramón Giraldo Henao  
Universidad Nacional De Colombia, Colombia

PhD. Raúl Giráldez Rojo  
Universidad Pablo de Olavide, España

PhD. Sebastián Varela Fontecha  
University of Nevada, Reno, United States

PhD. Surayne Torres López  
Universidad de las Ciencias Informáticas, Cuba

PhD. Yeleny Zulueta Véliz  
Reperto Novia del Mediodía, Cuba

Msc. Luz Adriana Trejos Grisales  
Instituto Tecnológico Metropolitano, Colombia

Msc. Mauricio Hernández Sarabia  
Universidad de Ibagué, Colombia

Msc. Yolanda Parra Guacaneme  
Corporación de Alta Tecnología – Codaltec, Colombia

Msc. William Mauricio Giral Ramírez  
Universidad Santo Tomás, 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. 50

October - December 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  
[director@julianhernandez.co](mailto:director@julianhernandez.co)

## 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

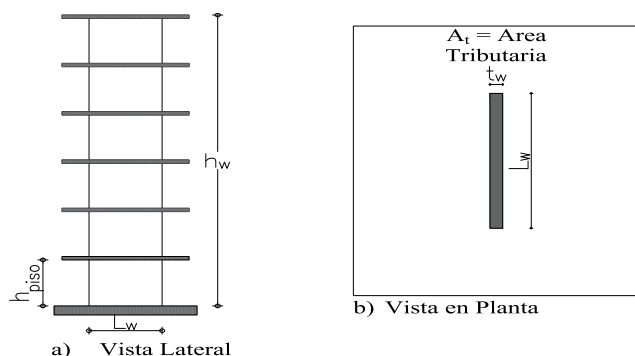
Any author, reader, reviewer or editor may refer their complaints to the competent authorities.



# Contenido

## EDITORIAL

11

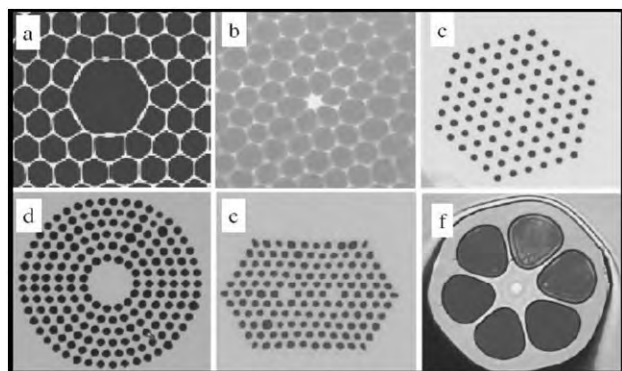


### Efecto del grado de capacidad de disipación de energía sísmica seleccionado en las cantidades de obra de muros de concreto reforzado

15

Effect of the selected seismic energy dissipation capacity on the materials quantity for reinforced concrete walls

JOSÉ MIGUEL BENJUMEA ROYERO, FREDY SAÚL SOTELO MONROY, CAMILO EDUARDO CELIS MELO, GUSTAVO CHIO CHO

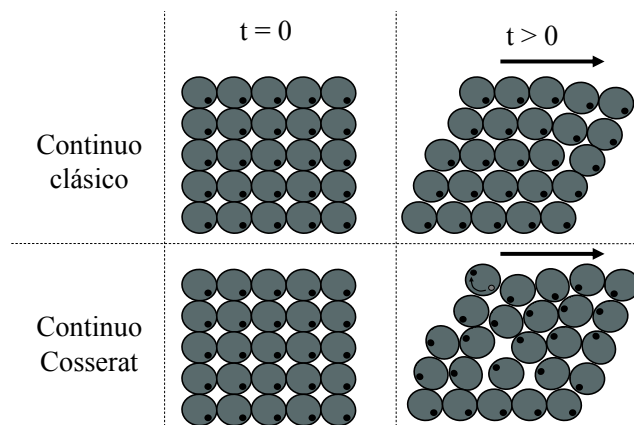


### Desarrollo y ensayo de un sensor químico de fibra óptica para la medición de concentraciones de dióxido de carbono

29

Development and testing of a chemical sensor of micro-structured optic fiber for measuring carbon dioxide concentrations

MARÍA ANGÉLICA ACOSTA PÉREZ, SIR ALEXCI SUÁREZ CASTRILLÓN, ALBERT MIYER SUÁREZ CASTRILLÓN

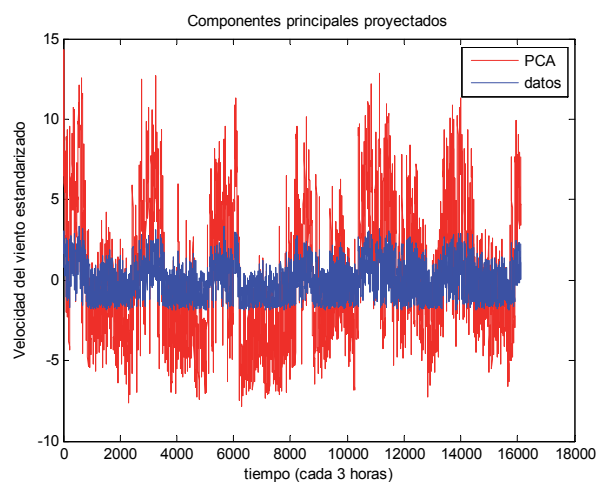


### Análisis de elementos finitos con un continuo elástico lineal tipo Cosserat

43

Finite Element Analysis Using a Cosserat Linear Elastic Continuum

ALFONSO MARIANO RAMOS-CAÑÓN, LUIS FELIPE PRADA-SARMIENTO, CARLOS ALBERTO VEGA-POSADA

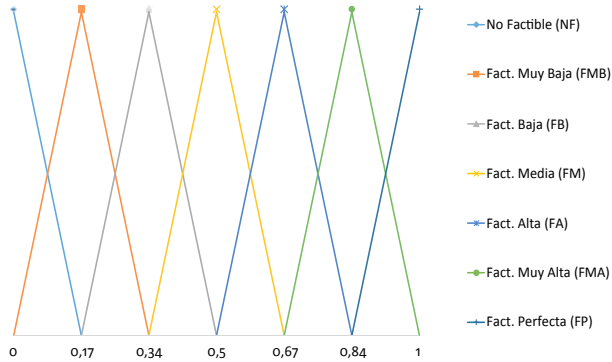


### Identificación de patrones de variabilidad climática a partir de análisis de componentes principales, Fourier y clúster k-medias

55

Identifying patterns of climate variability from principal component analysis – PCA, Fourier y k-means clustering.

JUAN GABRIEL RUEDA BAYONA, CINDY JUDITH ELLES PÉREZ, EDGAR HUMBERTO SÁNCHEZ COTTE, ÁNGEL LEÓN GONZÁLEZ ARIZA, GERMÁN DANIEL RIVILLAS OSPINA

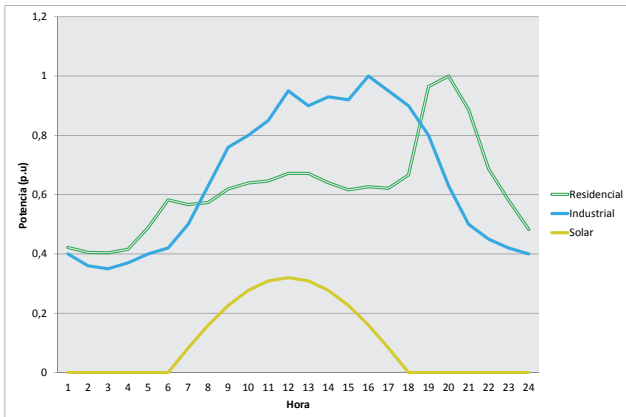


### Computación con palabras para el análisis de factibilidad de proyectos de software

69

Computing with words to feasibility study of software projects

MARIETA PEÑA ABREU, CARLOS RAFAEL RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, PEDRO YOBANIS PIÑERO PÉREZ

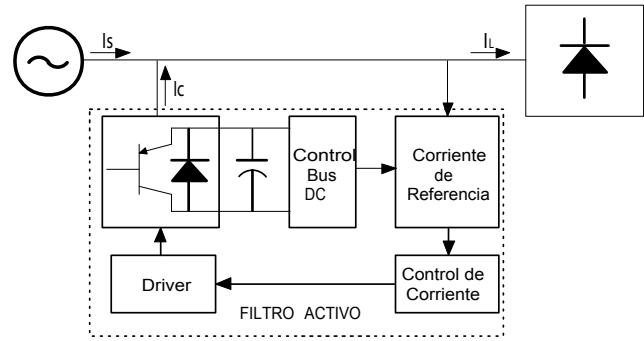


### Impacto de la penetración de la energía solar fotovoltaica en sistemas de distribución: estudio bajo supuestos del contexto colombiano

85

Impact of penetration of solar PV energy in distribution systems: case of study based on assumptions of the colombian context

CARLOS ADRIÁN CORREA FLÓREZ, GEOVANNY ALBERTO MARULANDA GARCÍA, ANDRÉS FELIPE PANESSO HERNÁNDEZ

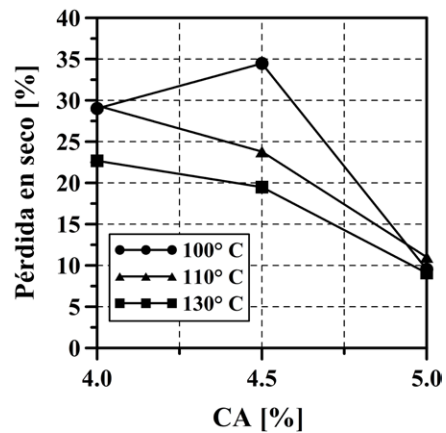


### Prototipo para la compensación de armónicos en sistemas trifásicos

96

Prototype for harmonic compensation in three phase systems

ALFONSO ALZATE GÓMEZ, DUBERNEY MURILLO YARCE, RICARDO LEÓN SILVA CÁRDENAS

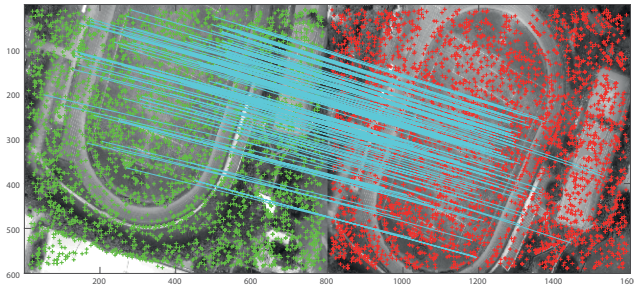


### Evaluación del desgaste por abrasión de una mezcla drenante modificada con residuo de llanta triturada (GCR)

106

Evaluation of abrasion of a modified drainage mixture with rubber waste crushed (GCR)

YEE WAN YUNG VARGAS, JORGE ELÍECER CORDOBA MAQUILÓN, HUGO ALEXÁNDER RONDÓN QUINTANA



**Ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes tomadas con sistemas UAV** 119

Orthomosaics and digital elevation models generated from images taken with UAV systems

JESÚS ORLANDO ESCALANTE TORRADO, JHON JAIRO CÁCERES JIMÉNEZ, HERNÁN PORRAS DÍAZ

---

**Revisión del estado de arte en captación y aprovechamiento de aguas lluvias en zonas urbanas y aeropuertos** 141

Review of the status of art collection and utilization of rain water in urban and airports

ADOLFO LEÓN AGATÓN, JUAN CARLOS CÓRDOBA RUIZ, URIEL FERNANDO CARREÑO SAYAGO

---

**Instrucciones para los autores** 154

**Instructions for authors** 162

**SUSCRIPCIÓN** 170

**SIGN UP** 171

Hace unos días, como parte de una sesión de trabajo conjunta entre las diferentes salas de la Comisión Nacional de Calidad de Educación Superior del Ministerio de Educación CONACES, el padre Gerardo Remolina, exrector de la Universidad Javeriana, presentó sus reflexiones sobre “Calidad y pertinencia de la educación desde una perspectiva humana”. Su intervención me pareció muy oportuna para nuestra Facultad Tecnológica; por ello he querido presentar en estas líneas algunos aspectos importantes de su intervención, con el ánimo de contribuir a la reflexión permanente y la búsqueda de esos elementos que nos permitan materializar su misión: “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”.

“Hablar de educación es hablar del ser humano en cuanto tal y de su integridad. De nada valdría tener una educación que formara excelentes científicos y técnicos sin un soporte y una consistencia verdaderamente humanos”. En Colombia, se ha venido insistiendo en la formación técnica y tecnológica como imprescindible y de gran importancia para el país. Sin embargo, ligado a esta insistencia, existe el peligro de caer en el inmediatismo pragmático, que privilegia los resultados a corto plazo en el campo de la innovación tecnológica, y descuida una visión que tenga como meta la formación humana. Se pretende, decía el padre Remolina, la humanización de los robots, y por otra, la robotización de los seres humanos. Esto es hacer robots dotados de inteligencia artificial, de sentimientos, de afectividad y aún de la capacidad de tomar decisiones responsables (éticas); y paradójicamente, hacer de los seres humanos robots cada vez más funcionales y efectivos, que a la manera de artefactos mecánicos o electrónicos, realicen operaciones altamente eficaces,

económicamente productivas y competitivas para un mundo cuyo ideal se ha forjado a partir de expectativas materiales y utilitaristas; donde lo verdaderamente humano se ha venido silenciando o ha sido puesto al margen de nuestras intenciones. .

Este problema de la concepción de educación no es exclusivo de los países en desarrollo; también se da en países desarrollados, como Estados Unidos, o los países de la Unión Europea, determinados por la competitividad y la innovación, y guiados estos últimos por la famosa “Carta de Bolonia” por la cual los Ministros de Educación constituyeron “La Europa del conocimiento”. Esta, según Reiser, transformó a la universidad europea en una “fábrica de aprendizaje”, alterando de manera nefasta su esencia. El nuevo sistema trata de “estrategias de mercado”, de “capacidad para la competitividad”, de “procedimientos de reclutamiento de estudiantes y profesores” (no de su vocación), de “gerencia de las instituciones universitarias”, de la “creación de espacios de mercado basados en el conocimiento”, de “eficiencia”, de “sinergias”, del “potencial para la innovación y desarrollo social y económico”. En ningún lugar se trata del espíritu que se forma con la educación. Nunca se habla de que el saber, el conocimiento y la sabiduría son valores que el ser humano procura y ama por sí mismos. Según el profesor Reiser, “este documento (la Carta de Bolonia) manifiesta un espíritu de triste materialismo y utilitarismo”.

Es necesario tomar conciencia de la gravedad de lo que está ocurriendo y corregir el rumbo, con frecuencia implícito, que se ha venido trazando. La respuesta a la pregunta sobre los aportes de las ciencias, las artes y las humanidades para una educación con calidad y pertinencia para todos, parece ser obvia: no se trata de contraponer o excluir ciencias o disciplinas, sino de integrarlas. La educación con calidad debe propender por una auténtica formación integral del ser humano, en la que las ciencias, las artes y las humanidades no sean simples aportes, sino elementos constitutivos. A ella deben contribuir no solo las

ciencias, sino también las artes y todas las disciplinas, especialmente las Ciencias Humanas y Sociales; y de manera especial la ética, la pedagogía, la psicología, la antropología y la filosofía. La formación integral no debe centrarse tanto en las ciencias o en las disciplinas, sino en la persona misma, en las facultades y en las estructuras fundamentales del ser humano. No es una integración desde fuera, sino desde dentro; es decir, el núcleo de integración no puede ser otro que la persona.

Reflexionar, sobre la educación y su calidad, exige que cada época se interrogue críticamente acerca del modelo de ser humano, de sociedad y de cultura que desea realizar, para contrastarlo con el modelo explícito o implícito, o con la ausencia de modelo, que de hecho está implementando. Es decir, exige una seria reflexión ética y moral como algo absolutamente imprescindible. ¿Cuál es el modelo de ser humano que pretende formar nuestra sociedad colombiana? Y, ¿cómo lo fundamenta o justifica? Lo anterior hace evidente que quien colabora en el proceso de educación (docente o institución) debería tener muy claros y definidos su modelo antropológico, sus principios éticos, sus valores e ideales. La formación integral implica una concepción del hombre

en su conjunto: es decir, implica una antropología y una visión del mundo o cosmovisión. Pero, ¿sobre quién recae la responsabilidad definitiva de la formación integral? En últimas, sobre el sujeto mismo del proceso formativo, es decir, sobre la persona y, en nuestro caso, sobre el estudiante. Es claro también que las instituciones educativas no pueden ir más allá de orientar y estimular el proceso, de abrir horizontes y de ofrecer posibilidades y ayudas.

Pero lo anterior plantea, de todas maneras, la pregunta por los contenidos de la formación integral. En este sentido, la formación integral no puede confundirse con la articulación de determinadas asignaturas en un plan de estudios. Aunque hoy se distingue con mayor claridad lo que es un currículo de lo que es un plan de estudios, con mucha frecuencia para nosotros los ingenieros, esta diferencia no es clara. La formación integral puede descansar en un currículo, pero no en un plan de estudios, ni siquiera en un plan de estudios humanísticos. El asunto no es combinar de manera complementaria diversas asignaturas “humanísticas” con las asignaturas propias de una profesión, ni darle a esta cierto sabor humanista combinado con la enseñanza técnica.

CÉSAR AUGUSTO GARCÍA-UBAQUE  
Director

## EDITORIAL

---

A few days ago, as part of a joint working session in the Quality National Commission for Higher Education in Education Ministry (CONACES in Spanish), Priest Gerardo Remolina, ex Rector of Javeriana University presented his reflections about QUALITY AND RELEVANCE OF EDUCATION FROM A HUMAN PERSPECTIVE. His speech seemed very timely for our Technological Faculty; and that is why I want to review some of its most important aspects, in contributing to the permanent reflection and search for those elements that allow us to carry out our mission: "To educate professionals with solid foundations, able to carry out, independently, competent and ethical, different processes of technological adaptation, academic production, and original research in both industry and academia to contribute to their personal and family development and the society in general".

"Talk about education is to speak of human being itself and his integrity. It would be worthless to have an education that forms excellent scientists and technicians without a support and consistency truly human". In Colombia has been insisting on technical and technological training as an essential and important for the country. However, linked to this insistence, there is a danger of falling into the pragmatic immediacy that favors short-term results in the field of technological innovation, and neglects a vision that has as its goal the human formation. Priest Remolina said that humans are intend humanization of robots on one side, and robotizing of humans for other. This means, to make robots endowed with artificial intelligence, feelings, emotions and even the ability to make responsible (ethical) decisions; and paradoxically, make human beings more and more functional and effective robots, that, like mechanical or electronic devices, can make highly efficient operations, economically productive and competitive for a world whose ideal is forged from material and utilitarian expectations; where the truly human has been silenced or been placed regardless of our intentions.

This problem of the education concept is not exclusive to developing countries; also occurs in developed countries like the United States or the European Union countries, determined by the competitiveness and innovation, and guided, these last ones, by the famous "Bologna Letter" by which the Ministers of Education constituted "the Europe of knowledge". This, according Reiser, transformed the European university in a "Learning factory", altering in a nefarious way its essence. The new system is about: "market strategies", "capacity for competitiveness", "students and teachers recruitment procedures" (not their vocation), "universities management", "creating market spaces based on knowledge", "efficiency", "synergies" and "potential for innovation and social and economic development". Nobody talks about the spirit that forms with education. Nobody talks about that knowledge and wisdom are values that the mankind seeks and loves itself. According to Professor Reiser "this document (Bologna Letter), manifests a sad spirit of materialism and utilitarianism".

It is necessary to be aware of the seriousness of what is happening and correct the course, often implicit, that has been traced. The answer to the question about the contributions of science, the arts and humanities for an education with quality and relevance for all, it seems obvious: it is not to oppose or exclude sciences or disciplines, but to integrate them. Quality education must advocate for an authentic integral human formation in the sciences, arts and humanities contributions are not simple, but constituent elements. To this objective contribute not only science, but also the arts and all disciplines, especially the humanities and social sciences; and specifically ethics, pedagogy, psychology, anthropology, and philosophy. Comprehensive training should not focus on the sciences or disciplines, but on the individual, on the capacities and the fundamental structures of the human being. It is not integration from outside but inside out; the core of integration cannot be other than the person himself.

Reflect on education and its quality, requires each epoch be questioned critically about the human being model, society and culture to perform, to contrast with the explicit or implicit model or the absence of model, which actually is implemented. That requires serious ethical and moral reflection as absolutely essential. What is the human model which aims to train our Colombian society? And, how it is justified or based? This makes clear that who helps the educational process (teacher or institution) should have very clear and defined its anthropological model, its ethical principles, values and ideals. The integral training involves a conception of man as a whole: implies an anthropological and a worldview. But, who holds the ultimate responsibility for integral training? Ultimately, on the subject of the educational process itself, in

our case, about the student. It is also clear that educational institutions cannot go beyond guiding and stimulating the process, of opening horizons and possibilities and offer aid.

But the above raises the question anyway for the contents of the integral training. In this sense, the integral formation cannot be confused with articulation of certain subjects in a curriculum. Although today is distinguished more clearly what is a curriculum and what is a studies plan, very often for us engineers, this difference is not clear. The integral formation can rest on a curriculum, but not in studies plan, even in a humanistic studies plan. The issue is not to combine in a complementary way “humanistic subjects” with the characteristics courses of a profession, nor to give it some humanist flavor with technical training.

CÉSAR AUGUSTO GARCÍA-UBAQUE  
Director



## Efecto del grado de capacidad de disipación de energía sísmica seleccionado en las cantidades de obra de muros de concreto reforzado

### Effect of the selected seismic energy dissipation capacity on the materials quantity for reinforced concrete walls

José Miguel Benjumea Royero<sup>1</sup>, Fredy Saúl Sotelo Monroy<sup>2</sup>, Camilo Eduardo Celis Melo<sup>3</sup>  
Gustavo Chio Cho<sup>4</sup>

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

**Fecha de aceptación:** 10 de septiembre de 2016

**Cómo citar:** Benjumea, J.M.; Sotelo, F.S.; Celis, C.E. y Chio, G. (2016). Efecto del grado de capacidad de disipación de energía sísmica seleccionado en las cantidades de obra de muros de concreto reforzado. *Revista Tecnura*, 20(50), 15-28. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a01

#### RESUMEN

**Contexto:** Para el diseño de muros estructurales de concreto reforzado, la normativa sismoresistente en Colombia permite, en función de la amenaza sísmica del sitio, optar por uno de tres posibles grados de capacidad de disipación de energía (mínima, moderada y especial). Sin embargo, la práctica empleada es la de adoptar el menor grado acorde a la amenaza sísmica.

**Método:** En este trabajo se realizó un estudio analítico del efecto del grado de capacidad de disipación de energía seleccionado durante el diseño de muros estructurales de concreto reforzado, en las cantidades de obra de la estructura y en la capacidad de desplazamiento. El estudio se centró en zonas de amenaza sísmica baja, ya que permite explorar y comparar los tres grados de disipación de energía. En el estudio se incluyeron otras variables como la altura total del muro, el área tributaria y la cuantía mínima de refuerzo adoptada para el alma del muro.

**Resultados:** la cantidad total de acero requerida para los muros con capacidad moderada y especial corresponde, en promedio, a un 77% y 89%, respectivamente, de la cantidad requerida para los muros con capacidad mínima.

**Conclusiones:** es posible lograr reducciones en el peso total de acero requerido al emplear grados de capacidad de disipación moderada y especial comparado con el uso de capacidad de disipación mínima. Además, con esta estrategia se logra un incremento significativo en la ductilidad del muro.

**Palabras Clave:** Amenaza Sísmica Baja, Capacidad de desplazamiento, Capacidad de Disipación de Energía, Cantidades de obra, Elementos de borde, Muros de concreto.

#### ABSTRACT

**Context:** Regarding their design of reinforced concrete structural walls, the Colombian seismic design building code allows the engineer to select one of

1 Ingeniero civil, magíster en Ingeniería Civil, profesor asistente de la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. Contacto: [josbenro@uis.edu.co](mailto:josbenro@uis.edu.co)

2 Ingeniero civil, magíster en Ingeniería Civil, director de Diseño Estructural Asgard Ingeniería y Construcción. Bucaramanga, Colombia. Contacto: [sote\\_sote@hotmail.com](mailto:sote_sote@hotmail.com)

3 Ingeniero civil, gerente Asgard Ingeniería y Construcción. Bucaramanga, Colombia. Contacto: [camiloedo.celis@gmail.com](mailto:camiloedo.celis@gmail.com)

4 Ingeniero civil, doctor ingeniero en Caminos, Canales y Puertos. Profesor titular de la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. Contacto: [gchioch@uis.edu.co](mailto:gchioch@uis.edu.co)



the three seismic energy dissipation capacity (ordinary, moderate, and special) depending on the seismic hazard of the site. Despite this, it is a common practice to choose the minor requirement for the site because it is thought that selecting a higher requirement will lead to larger structural materials amounts and, therefore, cost increments.

**Method:** In this work, an analytical study was performed in order to determine the effect of the selected energy dissipation capacity on the quantity of materials and ductility displacement capacity of R/C walls. The study was done for a region with low seismic hazard, mainly because this permitted to explore and compare the use of the three seismic energy dissipations capacities. The effect of different parameters such as the wall total height and thickness,

the tributary loaded area, and the minimum volumetric steel ratio were studied.

**Results:** The total amount of steel required for the walls with moderate and special energy dissipation capacity corresponds, on average, to 77% and 89%, respectively, of the quantity required for walls with minimum capacity.

**Conclusions:** it is possible to achieve reductions in the total steel required weight when adopting either moderated or special seismic energy dissipation instead of the minimum capacity. Additionally, a significant increment in the seismic ductility displacements capacity of the wall was obtained.

**Keywords:** Boundary elements, Displacement ductility capacity, Energy Dissipation Capacity, Low Seismic Regions, Quantity of materials, RC Walls

## INTRODUCCIÓN

Con el fin de reducir las pérdidas humanas y materiales ante un evento sísmico, el reglamento colombiano de construcción sismorresistente, en adelante NSR-10, establece requisitos mínimos de diseño para elementos estructurales en función del sistema estructural, los materiales usados, el desempeño sísmico esperado de la edificación y el nivel de amenaza sísmica. Los dos últimos parámetros están estrechamente relacionados ya que en función de la amenaza sísmica del sitio, el proyectista dispone de diferentes grados de capacidad de disipación de energía sísmica en el rango inelástico (tabla 1). Sin embargo, a la hora de

diseñar, la práctica común consiste en seleccionar los requisitos mínimos de disipación exigidos para un nivel de amenaza sísmica dado. Por ejemplo, en ciudades con amenaza sísmica baja, como Barranquilla, generalmente se emplean requisitos de disipación de energía mínimos (DMI).

Una posible alternativa para el diseño sería seleccionar un mayor grado de capacidad de disipación de energía sísmica que el mínimo requerido acorde al nivel de amenaza sísmica del sitio. Este enfoque podría parecer inviable, desde el punto de vista económico, ya que el incremento del grado de capacidad de disipación de energía se hace, principalmente, mediante mayores restricciones en el empleo de los materiales (por ejemplo, con

**Tabla 1.** Opciones de grados de capacidad de disipación de energía en función de la amenaza sísmica establecidos en NSR-10

Capacidad de disipación de energía	Zona de amenaza sísmica		
	BAJA	MEDIA	ALTA
Mínima (DMI)	✓		
Moderada (DMO)	✓	✓	
Especial (DES)	✓	✓	✓

Fuente: AIS (2012).

un mejor detallamiento del refuerzo transversal en estructuras de concreto). En teoría, esto incrementaría las cantidades de obra de la estructura; sin embargo, al seleccionar un grado de capacidad de disipación de energía mayor que el mínimo especificado, las fuerzas sísmicas de diseño obtenidas de un análisis lineal y elástico tendrán una mayor reducción, ya que el coeficiente de capacidad de disipación ( $R$ ), especificado en la tabla A.3-1 de NSR-10, aumenta. Por tanto, el refuerzo longitudinal requerido podría disminuir y generar un equilibrio en el consumo total de materiales.

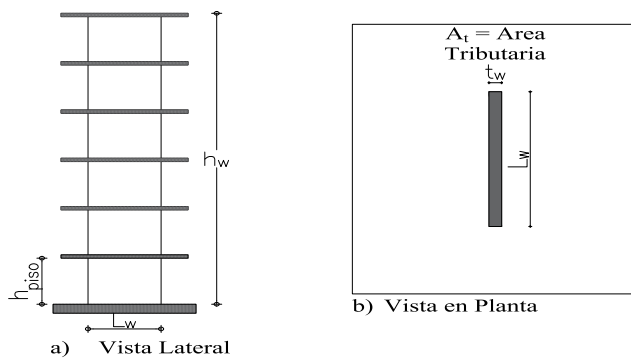
En Colombia, debido al creciente uso de muros delgados de concreto reforzado, las investigaciones se han enfocado en estudios analíticos (Blandón y Bonett, 2013; Naranjo, Marulanda y Madera, 2015) y experimentales (Arteta y Moehle, 2015; Blandón, Rave y Bonett, 2015) del desempeño sísmico de este tipo de muros. Además, se ha estudiado el comportamiento de edificaciones con muros de concreto reforzados de baja altura (Carrillo, Sánchez-Cruz y Viviescas, 2014), y se ha explorado el uso del diseño basado en desplazamientos para esta tipología estructural (Urrego y Bonett, 2010). Sin embargo, hasta la fecha no se han reportado análisis con el objetivo de determinar los efectos de seleccionar un grado de capacidad diferente al mínimo especificado para la zona sísmica.

Teniendo en cuenta el planteamiento previo y el hecho de que el número de edificaciones que emplean muros estructurales en concreto reforzado como sistema de resistencia sísmica viene creciendo paulatinamente en el país (Blandón y Bonett, 2013), se plantea la pregunta de investigación: ¿Cuál es el efecto en las cantidades de obra de la estructura en edificaciones con muros estructurales al seleccionar un grado de capacidad de disipación de energía diferente al mínimo establecido para un nivel de amenaza sísmica dado? La presente investigación está centrada en

zonas de amenaza sísmica baja, ya que permite explorar y comparar todas las capacidades de disipación de energía disponibles en el código para el sistema estructural; sin embargo, el estudio también se podría replicar para zonas de amenaza sísmica intermedia. En este artículo, tras una descripción de la metodología empleada, se presentan los principales resultados, en los que se enfatiza en las cantidades de obra de estructura y en la capacidad de ductilidad de desplazamiento del muro. Este último parámetro, aunque no es el objetivo principal de la investigación, fue incluido con el fin de contar con una medida adicional que permitiera evaluar la decisión de seleccionar un grado de capacidad de disipación de energía diferente al mínimo exigido por NSR-10. Por último, se exponen las principales conclusiones del estudio.

## METODOLOGÍA

De acuerdo con Wood (2005), para el caso de edificaciones cuyo sistema de resistencia de fuerzas sísmicas son los muros estructurales, el análisis puede ser desarrollado mediante un modelo simplificado como el presentado en la figura 1. Para dicho muro, la respuesta estructural ante cargas laterales dependerá de la altura total ( $h_w$ ) y de entrepiso ( $h_{piso}$ ), las dimensiones en planta ( $L_w$  y  $t_w$ ), la rigidez a flexión ( $E_c I$ ), donde  $E_c$  es el módulo de elasticidad del concreto e  $I$  es el momento de inercia respecto al eje mayor, y el índice de muros de la edificación ( $\beta$ ), definido como la relación entre el área en planta del piso y la sumatoria del área de la sección transversal de todos los muros, o, para el caso del modelo conceptual, la relación entre el área tributaria y el área de la sección transversal del muro.



**Figura 1.** Modelo conceptual empleado en el análisis.

**Fuente:** elaboración propia.

Con el fin de representar la práctica en el medio colombiano, en este estudio fueron seleccionados tres muros prototipos con una altura de entrepiso igual a 2,55 m, y alturas totales de 15,3 m, 30,6 m y 45,9 m, que corresponden a 6, 12 y 18 pisos respectivamente. Para cada caso, el espesor del muro ( $t_w$ ) fue modificado entre 0,15 m y 0,30 m, con incrementos de 0,05 m. La longitud del muro ( $L_w$ ) fue determinada de modo que los requisitos de deriva y resistencia establecidos en NSR-10 sean verificados. En relación al área tributaria, se emplearon dos valores fijos (24 y 45 m<sup>2</sup>) con el fin de capturar el comportamiento para densidades de muros altas y bajas, respectivamente. El estudio se limitó a muros fundidos en sitio, excluyendo muros prefabricados en donde las conexiones entre los elementos requieren de consideraciones especiales.

En general, la metodología empleada inicia con el cálculo de las cargas gravitacionales y laterales. A continuación se ejecuta el análisis estructural para determinar la longitud del muro que satisfaga el requisito de deriva permitido (deriva de entrepiso máximo igual al 1 % de la altura de piso). Luego se realiza el diseño del muro siguiendo los requisitos de los capítulos C.14 y C.21 de la NSR-10, aplicando los requerimientos de ductilidad en función del grado de disipación de energía seleccionado. Por último, se determinan las cantidades de obra de la estructura y la capacidad de ductilidad

de desplazamiento para cada muro. Estos pasos se describen a continuación.

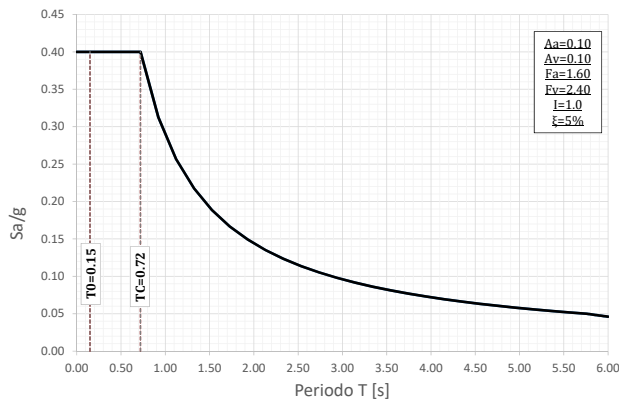
## Acciones

Las solicitaciones consideradas se determinaron de acuerdo con los requisitos del título B establecidos en NSR-10, tomando como cargas muertas (D) una carga sobrepuesta de 3,0 kN/m<sup>2</sup>, el peso propio de la placa maciza de espesor asumido igual a 0,15 m, y el peso propio de los muros. Además, se incluyeron la carga viva (L) de magnitud 1,8 kN/m<sup>2</sup> y las fuerzas sísmicas de diseño (Fs) distribuidas en altura, siguiendo el procedimiento establecido en el capítulo A.4 de la NSR-10. Para la definición del espectro de aceleración, presentado en la figura 2, se asumió que la construcción se hace en una ciudad con coeficientes  $A_a = 0,1$  y  $A_v = 0,1$  y suelo tipo D. Cabe resaltar que en el presente estudio no se incluyó la interacción entre el suelo y la estructura. Adicionalmente, debido a que el estudio se centra en los efectos sísmicos, no se incluyeron otras acciones como las cargas de viento. Las combinaciones de carga usadas para el diseño de los muros se presentan en la tabla 2. Las fuerzas sísmicas reducidas de diseño (E) se obtuvieron mediante la división de las fuerzas sísmicas (Fs) por el coeficiente de disipación de energía (R) para cada grado de disipación seleccionado. Estos últimos se establecen en la tabla A.3-1 del código NSR-10 y corresponden a 2,5, 4 y 5 para los grados de disipación DMI, DMO y DES, respectivamente.

**Tabla 2.** Combinaciones de resistencia última empleadas

Combinación según NSR-10	Factor de mayoración		
	D	L	E
B.2.4-1	1.4		
B.2.4-2	1.2	1.6	
B.2.4-5	1.2	1.0	1.0
B.2.4-6	0.9		1.0

**Fuente:** AIS (2012).



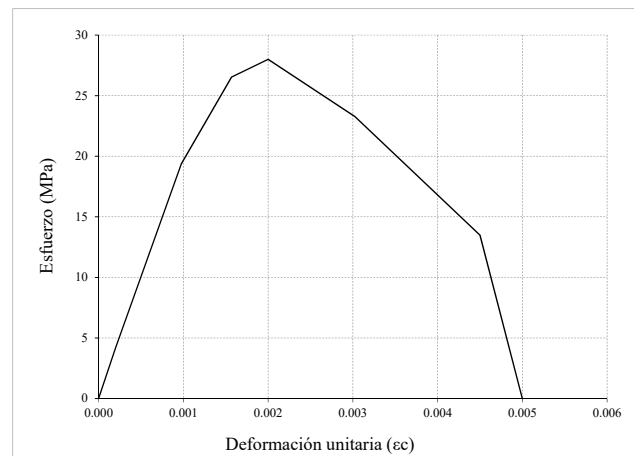
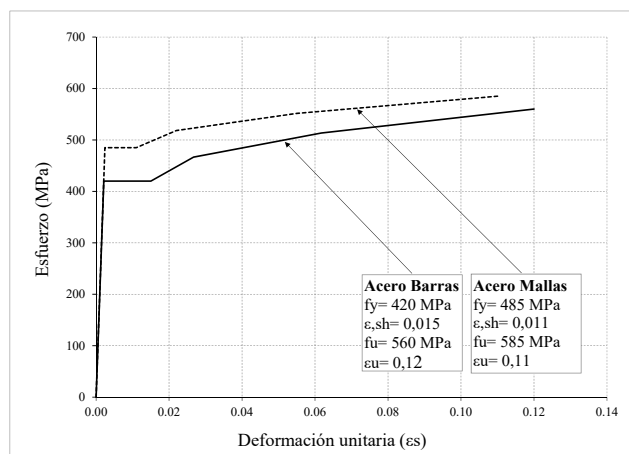
**Figura 2.** Espectros de aceleración sin reducir empleado

**Fuente:** elaboración propia.

## Modelo numérico y materiales empleados

El análisis estructural se realizó mediante modelamiento numérico en el *software* SAP2000-v14.2.4. Los muros fueron analizados usando elementos tipo *Shell* (Computers and Structures Inc., 2009) y nodos articulados en la base. La selección de este tipo de condición de contorno obedece a que el modelo numérico fue discretizado generando múltiples nodos al nivel de cimentación, lo cual,

con el tipo de apoyo seleccionado, se logra una restricción de la rotación en dicho nivel. Durante la fase de diseño de los muros, se ejecutó un análisis lineal y elástico, de modo que las fuerzas sísmicas se pudieran posteriormente reducir mediante el coeficiente de disipación,  $R$ , como se explicó en la sección anterior. Sin embargo, con el fin de calcular la capacidad de desplazamiento de los muros, fue necesario realizar un análisis seccional teniendo en cuenta las relaciones constitutivas de los materiales. Para esto, se asumió un concreto con resistencia a la compresión ( $f'_c$ ) igual a 28 MPa, módulo de elasticidad ( $E_c$ ) de 21.000 MPa, coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) igual a 0,25, y peso específico ( $\gamma$ ) de 24 kN/m<sup>3</sup>. El refuerzo consiste en acero no presforzado con módulo de elasticidad ( $E_s$ ) igual a 200.000 MPa. Para las barras de acero se usó un esfuerzo de fluencia ( $f_y$ ) igual a 420 MPa. En el caso del acero de mallas electrosoldadas se empleó un esfuerzo de fluencia igual a 485 MPa. Las relaciones esfuerzo-deformación del concreto no confinado y de los aceros se presentan en la figura 3. En estas, los términos  $\varepsilon_{sh}$ ,  $\varepsilon_u$  y  $f_u$  corresponden a la deformación unitaria en el punto de inicio de endurecimiento por deformación, deformación unitaria última, y esfuerzo último del acero, respectivamente.



**Figura 3.** Relaciones esfuerzo deformación empleadas para el concreto y acero

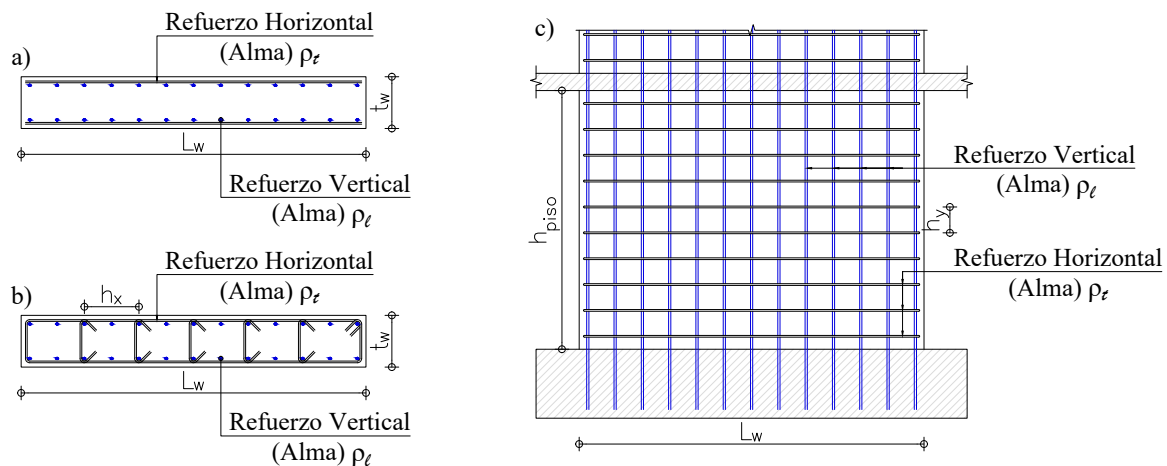
**Fuente:** elaboración propia.

## Diseño estructural

Todos los muros fueron diseñados por cortante y flexocompresión de modo que cumplieran los requisitos de resistencia y ductilidad en función del grado de disipación de energía seleccionado. Para los muros con disipación mínima (DMI), los principales requisitos en relación a las cuantías longitudinales ( $\rho_l$ ) y transversales ( $\rho_t$ ) están gobernados por el capítulo C.14 de la NSR-10 y se resumen en la figura 4. En estos muros, cuando la cuantía longitudinal requerida era mayor o igual al 1 %, algo que ocurre en los primeros pisos cuando se emplean muros delgados, el refuerzo longitudinal fue confinado por estribos cerrados y ganchos suplementarios adicionales, separados de manera intermitente entre las barras longitudinales.

Por otra parte, en los muros con disipación moderada y especial, los requisitos en relación al refuerzo longitudinal y transversal están gobernados por las prescripciones del capítulo C.21 de la NSR-10. Los principales cambios en relación a los

requisitos de muros con capacidad mínima son el uso de cuantías de acero longitudinal y transversal que dependen de la demanda a cortante ( $V_u$ ) (figura 5a), y la implementación de elementos de borde. Ya que en zonas como la del estudio en donde las demandas sísmicas son bajas, el uso de cuantías de refuerzo mayores o iguales a 0,25 % podría ser excesivo para reducir la fisuras por tensión diagonal (Carrillo, González y Rubiano, 2014), el diseño de los muros se realizó para dos escenarios. En el primero, se permitió el uso de cuantías reducidas de refuerzo en el alma en función de la demanda a cortante. En el segundo, se empleó, como mínimo, una cuantía de refuerzo igual al 0,25 % (véase notas en figura 5a). Con el fin de determinar el número de pisos en donde se requieren los elementos de borde, en este estudio se seleccionó el enfoque de esfuerzos permisibles en la fibra extrema a compresión (figura 5b). El detallado del acero de confinamiento empleado en los elementos de bordes se presenta en la figura 6, donde:



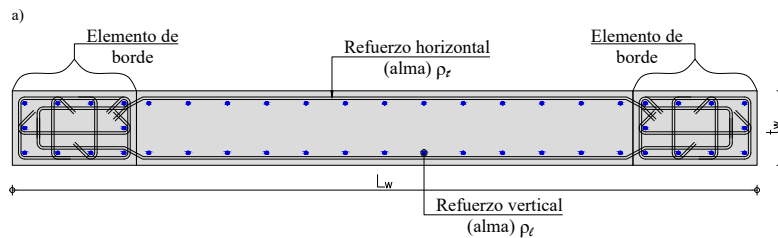
### Notas

1.  $\rho_l > 0,0012$  (Sección C.14.3.2 NSR-10).
2.  $\rho_t > 0,0020$  (Sección C.14.3.2 NSR-10).
3.  $h_x$  y  $h_y$  menor al mínimo entre  $3t_w$  y  $0,45m$  (C.14.3.4).

**Figura 4.** Refuerzo típico en muros rectangulares con capacidad de disipación DMI: (a) sección típica, (b) sección con  $\rho_l \geq 1\%$ , (c) alzado y notas

**Fuente:** elaboración propia.

- $A_{sh}$  = área total de refuerzo transversal colocado dentro del espaciamiento  $s$  y perpendicular a la dirección  $b_c$ .
- $L_{be}$  = longitud del elemento de borde.
- $S$  = separación del refuerzo transversal del elemento de borde.
- $h_x$  = espaciamiento máximo horizontal entre ganchos suplementarios o ramas de estribos cerrados de confinamiento.
- $b_c$  = dimensión transversal del núcleo del elemento medida entre los bordes extremos del refuerzo transversal con área  $A_{sh}$ .
- $c$  = distancia medida desde la fibra extrema en compresión al eje neutro.
- $d_{bl}$  = diámetro de la barra longitudinal del elemento de borde.
- $d_{be}$  = diámetro del estribo del elemento de borde.



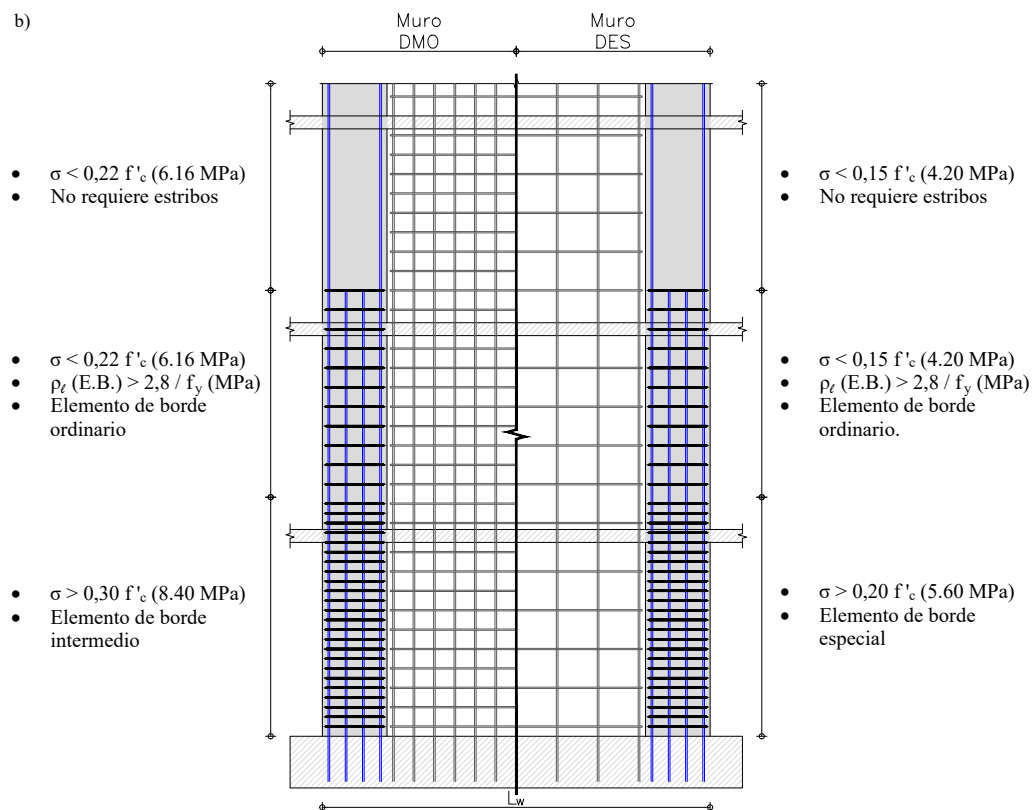
Notas:

1.  $\rho_l > 0,0025$  (Sección C.21.9.2.1 NSR-10).
2.  $\rho_r > 0,0025$  (Sección C.21.9.2.1 NSR-10).
3.  $\rho_l$  y  $\rho_r$ , se pueden reducir a lo prescrito en Sección C.14.3 si:  $V_u < 0,083 \times A_{cv} \times \sqrt{f'_c}$

$V_u$  : Fuerza cortante en la sección

$A_{cv}$  : Área bruta de la sección de concreto limitada por el espesor del alma y la longitud de la sección en la dirección de la fuerza cortante considerada

b)



**Figura 5.** Requerimiento de refuerzo longitudinal y transversal para muros DMO y DES: (a) planta, (b) alzado

**Fuente:** elaboración propia.

El refuerzo vertical requerido en los elementos de borde fue distribuido de modo que se cumplirían los requisitos de separación vertical y horizontal del refuerzo transversal. Además, como mínimo, se usó una cuantía longitudinal del 1 % del área del elemento de borde, que corresponde a la cuantía mínima establecida por el código NSR-10 para columnas de concreto reforzado. Por último, con el fin de no generar cambios en el despiece de los elementos de borde en cada piso, algo que resultaría poco práctico a la hora de construir el muro, cuando fuese necesario, se optó por cambiar la sección y refuerzo del elemento de borde cada dos pisos.

Cabe resaltar que aunque el código NSR-10 permite usar dos capas de refuerzo a partir de espesores mayores a 0,25 m (en muros con grados DMI) o cuando la fuerza cortante mayorada sea superior a  $0,17A_{cv}\sqrt{f'_c}$  (en muros con grados DMO y DES), en el presente trabajo se empleó refuerzo en dos capas en todos los muros estudiados. Adicionalmente, cuando no se emplean elementos de

borde y el refuerzo vertical se conforma con mallas, se optó por colocar dos barras de acero de diámetro 3/8" amarradas por ganchos del mismo diámetro separados cada 15 cm.

### Cálculo de la ductilidad de desplazamiento

Aunque el principal objetivo del presente trabajo es determinar la variación en las cantidades de obra de muros en función del grado de disipación de energía seleccionado, resulta interesante, además, comparar la capacidad de ductilidad de desplazamiento ( $\mu_\Delta$ ) del muro para cada grado de disipación. De esta manera se cuenta con un parámetro adicional que permitirá evaluar la decisión de seleccionar un grado de capacidad de disipación de energía diferente al mínimo exigido por la normativa.

La capacidad de ductilidad de desplazamiento se determina como la relación entre el desplazamiento último ( $\Delta_u$ ) y el desplazamiento en fluencia ( $\Delta_y$ ) del muro. Estos desplazamientos fueron

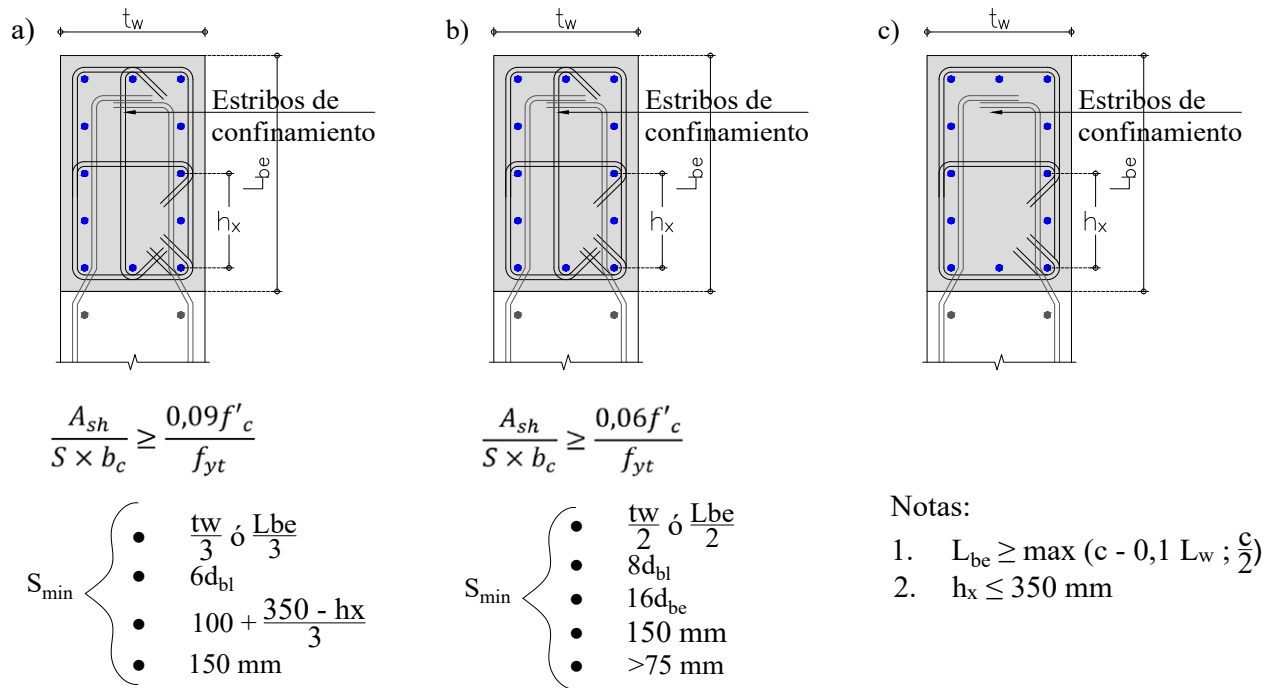


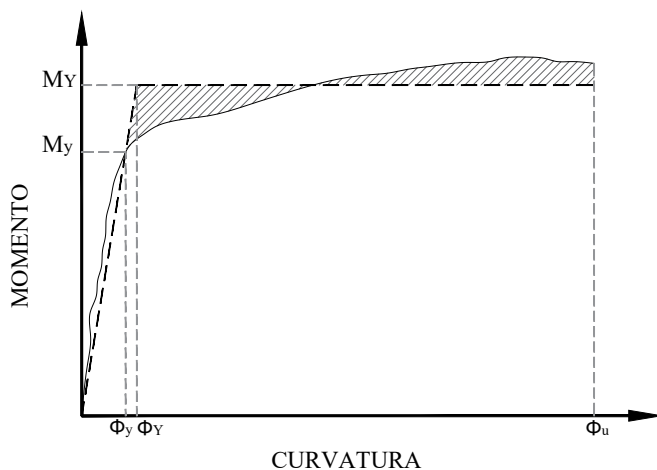
Figura 6. Requerimiento de elementos de borde: (a) especial, (b) moderado y (c) ordinario

Fuente: elaboración propia.

calculados mediante las ecuaciones (1) y (2), respectivamente. Debido a la esbeltez de los muros analizados y a que se buscaba una aproximación en los cálculos, solo se incluyeron los efectos de deformación por flexión. Los valores de la curvatura en el punto de fluencia efectivo ( $\phi_y$ ) y punto último ( $\phi_u$ ) fueron obtenidos a partir de la idealización elastoplástica del diagrama momento-curvatura, realizado mediante el balance de áreas bajo las curvas (figura 7). Este diagrama fue obtenido para la carga axial esperada empleando la combinación D+0,25 L recomendada en (ASCE 41, 2013). La longitud equivalente de rótula plástica ( $L_p$ ) se tomó igual a  $0,5L_w$ . Este valor es sugerido en Wallace (2007) para efectos prácticos, y, además, es usado implícitamente en la sección C.21.9.6.2 del código NSR-10 durante el cálculo de la mayor profundidad del eje neutro congruente con el desplazamiento de diseño.

$$\Delta_u = \Delta_y + L_p(\phi_u - \phi_y) \left( h_w - \frac{L_p}{2} \right) \quad (1)$$

$$\Delta_y = \phi_y \frac{h_w^2}{3} \quad (2)$$



**Figura 7.** Idealización del diagrama momento curvatura empleado

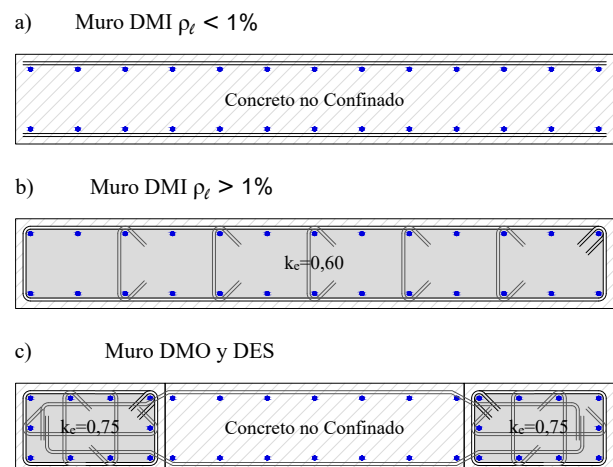
**Fuente:** elaboración propia.

Las propiedades del concreto confinado se calcularon mediante el modelo propuesto por Mander, Priestley y Park (1994); sin embargo, en lugar de calcular el coeficiente de confinamiento efectivo ( $k_e$ ) con las ecuaciones propuestas por los autores, se usaron los valores recomendados por Abo-Shadi, Saiidi y Sanders (2000) presentados en la figura 8. Este coeficiente representa la fracción del área encerrada por la línea media de los estribos que está siendo confinada efectivamente.

### Casos analizados

En la tabla 3 se presentan las características geométricas y el índice de muros para cada uno de los muros analizados. Además, se incluye el índice de carga axial (ALI) para el muro del primer piso, calculado mediante la ecuación (3). En la tabla también se incluye la relación  $M/(VL_w)$  obtenida para las fuerzas sísmicas. El valor promedio de  $M/(VL_w)$  es 5,3, lo cual refleja un comportamiento y una potencial falla de los muros gobernado por flexión (Hidalgo, Ledezma y Jordán, 2002).

$$A. L. I. = \frac{P_u}{f_c(L_w t_w)} \quad (3)$$



**Figura 8.** Factor de confinamiento efectivo empleado para el alma y los elementos de borde

**Fuente:** elaboración propia.



**Tabla 3.** Propiedades de muros analizados

Muro	$N_p$	$h_w$ (m)	$t_w$ (m)	$L_w$ (m)	$A_t$ (m <sup>2</sup> )	$\frac{h_w}{L_w}$	$\frac{L_w}{t_w}$	$\beta$	$\frac{M}{VL_w}$	A.L.I.
1	6	15,3	0,15	2,3	24	6,7	6,8	1,4%	4,9	0,15
2			0,20	2,0	24	7,7	7,7	1,7%	5,5	0,14
3			0,20	2,5	45	6,1	12,5	1,0%	4,4	0,20
4			0,25	1,9	24	8,1	8,1	2,0%	5,8	0,12
5			0,30	1,8	24	8,5	8,5	2,3%	6,1	0,09
6			0,15	4,5	24	6,8	6,8	2,8%	4,8	0,18
7	12	30,6	0,20	4,2	24	7,3	7,3	3,5%	5,1	0,12
8			0,25	3,9	24	7,9	7,9	4,1%	5,5	0,13
9			0,25	4,7	45	6,5	18,8	2,6%	4,6	0,19
10			0,30	3,7	24	8,3	8,3	4,6%	5,8	0,12
11			0,15	6,6	24	7,0	7,0	4,1%	4,9	0,19
12			0,20	6,1	24	7,5	7,6	5,1%	5,3	0,13
13	18	45,9	0,25	5,7	24	8,1	8,1	5,9%	5,7	0,15
14			0,30	5,5	24	8,4	8,4	6,9%	5,9	0,13
15			0,30	6,4	45	7,2	21,3	4,3%	5,1	0,19

Fuente: elaboración propia.

## RESULTADOS

### Cantidades de acero de refuerzo

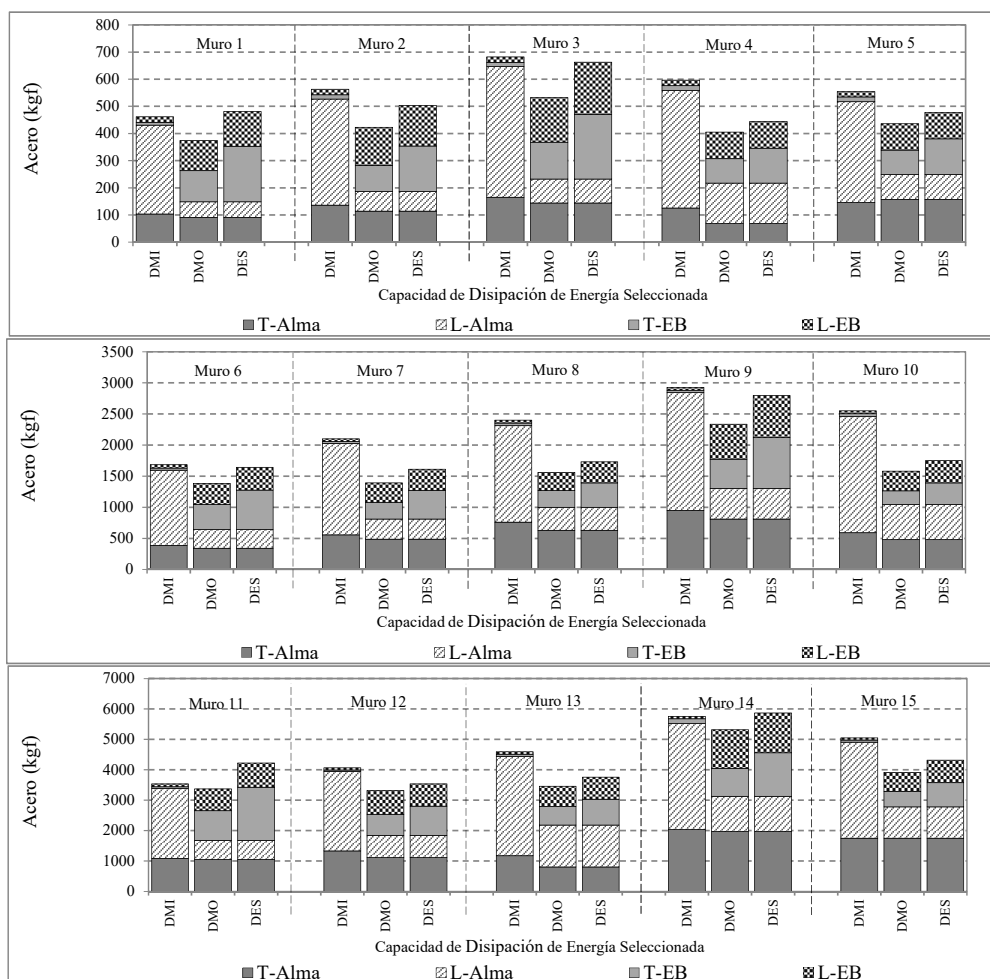
Ya que las dimensiones de cada muro analizado no varían en función del grado de disipación de energía sísmica seleccionado, las cantidades de concreto requeridas no fueron analizadas. Por tanto, en esta sección se analizan los resultados del acero requerido para cada muro, los cuales son presentados en la figura 9. Con el fin de observar el efecto de los requisitos de ductilidad en los muros con capacidad moderada y especial, los cuales se centran en el incremento del confinamiento en los elementos de bordes, y la afectación del refuerzo transversal y longitudinal en el alma del muro debido a la variación del coeficiente de disipación de energía, el peso de acero fue desglosado en refuerzo vertical y horizontal requerido en el alma (L-Alma y T-Alma) y en los elementos de borde (L-EB y T-EB). La razón de que los muros con disipación de energía mínima presenten cantidades en refuerzo asociadas con elementos de borde en la figura 9 obedece a que, para este cálculo, las barras y los ganchos de diámetro 3/8" mencionados en la sección "Diseño estructural" fueron incluidos en este ítem.

En relación a la distribución del refuerzo requerido para los muros en función del grado de disipación de energía seleccionado, se encontró que en los muros con capacidad DMI, el refuerzo transversal y longitudinal en el alma corresponde a un promedio del 28 % y 68 %, respectivamente, del total. En los muros con capacidad DMO esos porcentajes cambian al 31 % y 24 %, respectivamente, mientras que el refuerzo transversal y longitudinal en los elementos de borde corresponde en promedio a un 21 % y 24 % del total. Por último, en los muros con capacidad DES el refuerzo transversal y longitudinal en el alma representan un 27 % y 21 %, respectivamente, del acero requerido. En estos muros, el refuerzo transversal y longitudinal en los elementos de borde es, en promedio, un 30 % y 22 % del refuerzo total.

Al comparar la cantidad total de acero requerida para los muros DMI y DMO, se encontró que en promedio, los segundos requieren un 77 % del total de acero demandado por los muros con capacidad mínima. Esta reducción se logra por el menor acero requerido en el alma debido a la reducción en la demanda a flexocompresión y cortante, resultado directo del incremento en el coeficiente de capacidad de disipación de energía. La comparación de los muros DMI y DES reveló que el acero

total requerido en los segundos es, en promedio, un 89 % del total solicitado en los muros con capacidad mínima. La explicación a este resultado es similar a la presentada para los muros con capacidad moderada; sin embargo, en este caso hay una menor reducción ya que en los muros con capacidad especial se requirió una mayor cantidad de acero, debido a las mayores restricciones en el confinamiento en los elementos de borde. Por ejemplo, al comparar las cantidades de los muros con grado de capacidad de disipación de energía DMO y DES, se encontró que el refuerzo requerido en el alma del muro y el refuerzo vertical de los

elementos de borde eran similares en ambos casos; sin embargo, los muros DMO requirieron, en promedio, de un 63 % del acero transversal provisto en los elementos de borde de los muros DES. Este valor está dentro de lo estipulado en el comentario C.21.3.5 del código NSR-10, en el cual se expresa que los requisitos de confinamiento para columnas DMO fueron establecidos de modo tal que se tenga una cantidad de confinamiento equivalente al 60 % de lo que se exige en columnas DES. De los casos analizados también se observó que el acero requerido en los muros DES sobrepasa o tiende a sobrepasar el requerido en los muros DMI cuando



**Figura 9.** Peso de acero en función del grado de disipación de energía seleccionado: (arriba) 6 pisos, (centro) 12 pisos, (abajo) 18 pisos

**Fuente:** elaboración propia.

se usan muros delgados ( $t_w < 0,15 m$ ) y cuando el índice de muros es bajo (menor a 2 %).

Los resultados anteriores fueron obtenidos usando la reducción permitida en la cuantía longitudinal y transversal del refuerzo en el alma de los muros con capacidad moderada y especial, presentada en la nota 2 de la figura 5(a). Si se opta por usar una cuantía mínima igual al 0,25 % en ambas direcciones, el refuerzo total requerido en los muros se incrementa, siendo este efecto más notorio en los muros DMO y DES. Para este caso, las cantidades promedio de acero requeridas son iguales al 94 % y al 106 %, respectivamente, de la requerida para los muros con capacidad DMI (tabla 4).

### Capacidad de ductilidad de desplazamiento

En la tabla 5 se presenta la comparación de los resultados relacionados con el análisis descrito en la sección "Cálculo de la ductilidad de desplazamiento". Para los muros diseñados con grado de disipación DMI se observó que la capacidad de ductilidad de desplazamiento promedio es 3,2. Por otra parte, en los muros DMO y DES se obtuvieron valores promedios iguales a 7,4 y 7,5 respectivamente, demostrando así una mayor ductilidad global de la sección debido al efecto de los estribos de confinamiento en los elementos de borde. Lo anterior se confirma mediante la comparación del factor de confinamiento ( $K$ ) obtenido para cada caso. Dicho factor representa la relación entre la resistencia a la compresión del concreto confinado ( $f'_{cc}$ ) y el concreto no confinado ( $f'_c$ ). Por ejemplo, para los casos (b) de la figura 8, los factores  $K$  oscilaron entre 1,05 y 1,15, mientras que en los muros DMO y DES los valores promedio de  $K$  fueron 1,45 y 1,60, respectivamente.

Si se confrontan los valores de desplazamiento en el punto de fluencia efectivo se observa que para los tres grados de disipación de energía los resultados son similares. Sin embargo, existe una diferencia importante en el desplazamiento último de los muros. Por ejemplo, en los muros DMO la capacidad de desplazamiento último es, en promedio, 2,5 veces mayor al obtenido en los muros

**Tabla 4.** Peso total de acero en kilos obtenido al emplear cuantías mínimas del 0,25 %

Muro	$W_{DMI}$	$W_{DMO}$ ( $W_{DMO}/W_{DMI}$ )	$W_{DES}$ ( $W_{DES}/W_{DMI}$ )
1	464	454 (0,98)	559 (1,23)
2	578	524 (0,91)	604 (1,15)
3	721	652 (0,90)	782 (1,08)
4	616	537 (0,87)	577 (1,07)
5	567	507 (0,89)	549 (1,08)
6	1844	1572 (0,85)	1967 (1,07)
7	2131	1799 (0,84)	2018 (0,95)
8	2546	2163 (0,85)	2330 (0,92)
9	3121	3128 (1,00)	3589 (1,15)
10	2699	2213 (0,82)	2382 (0,88)
11	3750	4153 (1,11)	5003 (1,33)
12	4141	4235 (1,02)	4460 (1,08)
13	4960	4808 (0,97)	5107 (1,03)
14	5393	5178 (0,96)	5584 (1,04)
15	6143	6730 (1,10)	7277 (1,18)

Fuente: elaboración propia.

DMI, mientras que en los muros DES el factor aumenta a 2,6. Al comparar los valores del momento de fluencia efectivo ( $M_y$ ), que es concomitante con el valor de la curvatura ( $\theta_y$ ) (figura 7), se observa que la resistencia nominal de los muros con capacidad mínima es, en promedio, 1,4 veces mayor a la resistencia de los muros con capacidad moderada y especial. Este es un resultado esperado ya que los muros DMI se diseñaron con un menor valor de coeficiente de disipación de energía y, por tanto, para resistir mayores efectos internos debido a las cargas laterales sísmicas.

Finalmente, si se decide emplear una cuantía mínima longitudinal y transversal en el alma del muro igual a 0,25 %, se encuentra que la capacidad de ductilidad de desplazamiento promedio obtenida para los muros DMO y DES es 6,51 y 7,12, respectivamente. La reducción en la capacidad de ductilidad de desplazamiento comparada con los datos presentados en el párrafo anterior obedece a la reducción en la curvatura última de la sección como resultado del incremento del refuerzo y, por tanto, en la reducción del desplazamiento último. Este resultado concuerda con lo

**Tabla 5.** Comparación de la capacidad de desplazamiento y resistencia en función del grado de disipación de energía seleccionado

Muro	Capacidad DMI				Capacidad DMO				Capacidad DES			
	$\Delta_y$ (m)	$\Delta_u$ (m)	$M_y$ (kN-m)	$\mu_\Delta$	$\Delta_y^*$	$\Delta_u^*$	$M_y^*$	$\mu_\Delta$	$\Delta_y^*$	$\Delta_u^*$	$M_y^*$	$\mu_\Delta$
1	0,14	0,43	2777	3,0	1,0	2,8	0,7	8,2	1,0	2,7	0,7	8,0
2	0,14	0,48	2563	3,3	1,1	2,5	0,7	7,5	1,1	2,5	0,7	7,3
3	0,12	0,40	4408	3,2	1,1	2,8	0,7	8,6	1,1	3,0	0,8	8,6
4	0,14	0,44	2543	3,2	1,3	2,8	0,6	6,8	1,2	2,6	0,6	7,1
5	0,15	0,55	1648	3,8	1,1	2,0	0,9	6,6	1,2	2,1	0,9	6,8
6	0,27	0,81	11640	3,0	1,1	2,9	0,6	8,2	1,1	3,0	0,6	8,2
7	0,28	1,16	10910	4,2	1,1	2,0	0,6	7,8	1,1	2,0	0,6	7,6
8	0,29	0,94	10830	3,3	0,9	1,9	0,7	7,0	1,1	2,5	0,7	7,5
9	0,26	0,81	17200	3,1	1,0	2,7	0,8	8,1	1,1	2,9	0,8	8,1
10	0,34	0,90	11220	2,7	1,0	2,5	0,7	6,7	1,0	2,6	0,7	6,8
11	0,41	1,23	22270	3,0	1,1	2,8	0,8	7,7	1,1	3,0	0,8	8,0
12	0,39	1,32	19620	3,4	1,2	2,6	0,8	7,4	1,2	2,6	0,8	7,3
13	0,52	1,40	23950	2,7	1,0	2,5	0,7	7,1	1,0	2,5	0,7	7,0
14	0,42	1,60	26880	3,8	1,1	1,9	0,7	6,6	1,1	1,9	0,7	6,6
15	0,43	1,09	36160	2,5	0,9	2,8	0,9	7,5	1,1	3,3	0,9	7,6

\*Expresado como función del valor obtenido para el muro con capacidad DMI y redondeado a una cifra decimal

**Fuente:** elaboración propia.

expuesto por Moehle (2015). En relación a la resistencia nominal a flexión de los muros DMO y DES, se encontró que estas son, en promedio, 1,3 veces menor comparadas con la de los muros DMI.

## CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Los resultados obtenidos a partir del estudio analítico desarrollado permitieron establecer las siguientes conclusiones:

- El uso de un grado de capacidad de disipación de energía mayor al mínimo establecido por el reglamento NSR-10 para zonas de amenaza sísmica baja puede generar menores consumos de acero de refuerzo en muros estructurales de concreto reforzado fundidos in situ. Esto obedece a que a pesar de que los requisitos de ductilidad para muros con capacidad moderada y especial requieren una mayor cantidad de acero transversal, como resultado de exigencias más estrictas en el confinamiento para los elementos de borde, las cuantías de acero por flexión y cortante en el alma del

muro disminuyen considerablemente y controlan el valor total de acero requerido en el muro.

- Respecto al punto anterior, y para la zona de amenaza sísmica estudiada, la mayor reducción se logra cuando en el diseño se emplean muros con densidades de muro intermedias y altas, espesores mayores a 0,15 m, y capacidad de disipación moderada.
- El uso de capacidades de disipación de energía especial en el diseño de los muros puede resultar en mayores consumos de acero comparadas con las del diseño obtenido con capacidad mínima, sobre todo si el ingeniero proyectista emplea como criterio de diseño cuantías mínimas longitudinales y transversales iguales al 0,25 %, omitiendo la reducción permitida en el código NSR-10 en función de la demanda a cortante.
- Se confirmó que los muros con capacidad de disipación moderada y especial presentan una mayor capacidad de desplazamiento comparados con los muros de capacidad mínima, lo cual sigue el objetivo de diseño de retrasar el potencial colapso mediante un aumento en la ductilidad.

- El hecho de que los muros con capacidad mínima presenten mayores valores de resistencia a flexión que los muros con capacidad moderada y especial genera el cuestionamiento de determinar el nivel de desempeño y el grado de daño que podrían tener los muros bajo la demanda sísmica real de la zona, o incluso bajo otras fuentes de demandas laterales como las acciones impuestas por el viento. Lo anterior puede ser explorado mediante una combinación de ensayos experimentales o análisis no lineales estáticos y dinámicos. Esto permitirá concluir si, en efecto, la decisión de usar un grado de capacidad de disipación de energía diferente al mínimo establecido para la zona no solo resulta en una reducción en los costos de la estructura, sino que también mejora la respuesta global sísmica de la edificación.

## FINANCIAMIENTO

El estudio presentado en este artículo fue financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander, mediante el proyecto VIE-1372. Las conclusiones reflejan los puntos de vista de los autores y no aquellas del patrocinador.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abo-Shadi, N.; Saiidi, M. y Sanders, D. (2000). *Seismic Response of Reinforced Concrete Bridge Pier Walls in the Weak Direction*. Búfalo: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
- Arteta, C., & Moehle, J. (2015). Comportamiento Experimental de elementos de borde de muros con capacidad de disipación de energía especial (DES). *VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Bogotá.
- ASCE (2013). *ASCE/SEI Standard 41-13: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) (2012). *Reglamento colombiano de construcciones sismo-resistentes*. Bogotá.
- Blandón, C. y Bonett, R. (2013). *Evaluación numérica y experimental del comportamiento de muros esbeltos de concreto reforzado*. VI Congreso de Ingeniería Sísmica. Bucaramanga.
- Blandón, C., Rave, J. y Bonett, R. (2015). Comportamiento de muros delgados de concreto reforzado ante cargas laterales. *VII Congreso Sísmica*. Bogotá.
- Carrillo, J.; González, G. y Rubiano, A. (2014). Displacement ductility for seismic design of RC walls for low-rise housing. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 11(4), 725-737.
- Carrillo, J.; Sánchez-Cruz, M. y Viviescas, A. (2014). Strains on steel reinforcement of low-rise concrete walls during shake table tests. *Ingeniería e Investigación*, 34(1), 36-41.
- Computers & Structures Inc. (2009). *CSI Analysis references Manual for SAP 2000, Etabs, Safe*. CSI.
- Hidalgo, P., Ledezma, C., & Jordán, R. (2002). Seismic behavior of Squat Reinforced Concrete Shear Walls. *Earthquake Spectra*, 18(2), 187-208.
- Mander, J.; Priestley, M. y Park, R. (1994). Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8), 1804-1826.
- Moehle, J. (2015). *Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings*. 1a. ed. Nueva York: McGraw-Hill Education.
- Naranjo, C.; Marulanda, J. y Madera, S. (2015). *Modelo analítico para la estimación de la respuesta histerética de muros delgados de concreto reforzado*. VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Bogotá.
- Urrego, H. y Bonett, R. (2010). A Displacement based Design Method for Mediumrise Reinforced Concrete Walls. *Dyna*, 77(163), 1325.
- Wallace, John W. (2007). Modelling Issues for Tall Reinforced Concrete Core Wall Buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 16 (5), 615-632.
- Wood, S. (2005). Design of R/C Structural Walls: Balancing Toughness and Stiffness. En: P. Fajfar y H. Krawinkler. *Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings* (pp. 175-185). Nueva York: Elsevier Applied Science.





## Desarrollo y ensayo de un sensor químico de fibra óptica para la medición de concentraciones de dióxido de carbono

### Development and testing of a chemical sensor of micro-structured optic fiber for measuring carbon dioxide concentrations

María Angélica Acosta Pérez<sup>1</sup>, Sir Alexci Suárez Castrillón<sup>2</sup>, Albert Miyer Suárez Castrillón<sup>3</sup>

**Fecha de recepción:** 17 de febrero de 2016

**Fecha de aceptación:** 10 de septiembre de 2016

**Cómo citar:** Acosta P., M.A.; Suárez C., S.A. y Suárez C., A.M. (2016). Desarrollo y ensayo de un sensor químico de fibra óptica para la medición de concentraciones de dióxido de carbono. *Revista Tecnura*, 20(50), 29-42. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a02

#### RESUMEN

**Objetivos:** Desarrollar un sensor de fibra óptica para la medición de CO<sub>2</sub>, medir las variaciones del índice de refracción de un medio rico en CO<sub>2</sub> a través de cambios de presión y de temperatura controlados, y comparar el comportamiento del índice de refracción experimental con respecto al índice de refracción teórico calculado.

**Materiales y métodos:** Se utilizó fibra microestructurada con núcleo hueco con recubrimiento sólido de sílice, con diámetros internos de 48 y 56 micrómetros, y se seleccionó dimetilformamida (DMF) como líquido conductor de luz, para la fabricación del sensor. El llenado de la fibra se hizo por presión; se realizaron los procesos de emenda por fusión, emenda por pegante de alta temperatura y emenda mecánica, para la conectorización de la fibra. Durante el proceso de variación de temperatura y presión de la cámara de CO<sub>2</sub>, el índice de refracción se midió mediante un refractómetro.

**Resultados:** Se obtuvieron los perfiles de índice de refracción con respecto a la temperatura en los ciclos de enfriamiento y calentamiento, y los registros

puntuales de los 5 puntos termodinámicos evaluados; se obtuvo el cálculo del índice para dichos cinco puntos y se calculó el porcentaje de error del índice experimental. El porcentaje de error está dentro del rango de 0,016% a 0,03%.

**Conclusiones:** Fue posible medir la transmisión de luz blanca a través de un fluido en diferentes fases, y se registro un cambio significativo en el índice de refracción en cada cambio de fase mediante el sensor fabricado.

**Palabras Clave:** Dimetilformamida (DMF), ecuación de Fresnel, fibra óptica microestructurada (MOFs), índice de refracción, sensor químico, luz blanca, transmitancia y absorbancia.

#### ABSTRACT

**Objectives:** The present study focused on the development of a optic fiber sensor for carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), the measuring of variations of the refractive index of a CO<sub>2</sub> medium undergoing controlled changes of temperature and pressure, and comparing this experimental refractive index with a calculated theoretical refractive index.

- 1 Ingeniera mecánica, magíster en Ingeniería Mecánica. Docente ocasional de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Norte de Santander. Colombia. Contacto: [maacostap@ufpso.edu.co](mailto:maacostap@ufpso.edu.co)
- 2 Ingeniero de sistemas, doctor en Ingenierías. Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Norte de Santander. Colombia. Contacto: [sasuarzc@ufpso.edu.co](mailto:sasuarezc@ufpso.edu.co)
- 3 Ingeniero mecánico, magíster en Ingeniería Mecánica, doctor en Ingeniería. Docente de la Universidad de Pamplona, Ciudad Universitaria, Pamplona, Norte de Santander. Colombia. Contacto: [albertmiyer@unipamplona.edu.co](mailto:albertmiyer@unipamplona.edu.co)

**Materials and methods:** For the making of the optical sensor, we used samples of 48 to 56 micrometers inner diameter micro-structured optic fiber with a solid silica covered hollow center; and we selected dimethylformamide as the light conductor fluid. The fiber was filled with pressure; the connectorization of the fiber was made with the fusion, the high-temperature adhesive, and the mechanical processes. We use a refractometer for measuring the refractive index during the temperature and pressure change processes in the CO<sub>2</sub> chamber.

**Results:** Profiles of the refractive index vs. temperature in cooling and heating cycles were obtained, as well as the punctual measures of the refractive index in five

fixed thermodynamic points tested; the calculation for the theoretical refractive index for these points was obtained, and was compared with the experimental ones. The percentage of error of the experimental refractive index was estimated between 0.016% and 0.03%.

**Conclusions:** We achieved the measuring of transmission of white light through a fluid in different phases, and we registered significant changes in the refractive index in each phase change using the fabricated optic sensor.

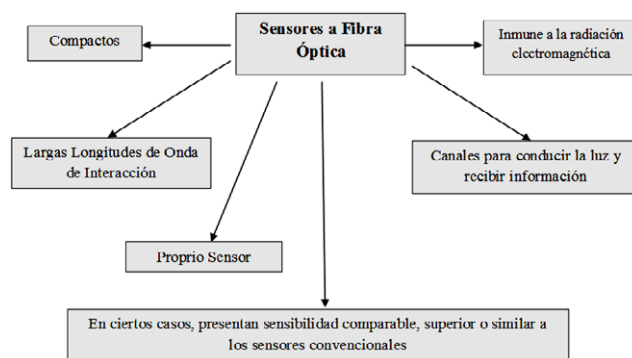
**Keywords:** Chemical sensor, dimethylformamide (DMF), Fresnel equations, microstructured optical fiber (MOFs), refractive index, transmittance and absorbance, white light.

## INTRODUCCIÓN

Un sensor químico es un dispositivo que puede ser usado para medir la concentración o la actividad de una especie química de una muestra de interés. Es capaz de funcionar de una manera continua y reversible directamente en la matriz de la muestra. Entre los sensores químicos existentes, aquellos basados en propiedades electroquímicas son los más conocidos (Moura dos Santos, 2007). La finalidad del sensor químico ideal es suministrar las distribuciones espaciales y temporales de una especie molecular o iónica particular en tiempo real (Mizaikoff, Taga y Kellner, 1995). En la actualidad, los sensores químicos de fibra óptica han marcado la instrumentación de nuevas tecnologías para detectar parámetros en varios procesos industriales, diagnósticos médicos y controles del medio ambiente. Las fibras ópticas son prometedoras debido a su tamaño pequeño y su bajo costo, además de ofrecer considerables ventajas comparadas con los sensores tradicionales. Para construir un sensor a fibra óptica, además de la propia fibra óptica, se requiere de varios equipos como una fuente de luz, un componente óptico de concentración, un mecanismo de modulación sensible, un fotodetector, etc. Hay tres parámetros críticos para la utilización del sensor: la sensibilidad,

la escala dinámica y la precisión analítica (Wen, Jaffrezic, Jean y Lacroix, 2001). El funcionamiento del sensor es basado en parámetros dominantes del proceso de modificación del recubrimiento y de la propagación de la luz dentro de la fibra.

Los sensores químicos a fibra óptica son formados básicamente por un reactivo inmovilizado junto a la fibra óptica, al interactuar con el analito, el reactivo modifica sus propiedades ópticas y estas modificaciones son transmitidas por el núcleo de la fibra. La figura 1 muestra un resumen de las principales características de los sensores a fibra óptica convencional (Monro *et al.*, 2001).



**Figura 1.** Resumen de las principales características de sensores a fibra óptica convencional

**Fuente:** Monro *et al.* (2001).

Los sensores químicos presentan ventajas y limitaciones en comparación con otro tipo de sensores, entre las cuales están: la inmunidad a la interferencia eléctrica y electromagnética, dispensa de señal de referencia, presenta facilidad para miniaturización y resistencia a la corrosión, y posibilita varias determinaciones simultáneamente. Aunque la luz ambiente pueda interferir en la respuesta, la vida útil del sensor puede ser pequeña, el tiempo de respuesta puede ser largo, y para ciertos sensores presentan linealidad limitada (Holloway *et al.*, 2007).

Los sensores de fibra óptica pueden ser clasificados en dos grandes grupos: los extrínsecos, en los que la fibra óptica desempeña un papel pasivo, apenas conduciendo la radiación de la fuente hasta la fase sensora y de esta hasta el detector; las propiedades ópticas de la fase sensora son alteradas con la interacción del analito pudiendo ser monitoreadas por medio de la transmitancia, reflectancia o fluorescencia, en las aplicaciones más usuales (Sepaniak *et al.*, 1990). En los sensores intrínsecos, la fibra óptica es parte fundamental del sistema de medición, pues afecta directamente la calidad de la luz, debido a que se encuentra en contacto directo con la muestra; la configuración más usada es una parte de fibra óptica revestida sustituida por un reactivo inmovilizado, con un índice de refracción semejante, de forma que las propiedades de transmisión de la fibra no sean significativamente alteradas. Las variaciones del índice de refracción en la muestra provienen de las alteraciones en la densidad del material ocasionando pérdida

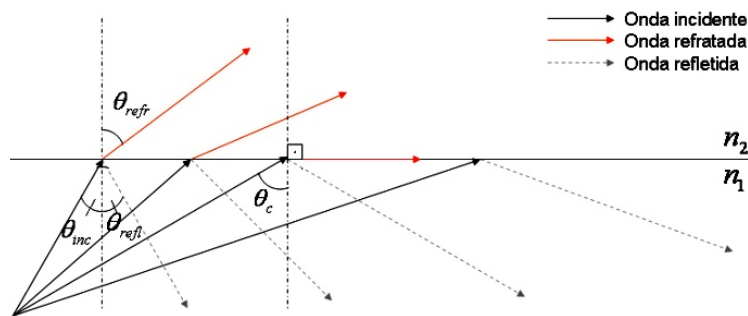
de confinamiento modal (o aumento, caso que el índice del material disminuya), resultando en una disminución (o aumento) de la intensidad del campo detectado por el fotodetector; tales variaciones de intensidad son relacionadas a las variables a ser medidas (Sepaniak *et al.*, 1990).

La luz cuando se quiere guiar a través de la fibra óptica se hace por reflexión interna total donde la luz es emitida por una fuente y propagado en un medio de índice de refracción  $n_1$ , encontrando otro medio con índice de refracción  $n_2$ , pudiendo sufrir una refracción, una reflexión o ambas. La ecuación (1) es descrita por la ley de Snell (Yuan y El-Sherif, 2003):

$$n_1 \sin \theta_{inc} = n_2 \sin \theta_{refl} \quad (1)$$

Donde  $\theta_{inc}$  y  $\theta_{refl}$  son ángulos de incidencia y de refracción, respectivamente, tomados a partir de la normal de la interfase mostrada en la figura 2, observándose que la reflexión ocurre cuando la luz no tiene ninguna variación en el medio de propagación ( $n_1 = n_2$ ). Se tiene que para esto el ángulo de incidencia como el ángulo de reflexión deben ser los mismos ( $\theta_{inc} = \theta_{refl}$ ).

Existe, también, un ángulo conocido como ángulo crítico  $\theta_c$ , a partir del cual la refracción deja de ocurrir. La figura 2 muestra el esquema de propagación de la luz en la interfase de dos medios de índice de refracción diferentes, en el que se observa el comportamiento del eje de luz al encontrarse con sus respectivos ángulos para identificar



**Figura 2.** Esquema de reflexión interna total

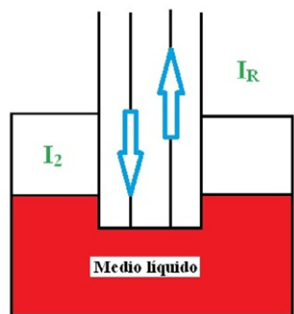
**Fuente:** Monro *et al.* (2001).



los fenómenos de reflexión, refracción o ambos (Kwang, Kyu, Hwangbo y Kyung, 2006).

## PRINCIPIO FÍSICO: REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE LA LUZ

Cuando una sustancia cambia de fase, hay un cambio en el índice de refracción que posibilita saber el cambio de fase medido con la variación de su índice de refracción. El principio de Fresnel describe el fenómeno de reflectividad, donde el eje de luz es reflejado y refractado al pasar por una interfaz que separa dos medios con diferentes índices de reflexión (vidrio/aire, vidrio/agua). Con este fenómeno se puede calcular el índice de un medio si el índice de refracción de otro medio, las intensidades emitidas y reflejadas del eje fueran conocidas, así, la técnica se vuelve simple, flexible y de fácil determinación del índice de cualquier sustancia (Suzuki, Takeuchi, Takenaka y Okada, 2010). La figura 3 ilustra cómo interactúa la fibra óptica con un medio líquido, donde la interfaz es fibra-sustancia  $I_2$  es la intensidad incidente e  $I_R$  es la intensidad reflejada.



**Figura 3.** Fibra óptica interactuando con un medio

**Fuente:** elaboración propia.

Este fenómeno se puede expresar por la razón entre las intensidades reflejada e incidente. También se conoce con el nombre de reflectancia (ecuación 2),

$$R = \frac{(n_s - n_f)^2}{(n_s + n_f)^2} \quad (2)$$

Donde,  $n_f$  es el índice de refracción de la fibra y  $n_s$  se conoce como el índice de refracción de la sustancia (Suzuki, Takeuchi, Takano, Ohigashi y Takenaka, 2001). Esta ecuación se fundamenta en la ley de Snell para una longitud de onda dada.

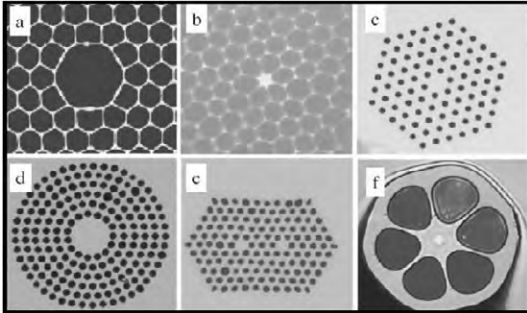
## SENSORIAMENTO ÓPTICO

Existen diferentes técnicas de sensoriamiento utilizadas en la fabricación de sensores de fibra óptica, entre las cuales se encuentran las redes de Bragg (RBF); estas son elementos intrínsecos sensibles que pueden ser escritos por la luz ultravioleta en una fibra de sílice, y tiene todas las ventajas normalmente atribuidas a los sensores de fibra óptica (Monro *et al.*, 2001). Además se encuentran los sistemas de monitoreo distribuidos que consisten en longitud continua de fibra óptica que es el medio a través del cual las medidas serán realizadas, entre los más usados están: el OTDR (*optical time domain reflectometer*), el efecto Raman, y el efecto Brillouin (Quirino, Toledo y Lisboa, 2011).

Las fibras ópticas microestructuradas (MOF – *microstructured optical fibers*) o fibras ópticas de cristal fotónico (PCF – *photonic crystal fiber*) son todas aquellas fibras de sílice que presentan un arreglo regular de agujeros de aire en el revestimiento o en la región del núcleo, y se extienden en la dirección axial de la fibra (Monro, Richardson y Bennett, 1999). Estas fibras se presentan en diversas formas, tamaños y distribuciones, diferentes de los agujeros, donde la luz es guiada por reflexión interna total (Knight, 2003).

Este nuevo tipo de fibra óptica trae consigo muchas novedades y avances en la tecnología de las fibras, como en la fabricación de la preforma, y en la misma presencia de los agujeros de aire en el recubrimiento o en el núcleo. Hay ejemplos específicos de estos avances que incluye el guiado monomodo o multimodo en un amplio intervalo de longitud de onda; bajas pérdidas por curvatura; grande área modal; alta linealidad; guiado en la región de bajo índice de refracción por el efecto de *bandgap* fotónico, y generación de dispositivos por inserción de

materiales dentro de las fibras (Fini y Bise, 2004). En la figura 4 se muestran diferentes ejemplos de fibra microestructurada para algunas aplicaciones.



**Figura 4.** Secciones transversales o facetas de varios tipos de fibra óptica microestructurada. La parte blanca corresponde a la sílice y las regiones negras son los agujeros de aire. (a) Fibra óptica con núcleo hueco. (b) Fibra de núcleo sólido pequeño con alta fracción de aire. (c) Fibra microestructurada monomodo. (d) Fibra con modelo circular de agujeros. (e) Fibra con dos núcleos. (f) Fibra con grandes agujeros de aire

**Fuente:** Fini y Bise (2004).

Los sensores a fibra óptica microestructurada tienen la ventaja de inserción de material dentro de la misma, ya que poseen agujeros de aire en toda la longitud de la fibra, donde se puede obtener una mayor interacción del material con la luz guiada, permitiendo mayor sensibilidad de la luz con el fluido. Los agujeros en la cáscara del índice se pueden llenar con un líquido o un gas, y la especie es detectada por el campo evanescente que se propaga por los agujeros (Monro *et al.*, 2001). En cuanto a la inserción de fluidos (líquidos o gases) en la fibra para medir la naturaleza del fluido o para aumentar la sensibilidad de la fibra a un parámetro externo que se quiera medir, se pueden analizar tres situaciones:

- Fibra de núcleo sólido con fluido en la cáscara guiando por RIT (reflexión interna total), para detectar el fluido o aumentar la sensibilidad de la fibra a un parámetro externo.

- Fibra de núcleo hueco relleno con solo un núcleo, guiando por RIT, y la fibra con núcleo líquido se pueden usar para la detección en los estudios de óptica no lineal.
- Fibra con núcleo hueco con fluido en todos los agujeros (cáscara y núcleo) guiando por *band-gap* fotónico (Jin, 2009).

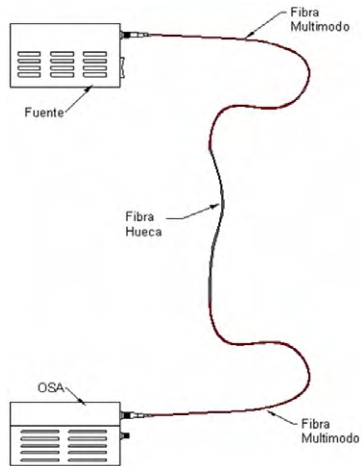
En la detección de gases y líquidos con una fibra óptica convencional, la luz tiene que interactuar con los espacios libres en la mayoría de la muestra; en este caso, la longitud de la interacción es generalmente limitada por el espacio y el volumen de la muestra. La técnica de detección exige la focalización del eje, esta longitud se acorta en  $\pm 1$  mm. A diferencia de las fibras MOF donde la muestra es colocada dentro de la fibra que interactúa de manera eficiente con la luz guiada. Debido a las dimensiones micrométricas de los agujeros, las MOF pueden detectar muestras de volumen-nanolitro en longitudes largas (Lemus, Estupiñán y Guillén, 2013). Por otra parte, la luz puede ser confinada a un área pequeña, por tanto puede alcanzar altas intensidades facilitando las técnicas ópticas de detección (Cordeiro, Matos, Dos Santos y Bozolan, 2007).

## METODOLOGÍA Y MÉTODOS

El desarrollo del sensor básicamente consiste en colocar un fluido (líquido o gas) en el interior de la MOF, para después ser unida a los cordones ópticos por donde se podrá transmitir la luz de una fuente para analizar su propagación en el fluido que se encuentre dentro de la MOF. Para tal motivo, es necesario tomar diferentes muestras de MOF tanto en el diámetro del núcleo, como en la longitud de la fibra. Después de seleccionadas las muestras, estas se llenan con el fluido a analizar, la inserción del fluido se hace por dos formas: capilaridad o presión. En la primera se usa la fuerza de capilaridad en tubos circulares, en la cual al sumergir un tubo capilar dentro de un líquido, este entra en contacto con las paredes del tubo y así se

llenará el tubo capilar. Esta forma es usada para llenar muestras pequeñas de fibra. Ya para el caso de llenado por presión, el cual es usado para líquidos y gases, es necesaria la presencia de una cámara de presión debidamente condicionada, esta debe permitir la salida de las fibras, y que pueda contener el fluido dentro de esta, donde una punta de la fibra se encuentra alojada. Para líquidos se aplica presión constante haciendo que el fluido llene todos los agujeros de la fibra, de esta forma se puede llenar cualquier longitud de fibra.

Una vez que las fibras se llenan con el fluido se procede a su conectorización, a partir de esto se realiza el montaje óptico el cual consta de una fuente de luz blanca, un analizador de espectro óptico (OSA), estas son unidas por cordones ópticos (*pig tail*). Con esto es posible observar la respuesta de la propagación de la luz guiada por la fibra. En la figura 5 se observa el esquema del montaje óptico.



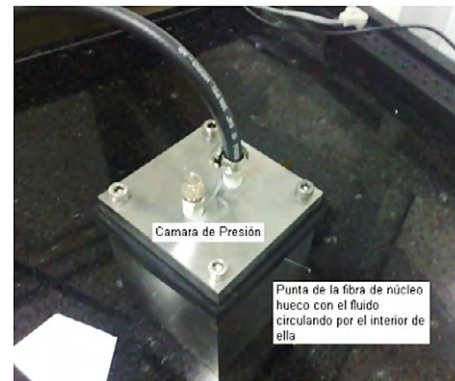
**Figura 5.** Montaje óptico del sistema de medición

**Fuente:** elaboración propia.

### Preparación de las muestras de fibra

Se utilizó fibra microestructurada con núcleo hueco con recubrimiento sólido de sílice, con diámetros internos de 48 y 56 micrómetros. Las muestras son seleccionadas por el diámetro del núcleo de la MOF, con diferentes longitudes. La fibra es

descubierta en las puntas que consiste en retirar parte del recubrimiento externo del acrilato de la fibra, eliminando el residuo con alcohol isopropílico, y después clivar cada punta de forma que exista concordancia en la simetría en ellas, para que de esta forma se pueda entrar en contacto directo con el fluido utilizado para llenar la estructura de las fibras, antes de ser emendadas a los cordones multimodos. Las fibras se llenaron a presión, ya que el efecto capilar no garantiza que la introducción del fluido sea uniforme a lo largo de la muestra, causando problemas en la medición (figura 6).



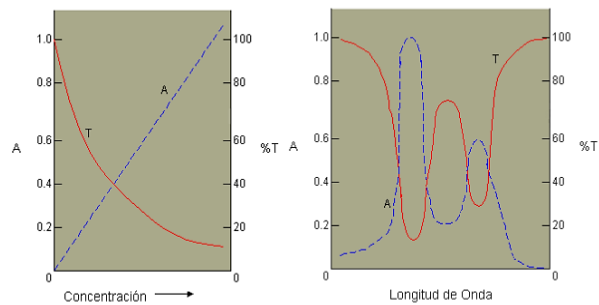
**Figura 6.** Proceso de llenado de la fibra de núcleo hueco

**Fuente:** elaboración propia.

### Determinación del fluido circulante en la fibra

El fluido seleccionado debe tener un índice de refracción mayor que el del recubrimiento de la fibra utilizada, adicionalmente es importante conocer la espectroscopia ultravioleta visible del fluido, utilizando luz en el rango visible, donde se puede determinar las longitudes de onda de mayor absorción o densidad óptica del fluido utilizado, ya que define la relación logarítmica entre la intensidad de la luz incidente sobre el fluido y su intensidad transmitida a través del fluido. Se hicieron varias pruebas para seleccionar el fluido; se usaron muestras químicas térmicamente activadas, entre ellas un conjunto de amidas como el dimetilformamida (DMF), acetileno, nitrógeno, etc.

Para el comienzo se hizo una simulación numérica del fenómeno físico presente, la reflexión de Fresnel, observándose el comportamiento que ayudó a obtener datos de referencia, como lo fue el porcentaje de reflectividad, importante en la curva de calibración del sensor y base para los ensayos de CO<sub>2</sub> (figura 7). Esto con el fin de hacer el montaje del sistema de medición que consta del sistema óptico, electrónico y mecánico.



**Figura 7.** Reflectividad de la sustancia para la base del sensor de CO<sub>2</sub>

**Fuente:** elaboración propia.

## Conectorización de las muestras de Fibra

La conectorización óptica consiste en la unión de dos o más segmentos de fibra, pudiendo ser permanente o temporaria. Esta sirve para prolongar un cordón óptico, o para la conexión de un equipo activo al proceso. Se realizaron tres tipos de conectorización, para seleccionar la que mejor

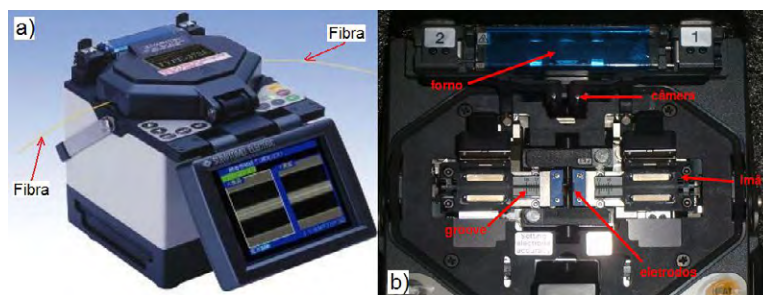
resultados presente, a esta también se le conoce con el nombre de *emenda óptica*. Los tres tipos se describen a continuación.

### *Emenda por fusión*

En este tipo la fibra es introducida en una máquina de fusión térmica (figura 8), debidamente limpia y clivada a un ángulo de 90°, alineando para someterla a un arco voltaico producido por la máquina, que eleva la temperatura en las puntas de la fibra, provocando derretimiento para soldar. El arco voltaico es obtenido a partir de una diferencia de potencial aplicada sobre dos electrodos de metal. Después, la fusión de la fibra es revestida por resinas que tienen la función de ofrecer resistencia mecánica en la emenda, protegiéndola contra quiebra o fractura.

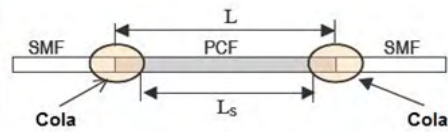
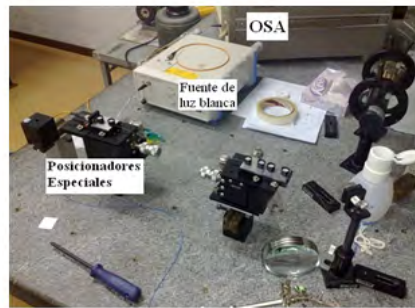
### *Emenda con pegante de alta temperatura*

Es necesario alinear los tres ejes (x,y,z) en los posicionadores especiales, haciendo que las puntas queden bien próximas una de la otra, antes de colocar el pegante instantáneo de cianoacrilato Loctite No. 22, el cual tiene una viscosidad elevada para mayor fijación en la fibra, retardando el secado por 24 horas. Durante este proceso es necesario inspeccionar el paso de la luz blanca ya que el pegante puede generar dislocamiento entre las fibras, debido al peso que este puede generar en estas; se realiza un montaje temporario entre la fuente de luz y la OSA. La figura 9 muestra el montaje para realizar una emenda con pegante, además del esquema para realizar una emenda con pegante.



**Figura 8.** Máquina de emenda por fusión; (b) mecanismos para la fusión

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 9.** Montaje para hacer emenda con pegante

**Fuente:** elaboración propia.

### Emenda mecánica

Se basa en el alineamiento a través de estructuras mecánicas. Son dispositivos dotados de trabas para que la fibra no se mueva en el interior de estos, además de contener geles entre las fibras, conocido como *gel cazador de refracción*, que disminuye las pérdidas de Fresnel (reflexión).

## RESULTADOS

Se prepararon varias muestras para analizar el comportamiento de cada una de ellas, para así obtener el rango de longitud de onda permisible para que el sensor detecte las cantidades de CO<sub>2</sub> presentes en el medio.

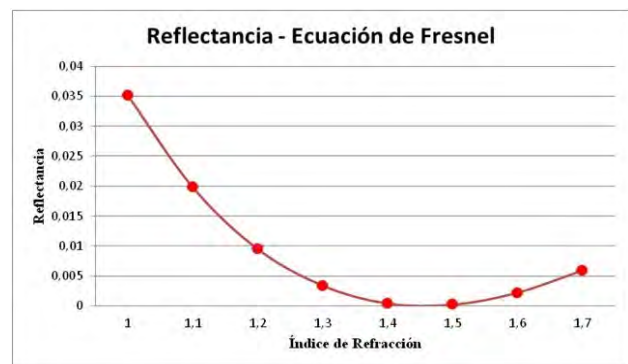
Se desarrolló un código numérico donde se resaltó el uso de la ecuación de Snell (ecuación 2) con la que fue posible analizar la reflectancia de diferentes materiales, dejando como parámetro fijo el índice de refracción de la fibra óptica usada en el proceso, en este caso la fibra microestructurada tiene un índice de refracción de 1.462. Se hizo una variación de índices entre 1 y 1,7 en intervalos de 0,1. La tabla 1 muestra los datos numéricos obtenidos con el uso del programa.

El comportamiento del índice de refracción se puede observar en la figura 10; la simulación fue realizada con el objetivo de observar y conferir un comportamiento aproximadamente cuadrático para valores próximos de cero, esperado por la teoría de la relatividad.

**Tabla 1.** Reflectancia para diferentes índices de refracción a través de las simulaciones numéricas

Índice de refracción	Reflectancia para ( $\theta = 0$ )
1	0,0351
1,1	0,0198
1,2	0,0095
1,3	0,0034
1,4	0,0004
1,5	0,0002
1,6	0,0022
1,7	0,0059

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 10.** Comportamiento de la reflectancia con el índice de refracción

**Fuente:** elaboración propia.

Después de los ensayos previos realizados, se seleccionó el dimetilformamida (DMF) como

líquido conductor de la luz para el desarrollo del sensor, este se trabajó a temperatura ambiente pasando por un cambio de fase de líquido a sólido; este paso de fase se hizo con hielo seco e hidrógeno, se tomaron los espectros de la transmitancia y absorbancia, que son los que determinan cómo es el paso de la luz blanca a través de la fibra óptica, en la figura 11 se muestra cómo la luz es transmitida por el líquido dentro de esta.

En la figura 12 se observa los espectros de transmitancia y absorbancia del dimetilformamida, que definen la cantidad de luz incidente y transmitida a través del líquido.

Los ensayos preliminares se adelantaron para analizar el comportamiento del sistema proyectado e implementado, y para observar el cambio de fase del  $\text{CO}_2$  de gas a líquido (figura 13). Consistió en elevar la presión de la cámara hasta 4000 KPa,

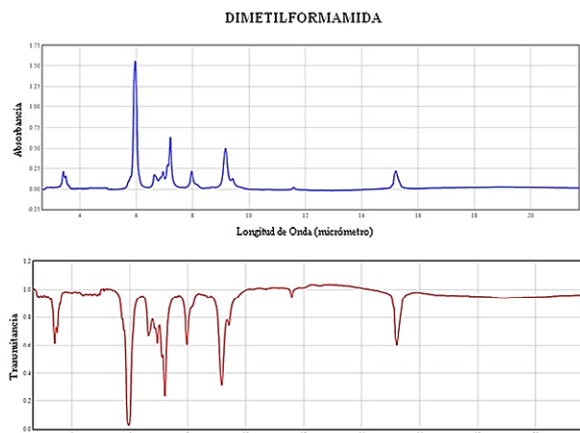
disminuyendo la temperatura a  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  en un baño compuesto de alcohol y hielo seco para después generar un calentamiento lento. La prueba se dividió en dos etapas, con periodos de tiempo de dos horas y media para la primera etapa, y cinco horas para la segunda. En la primera se hizo un enfriamiento, disminuyendo lentamente la temperatura de la cámara hasta alcanzar una temperatura ambiente de  $23\text{ }^\circ\text{C}$  hasta  $-40\text{ }^\circ\text{C}$ , obteniendo tres puntos termodinámicos. En la segunda etapa, se realizó calentamiento lento hasta una temperatura de  $19\text{ }^\circ\text{C}$  a una presión de 5600 KPa para conseguir un cuarto estado termodinámico (4 punto).

La figura 14 presenta en detalle la primera etapa de enfriamiento y sus tres estados termodinámicos, donde se observa que en el primer estado se inicia a temperatura ambiente y presión de 4000 KPa, disminuyendo progresivamente la temperatura,



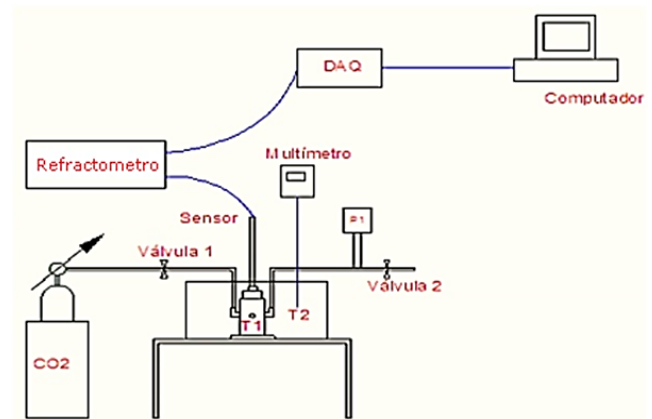
**Figura 11.** Paso de luz blanca a través del dimetilformamida (DMF)

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 12.** Espectros de la absorbancia y transmitancia del dimetilformamida (DMF)

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 13.** Montaje del banco experimental para las pruebas realizadas

**Fuente:** elaboración propia.

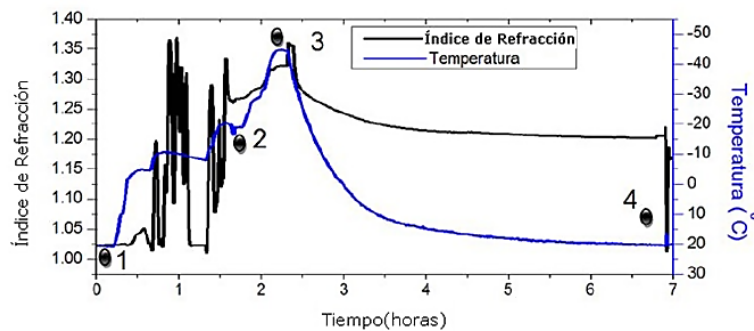
hasta entrar en la zona de transición (línea de saturación líquido gaseoso) donde ocurre una fuerte variación en el índice de refracción. Para salir de la zona de fluctuaciones y pasar para la fase líquida, la presión es elevada para permitir el paso del flujo de CO<sub>2</sub> para la cámara de presión. El punto dos y tres se encuentra en la fase líquida con una presión constante de 5600 KPa.

En la segunda etapa se calentó lentamente el CO<sub>2</sub> (cambió de calor con el medio) a presión de 5600 KPa por un periodo de cinco horas; la figura 15(a) representa los cambios de fase en esta etapa. Los puntos 3 y 4 se encontraban en la fase líquida. Para el punto 3 la temperatura de la cámara fue baja, a medida que aumentaba el índice de refracción disminuía de forma lenta; para el punto 4 la cámara se despresurizó, por lo que hubo un cambio de fase

líquida a gaseosa. La figura 15(b) muestra la trayectoria de los cuatro ciclos termodinámicos obtenidos a través de los ensayos en el diagrama de fase del CO<sub>2</sub>, donde los puntos 2, 3 y 4 se encontraban en la fase líquida y el punto 1 en la fase gaseosa.

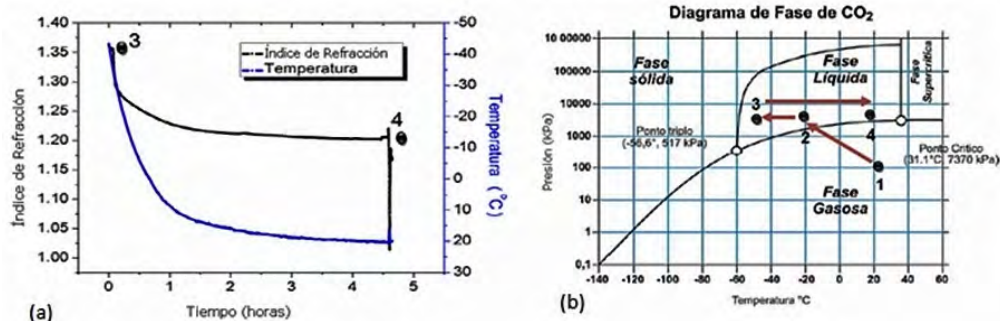
Después de realizar un ensayo preliminar se seleccionaron las condiciones iniciales para la toma de los resultados, estas condiciones fueron:

1. Se inició con una temperatura de  $T_1 = 289$  K y presión de  $P_1 = 100$  kPa.
2. Se enfrió hasta la temperatura de  $T_2 = 235$  K y presión de  $P_2 = 100$  kPa.
3. La temperatura  $T_3 = 235$  K se mantuvo constante hasta alcanzar una presión de  $P_3 = 5600$  kPa, que era la presión del cilindro de CO<sub>2</sub>.



**Figura 14.** Variación de la temperatura e índice de refracción vs. tiempo identificando los estados termodinámicos

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 15.** (a) Variación del índice de refracción; (b) ubicación de los cuatro ciclos termodinámicos en el diagrama de fase del CO<sub>2</sub>

**Fuente:** elaboración propia.

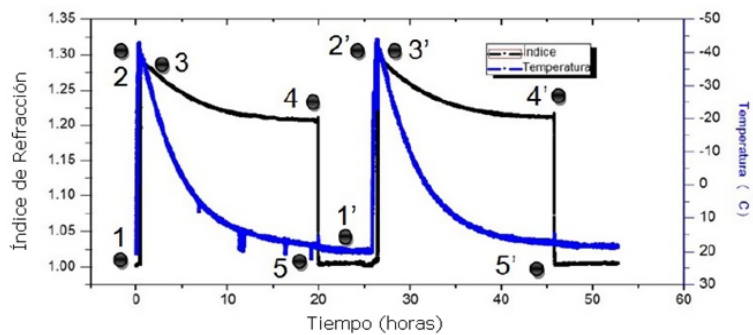
4. La cámara se calentó hasta una temperatura de  $T_4 = 291$  K y presión de  $P_4 = 5500$  kPa.
5. Se despresurizó la cámara a temperatura de  $T_1 = 291$  K y se alcanzó una presión de  $P_1 = 100$  kPa.

Las condiciones seleccionadas se pueden observar en la figura 16, donde se muestra el comportamiento del índice de refracción cuando la temperatura de la cámara aumenta lentamente a lo largo del tiempo, la temperatura ambiente y posteriormente la despresurización, cada ciclo está compuesto de cinco estados termodinámicos y cada uno de ellos es determinado por temperatura

y presión específicos. También mostró estabilidad y repetitividad para los ciclos en un periodo de tiempo de 52 horas.

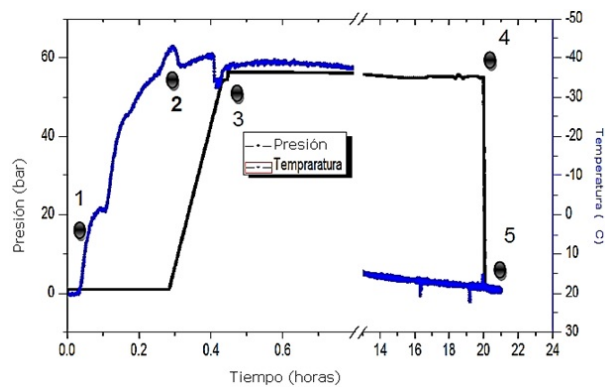
La figura 17 muestra el comportamiento de la presión y temperatura al inicio de los ensayos: en el punto 1, la temperatura es  $18$  °C y presión de  $100$  KPa; en el punto 2, se disminuye la temperatura a  $-40$  °C y aumenta la presión a  $5600$  KPa. Es posible observar que aumentando la presión existe un aumento en la temperatura que después se estabiliza.

Para analizar la trayectoria de los estados termodinámicos fueron trazados en el diagrama de fase del  $\text{CO}_2$ , para un intervalo de tiempo de 21



**Figura 16.** Estabilidad de la detección del cambio de fase del  $\text{CO}_2$  variando la temperatura a lo largo del tiempo y monitoreando el índice de refracción

Fuente: elaboración propia.



**Figura 17.** Estados termodinámicos variando presión y temperatura

Fuente: elaboración propia.



horas de ensayo, donde los puntos 1, 2 y 5 se encuentran en la fase gaseosa y el punto 3 y 4 en la fase líquida, demostrando que el uso de fibra óptica microestructurada para el monitoreamiento de cambio de fase de sustancias en condiciones de temperaturas bajas y presiones en el rango de 0 a 56 bar alcanza una buena exactitud, observado en la figura 18(a) y (b).

Los resultados experimentales del índice de refracción son evaluados mediante comparación con los resultados teóricos obtenidos a través de la ecuación de Lorentz-Lorenz (ecuaciones 3 y 4), donde A es el valor aproximado que es relacionado

con la polaridad de la sustancia y  $\rho$  es la viscosidad de la sustancia.

$$A\rho = \frac{(n^2 - 1)}{(n^2 + 2)} \quad (3)$$

Donde

$$n = \sqrt{\frac{2A\rho + 1}{1 - A\rho}} \quad (4)$$

Para  $A_{CO_2} = 1.423 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$  los valores de la densidad para cada estado son presentados en la tabla 2, estos son obtenidos a través del diagrama T-v para un volumen específico dado.

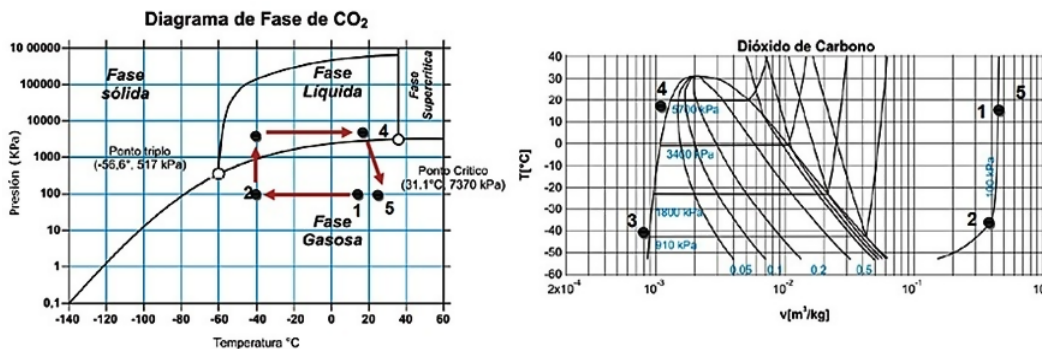


Figura 18. (a) Ciclos termodinámicos en el diagrama de fase del CO<sub>2</sub>; (b) cambios de fase del CO<sub>2</sub>

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Resultados obtenidos con la ecuación de Lorentz-Lorenz y los obtenidos experimentalmente

Estado termodinámico	ACO <sub>2</sub>	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Índice de refracción teórico	Índice de refracción experimental	Error (%)
Punto 1	1,423E-04	1842	1,0004	1,002	0,00160
Punto 2	1,423E-04	2298	1,0005	1,005	0,00448
Punto 3	1,423E-04	1130	1,2542	1,293	0,03001
Punto 4	1,423E-04	796,82	1,1759	1,204	0,02334
Punto 5	1,423E-04	1829	1,0004	1,003	0,00259

Fuente: elaboración propia.

## CONCLUSIONES

Se pudo comparar la repetividad en los ensayos realizados, en los que se identificaron los cinco estados termodinámicos presentes. Fue posible transmitir o guiar la luz blanca a través de un

fluido en diferentes fases, demostrando un cambio en el índice de refracción cada vez que había alteración en este, ya que el dimetilformamida tiene un índice de refracción mayor que el de sílice, posibilitando el paso de luz para la detección del CO<sub>2</sub>.

El empleo de la fibra óptica para la construcción de sensores ha presentado gran desarrollo en la industria, tanto que ha quedado demostrado que es posible interactuar un fluido dentro de una fibra para guiar luz. Una de las pocas limitaciones en cuanto a la estabilidad del sensor óptico es la fotodescomposición de los disolventes inmovilizados debido al guiado continuo de luz visible, ya que existe una radiación de la misma sobre el fluido.

## FINANCIAMIENTO

El proyecto fue realizado en conjunto con el Laboratorio de Sensores a Fibra Óptica (LSFO).

## AGRADECIMIENTOS

Los autores del proyecto agradecen al Laboratorio de Sensores a Fibra Óptica (LSFO) de la Pontificia Universidade Católica do Rio, por el apoyo al desarrollo del sensor. Al PhD Robert Angulo, por la contribución en el análisis de los resultados experimentales obtenidos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cordeiro, C.M.; Matos, J.; Dos Santos, E.M. y Bozolan, A. (12 de septiembre de 2007). Towards practical liquid and gas sensing with photonic crystal fibres: side access to the fibre microstructure and single-mode liquid-core fibre. *Measurement Science and Technology*, 11207-11212.
- Fini, J. y Bise, R. (25 de agosto de 2004). Progress in Fabrication and Modeling of Microstructured Optical Fibers. *Japanese Journal of Applied Physics*, 43(8B), 5717-5730.
- Fini, J. y Bise, R. (24 de agosto de 2004). Progress in Fabrication and Modeling of Microstructured Optical Fibers. *Japanese Journal of Applied Physics*, 5717-5730.
- Holloway, S.; Pearce, J.M.; Hards, V.L.; Ohsumi, T. y Gale, J. (7 de julio de 2007). Natural emissions of CO<sub>2</sub> from the geosphere and their bearing on the geological storage of carbon dioxide. *Energy*, 1194-1201.
- Jin, W. (5 de septiembre de 2009). Novel sensors based on hollow-core photonic bandgap fibers. *SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 1-6.
- Knight, J.C. (14 de agosto de 2003). Photonic crystal fibres. *Nature International*, 847-851.
- Kwang, T.K.; Kyu, H.L.; Hwangbo, S. y Kyung, R.S. (14 de febrero de 2006). A refractometer based on fiber-to-liquid planar waveguide coupler. *Sensors and Actuators A: Physical*, 335-339.
- Lemus B., C.; Estupiñán C., E. y Guillen P., E. (2013). Evaluación del rendimiento de redes ópticas para aplicaciones de telemedicina en ambientes simulados. *Revista Tecnura*, 21-40.
- Mizaikoff, B.; Taga, K. y Kellner, R. (23 de junio de 1995). Infrared fiber optic gas sensor for chlorofluorohydrocarbons. *Vibrational Spectroscopy*, 103-108.
- Monro, T.M.; Belardi, W.; Furusawa, K.; Baggett, J.C.; Broderick, N.G. y Richardson, D.J. (abril 3 de 2001). Sensing with microstructured optical fibres. *Measurement Science and Technology*, 854-858.
- Monro, T.M.; Richardson, D.J. y Bennett, P.J. (8 de julio de 1999). Developing holey fibres for evanescent field devices. *Electronics Letters*, 1188-1189.
- Moura dos Santos, E. (2007). *Fluid insertion related processes for sensing using photonic crystal fibers*. Sao Paulo: Unicamp.
- Quirino, S.F.; Toledo, A.O. y Lisboa, O. (2011). *Espalhamento Brillouin e Crosstalk em Sensor Distribuído Intrínseco a Fibra Ótica*. Sao Paulo.
- Sepaniak, M.J.; Vo-Dinh, T.; Wilson, G.S.; Albery, W.; Albery, W.J. y De Galan, L. (15 de octubre de 1990). Fibre-Optic-Based Fluoroimmunosensors. *Philosophical Transactions: Physical Sciences and Engineering*, 85-92.
- Suzuki, Y.; Takeuchi, A.; Takenaka, H. y Okada, I. (2010). Fabrication and Performance Test of Fresnel Zone Plate with 35 nm Outermost Zone Width in Hard X-Ray Region. *X-Ray Optics and Instrumentation*, 132-137.
- Suzuki, Y.; Takeuchi, A.; Takano, H.; Ohigashi, T. y Takenaka, H. (13 de diciembre de 2001).

Diffraction-limited microbeam with Fresnel zone plate optics in hard x-ray regions. En: *X-Ray Micro- and Nano-Focusing: Applications and Techniques II* (pp. 74-82).

Wen B., L.; Jaffrezic R., N.; Jean M., C. y Lacroix, M. (abril 15 de 2001). Optical fiber as a whole surface

probe for chemical and biological applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 207-211.

Yuan, J. y El-Sherif, M. (22 de febrero de 2003). Fiber-optic chemical sensor using polyaniline as modified cladding material. *IEEE Sensors Journal*, 5-12.





## Análisis de elementos finitos con un continuo elástico lineal tipo Cosserat

### Finite Element Analysis Using a Cosserat Linear Elastic Continuum

Alfonso Mariano Ramos-Cañón<sup>1</sup>, Luis Felipe Prada-Sarmiento<sup>2</sup>, Carlos Alberto Vega-Posada<sup>3</sup>

**Fecha de recepción:** 14 de abril de 2016

**Fecha de aceptación:** 10 de septiembre de 2016

**Cómo citar:** Ramos-Cañón, A.M.; Prada-Sarmiento, L.F. y Vega-Posada, C.A. (2016). Análisis de elementos finitos con un continuo elástico lineal tipo Cosserat. *Revista Tecnura*, 20(50), 43-54. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a03

#### RESUMEN

**Contexto:** Los resultados experimentales en materiales granulares muestran que el comportamiento esfuerzo deformación tiene dependencia con la escala de análisis, sin embargo, debido a las suposiciones intrínsecas que tiene la mecánica del medio continuo, los análisis de elementos finitos basados en el continuo de Boltzmann no permite tener en cuenta longitudes características en su formulación que refleje la escala.

**Método:** En este trabajo se presenta la formulación especializada de los elementos finitos para un problema de deformación plana para el continuo de Cosserat. Se presentan los grados de libertad de un elemento finito cuadrilátero y se deduce el operador diferencial para obtener el vector de deformación, su función de forma, la matriz de interpolación, la matriz de rigidez y el vector de fuerza nodal. Finalmente se implementa el continuo de cosserat con el elemento descrito en un programa de elementos finitos codificado por los autores. El programa se ejecuta para resolver el problema de esfuerzos y deformaciones en una capa homogénea de material con comportamiento lineal elástico.

**Resultados:** Se obtiene las diferencias entre los componentes de esfuerzos y deformaciones de corte entre el continuo convencional y el de Cosserat junto con la aparición de momentos a nivel de punto de Gauss.

**Conclusiones:** La deducción e implementación del continuo de Cosserat permite un análisis de elementos finitos alternativo al del continuo Convencional con la posibilidad de introducir una longitud característica en su formulación para tener en cuenta los efectos de escala y rotaciones que se observan en materiales granulares.

**Palabras clave:** Continuo de cosserat, elementos finitos.

#### ABSTRACT

**Context:** Experimental results show that the stress-strain behavior of granular materials depends upon the scale analysis. However, due to the intrinsic assumptions of the mechanics of a continuum medium, the analysis of finite elements based on the Boltzmann's continuum does not allow to consider characteristic lengths in its formulation to reflect the scale effect.

- 1 Ingeniero civil, magíster en Geotecnia, doctor en Ingeniería. Profesor asociado Facultad de Ingeniería. Pontificia Universidad Javeriana, Carrera 7 No. 40-62, Bogotá, Colombia. Contacto: [a-ramos@javeriana.edu.co](mailto:a-ramos@javeriana.edu.co)
- 2 Ingeniero civil, magíster en Ingeniería, doctor en Ingeniería. Profesor asistente. Facultad de Ingeniería. Pontificia Universidad Javeriana, Carrera 7 No. 40-62, Bogotá, Colombia. Contacto: [lf.pradas@javeriana.edu.co](mailto:lf.pradas@javeriana.edu.co)
- 3 Ingeniero civil, Master of Science, Doctor. Profesor asistente. Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Contacto: [carlosa.vega@udea.edu.co](mailto:carlosa.vega@udea.edu.co)

**Method:** This work presents a finite element formulation to analyze plane-strain linear problems using the Cosserat continuum. The degrees of freedom of a four-node quadrilateral finite element are presented and the differential operator is derived to obtain the deformation vector, function form, interpolation matrix, stiffness matrix and nodal load vector. Finally, the Cosserat continuum with the aforementioned element is implemented in a finite element software coded by the authors. The software is used to solve a stress-strain problem of a homogeneous layer with a linear elastic behavior.

**Results:** The differences of the stress and shear strain responses between the conventional and the Cosserat continuum along with the moments acting at the Gauss point level are obtained.

**Conclusions:** The derivation and implementation of the Cosserat continuum provides an alternative finite element analysis to the conventional continuum, along with the advantage of introducing a characteristic length in the formulation to account for the scale effects and rotations observed in granular materials.

**Keywords:** Cosserat continuum, finite element method.

## INTRODUCCIÓN

Es bien conocido que el comportamiento esfuerzo-deformación de materiales granulares está muy influenciado por el tamaño de la partícula. Resultados de ensayos controlados de laboratorio en suelos como el corte directo muestran una alta dependencia con el tamaño de la partícula (Bazant y Xiang, 1997; Ceratto y Lutenecker, 2006; Gao, Haixue y Weibing, 2000; Orlando, Hanes y Shen, 2009; Palmeira y Milligan, 1989; Ramos y Prada, 2015; Techjman, 2007; Wu, Matsushima y Tatsuoka, 2008; Zhou, Helenbrook y Shen, 2009). Dicha dependencia surge cuando el tamaño de la partícula es comparable con el tamaño de la caja de corte. En este caso, la suposición de continuo convencional o continuo de Boltzmann deja de ser válido, y para su modelación es necesario recurrir a modelos alternativos que estén más acordes con la fenomenología del proceso. La modelación con elementos finitos con el continuo convencional o continuo de Boltzmann presenta dos limitaciones para simular materiales granulares cuyo tamaño característico afecta los resultados: a) no se puede determinar la rotación de las partículas dado que no es un grado de libertad habilitado y b) el continuo convencional no tiene una longitud característica que permita simular procesos dependientes

de la escala. Como una alternativa para sobrepasar las dos limitaciones mencionadas, surge el continuo de Cosserat. Este presenta una longitud intrínseca que logra generar solución del problema de valor de contorno dependiente de la escala; además su formulación se basa en que cada punto material tiene grados de libertad de traslación y de rotación. A pesar de que se observan en los últimos años modelaciones con elementos finitos que usan medios continuos alternativos al convencional (Azadeh y Curran, 2008; Neff, Chelminski, Muller y Wieners, 2007; Ramos y Prada, 2015; Riahi y Curran, 2009, 2010; Sharbati y Naghdabadi, 2006), no se presenta la derivación de los insumos básicos para realizar un análisis de elementos finitos con el continuo de Cosserat. En este trabajo se presenta la formulación especializada de los elementos finitos para un problema de deformación plana para el continuo de Cosserat. Se muestran los grados de libertad de un elemento finito cuadrilátero y se deduce el operador diferencial para obtener el vector de deformación, su función de forma, la matriz de interpolación, la matriz de rigidez y el vector de fuerza nodal. Por último, se implementa el continuo de Cosserat con el elemento descrito en un programa de elementos finitos codificado por los autores. El programa se ejecuta para resolver el problema de esfuerzos y deformaciones

en una capa homogénea de material con comportamiento lineal elástico. Se obtienen las diferencias entre los componentes de esfuerzos y deformaciones de corte entre el continuo convencional y el de Cosserat, junto con la aparición de momentos y rotaciones a nivel de punto de Gauss. La deducción e implementación del continuo de Cosserat permite un análisis de elementos finitos alternativo al del continuo convencional con la posibilidad de introducir una longitud característica en su formulación para tener en cuenta los efectos de escala que se observan en materiales granulares.

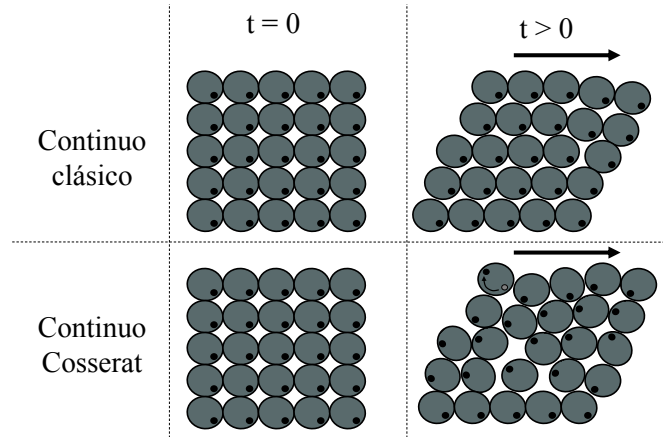
## METODOLOGÍA

### El continuo de Cosserat

El continuo de Cosserat fue propuesto por los hermanos Cosserat (Cosserat y Cosserat, 1909), sin embargo, no fue hasta que Eringen (1968) realizó un tratamiento detallado con la comparación explícita con el continuo convencional.

En la parte superior de la figura 1 se presenta esquemáticamente la cinemática del medio continuo convencional. En la parte inferior se ilustra el medio continuo de Cosserat. En la parte izquierda está la configuración para un tiempo  $t=0$  y en la parte derecha, la configuración para un tiempo  $t>0$ . Se supondrá que el continuo está compuesto por esferas. Cada una tiene un punto negro que permite observar la posible rotación y desplazamiento de los elementos que están sometidos a un campo de fuerzas. Se observa que no existe diferencia para la configuración de referencia entre el continuo convencional y el de Cosserat ( $t=0$ ). Cuando se aplica un campo de fuerzas ( $t>0$ ), la cinemática del continuo convencional permite que los elementos presenten un movimiento diferencial, es decir, cada esfera puede cambiar de posición por medio de una traslación en el plano, pero no puede rotar sobre su centro de masa, en

tanto que las esferas que representan el continuo de Cosserat presentan traslación y rotación.



**Figura 1.** Representación esquemática de la cinemática del continuo convencional o de Boltzmann y del continuo de Cosserat

**Fuente:** elaboración propia.

### El método de elementos finitos aplicados al continuo de Cosserat

En condiciones planas de deformación, el continuo de Cosserat tiene tres grados de libertad, dos traslacionales  $U_x$ ,  $U_y$  y una rotación  $w_c$ . El vector de desplazamiento en notación de elementos finitos es (ecuación (1)).

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} U_x \\ U_y \\ w_c \end{pmatrix} \quad (1)$$

El vector de deformación (ecuación (2)) para el continuo de Cosserat se define como (Eringen, 1968).

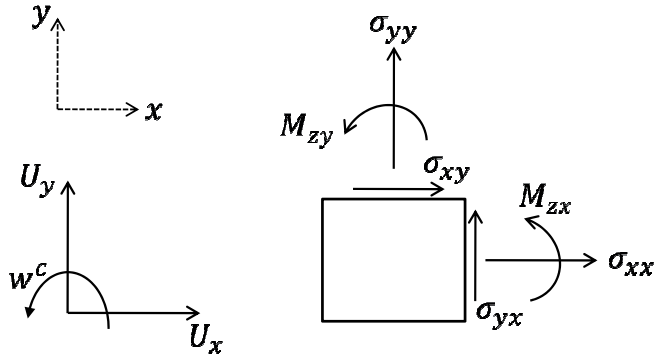
$$\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_{xx} \ \varepsilon_{yy} \ \varepsilon_{xy} \ \varepsilon_{yx} \ \kappa_x \ \kappa_y]^T \quad (2)$$

Donde cada componente del vector de deformación es (ecuación (3)).

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial U_x}{\partial x}; \varepsilon_{yy} = \frac{\partial U_y}{\partial y}; \varepsilon_{xy} = \frac{\partial U_x}{\partial y} + w_c; \varepsilon_{yx} = \frac{\partial U_y}{\partial x} - w_c; \kappa_x = d_{50} \frac{\partial w_c}{\partial x}; \kappa_y = d_{50} \frac{\partial w_c}{\partial y} \quad (3)$$

$d_{50}$  es la longitud característica y es el tamaño medio del arreglo granular.

Los esfuerzos axiales, esfuerzos de corte y momentos en deformación plana en un continuo de Cosserat se representan en la figura 2, junto con los grados de libertad.



**Figura 2.** Grados de libertad en condición plana de deformación y esfuerzos y momentos que se presentan en un continuo de Cosserat

**Fuente:** elaboración propia.

El vector de deformación está relacionado con el vector de desplazamientos por medio del operador diferencial  $L$ . La ecuación (4) presenta además el número de elementos de cada componente.

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{[6,1]} = L_{[6,3]} \mathbf{U}_{[3,1]} \quad (4)$$

Por tanto, el operador diferencial  $L$  (ecuación (5)) se puede obtener por inspección de la ecuación (3).

$$L = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ \frac{\partial}{\partial y} & 0 & 1 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x} & -1 \\ 0 & 0 & d_{50} \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & 0 & d_{50} \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Por otro lado, si se supone una relación elástica esfuerzo deformación ( $\boldsymbol{\sigma} = C\boldsymbol{\varepsilon}$ ) lineal para un continuo tipo Cosserat tiene los siguientes componentes (ecuación (6)).

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yx} \\ M_{zx} \\ M_{zy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1,1} & C_{1,2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{2,1} & C_{2,2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{3,3} & C_{3,4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{4,3} & C_{4,4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{5,5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{6,6} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yx} \\ \kappa_x \\ \kappa_y \end{Bmatrix} \quad (6)$$

En donde cada uno de los componentes de la matriz de rigidez están en función de los grados de libertad para el problema de deformación plana. Para un elemento cuadrilátero lineal, el vector de desplazamiento del elemento está relacionado con los desplazamientos de los nodos por medio de la siguiente relación (ecuación (7)).

$$\mathbf{U}_{[3,1]}^h = \mathbf{N}_{[3,12]} \mathbf{d}_{[12,1]}^e \quad (7)$$

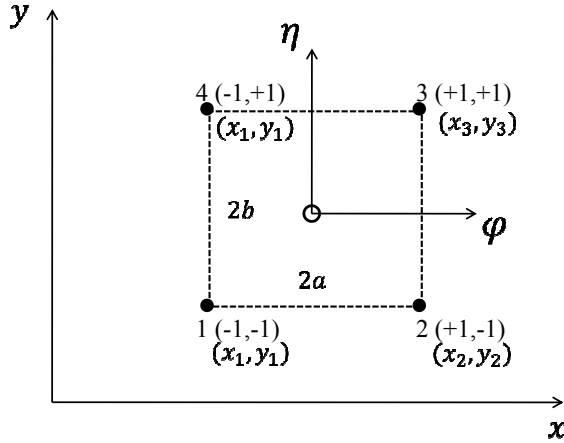
La matriz de interpolación o matriz de conectividad (ecuación (8)) está dada por (Belytschko, Liu y Moran, 2006).

$$N = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Donde los componentes de la matriz están dados por (ecuación (9)).

$$N_1 = (1 - \xi)(1 - \eta); N_2 = (1 + \xi)(1 - \eta); N_3 = (1 + \xi)(1 + \eta); N_4 = (1 - \xi)(1 + \eta) \quad (9)$$

$\xi$  y  $\eta$  son las coordenadas naturales del elemento cuadrilátero y están relacionadas con las coordenadas físicas por medio de la relación  $\xi = x/a$  y  $\eta = y/b$  (figura 3). Así,  $2a$  y  $2b$  son los lados iniciales del elemento finito cuadrilátero.

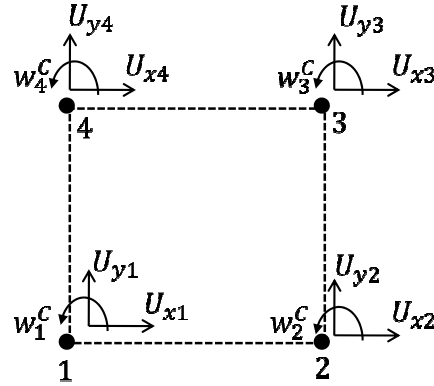


**Figura 3.** Elemento cuadrilátero en el sistema de coordenadas naturales y físicas

Fuente: elaboración propia.

El vector de desplazamientos (ecuación (10)) del elemento cuadrilátero lineal en un continuo de Cosserat de la ecuación (7) está dado por los grados de libertad representados en la figura 4.

La figura 4 presenta un esquema de los grados de libertad de un elemento cuadrilátero lineal en un continuo de Cosserat.



**Figura 4.** Grados de libertad en un elemento lineal cuadrilátero en el continuo de Cosserat

Fuente: elaboración propia.

$$\mathbf{d}^e = \{U_{x1} \ U_{y1} \ w_1^C \ U_{x2} \ U_{y2} \ w_2^C \ U_{x3} \ U_{y3} \ w_3^C \ U_{x4} \ U_{y4} \ w_4^C\}^T \quad (10)$$

La matriz de deformación  $\mathbf{B} = \mathbf{LN}$ , definida como la que relaciona el operador diferencial  $\mathbf{L}$  y la matriz de forma está dada por (ecuación (11)).

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} & 0 & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial y} & 0 & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial y} & 0 \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & N_1 & \frac{\partial N_2}{\partial y} & 0 & N_2 & \frac{\partial N_3}{\partial y} & 0 & N_3 & \frac{\partial N_4}{\partial y} & 0 & N_4 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial x} & -N_1 & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & -N_2 & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial x} & -N_3 & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial x} & -N_4 \\ 0 & 0 & d_{50} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & 0 & d_{50} \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & 0 & d_{50} \frac{\partial N_3}{\partial x} & 0 & 0 & d_{50} \frac{\partial N_4}{\partial x} \\ 0 & 0 & d_{50} \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & 0 & d_{50} \frac{\partial N_2}{\partial y} & 0 & 0 & d_{50} \frac{\partial N_3}{\partial y} & 0 & 0 & d_{50} \frac{\partial N_4}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (11)$$

La matriz de rigidez para el elemento cuadrilátero de Cosserat está definido por (ecuación (12)).

$$\mathbf{k}_e = \int_A h \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} dA \quad (12)$$

Dado que  $\xi = x/a$  y  $\eta = y/b$ , el diferencial de área  $dA$  de la ecuación (12) está dado por  $dA = dx dy = a b d\xi d\eta$  y la matriz de rigidez del elemento será (ecuación (13)).



$$\mathbf{k}_e = \int_A h \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} dA = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} a b h \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} d\xi d\eta \quad (13)$$

La matriz de rigidez  $\mathbf{C}$  dada por la ecuación (6), que está incluida en la definición de la matriz de rigidez del elemento para el continuo de Cosserat en elasticidad lineal se presenta en la ecuación (14).

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G+G^c & G-G^c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G-G^c & G+G^c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G d_{50}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G d_{50}^2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Donde  $E$  es el módulo de Young,  $\nu$  es la relación de Poisson,  $G$  es el módulo de corte,  $G^c$  es el módulo de rotación (referencia) y  $d_{50}$  es la longitud característica. La matriz de rigidez del elemento (ecuación (12)) tiene tamaño  $12 \times 12$ . Para el caso de elasticidad lineal de Cosserat, la evaluación de los términos de la matriz de rigidez de los elementos se pueden obtener de forma analítica. Algunos de los términos son (ecuación (15)).

$$\begin{aligned} k_{1,1} &= \frac{h}{3ab} [a^2 C_{3,3} + b^2 C_{1,1}]; k_{2,2} = \frac{h}{3ab} [a^2 C_{2,2} + b^2 C_{4,4}] \\ k_{3,3} &= \frac{h}{9ab} [a^2 (4b^2 (C_{3,3} - C_{3,4} - C_{4,3} + C_{4,4}) + 3C_{6,6} d_{50}^2) + 3b^2 C_{5,5} d] \end{aligned} \quad (15)$$

El vector de fuerza nodal está dado por la integral en superficie de la matriz de conectividad transpuesta por el vector de fuerza (ecuación (16)).

$$\mathbf{f}_e = \oint_S \mathbf{N}_{[12,3]}^T f_{S[3,1]} dS \quad (16)$$

$$f_{e[1,1]} = \int_{\xi=-1}^{\xi=1} \int_z \frac{1}{4} (1-\xi)(1-\eta) f_{sx} dz d\xi = h \int_{\xi=-1}^{\xi=1} \frac{1}{4} (1-\xi)(1-\eta) f_{sx} d\xi \quad (19)$$

$$f_{e[1,1]} = h \int_{\xi=-1}^{\xi=1} \frac{1}{4} (1-\xi) 2 f_{sx} d\xi = \frac{h f_{sx}}{2} \int_{\xi=-1}^{\xi=1} (1-\xi) d\xi = \frac{h f_{sx}}{2} \left[ \underbrace{\xi}_{-1}^1 - \underbrace{\frac{\xi^2}{2}}_{-1}^1 \right] = h f_{sx} a \quad (20)$$

Donde  $a$  es la mitad de la longitud del lado 1-2.

Especializando la ecuación (16) al continuo de Cosserat, se tiene la ecuación (17).

$$\mathbf{f}_e = \oint_S \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 \\ N_2 & 0 & 0 \\ 0 & N_2 & 0 \\ 0 & 0 & N_2 \\ N_3 & 0 & 0 \\ 0 & N_3 & 0 \\ 0 & 0 & N_3 \\ N_4 & 0 & 0 \\ 0 & N_4 & 0 \\ 0 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_{sx} \\ f_{sy} \\ f_w \end{Bmatrix} dS = \oint_S \begin{bmatrix} N_1 f_{sx} \\ N_1 f_{sy} \\ N_1 f_w \\ N_2 f_{sx} \\ N_2 f_{sy} \\ N_2 f_w \\ N_3 f_{sx} \\ N_3 f_{sy} \\ N_3 f_w \\ N_4 f_{sx} \\ N_4 f_{sy} \\ N_4 f_w \end{bmatrix} dS \quad (17)$$

En la ecuación (17),  $f_{sx}$  y  $f_{sy}$  son cargas uniformemente distribuidas y  $f_w$  es un momento aplicado directamente en el nodo. Al desarrollar el primer elemento del vector  $\mathbf{f}_e$  (ecuación (17)) se obtiene la ecuación (18).

$$f_{e[1,1]} = \oint_S N_1 f_{sx} dS = \oint_S \frac{1}{4} (1-\xi)(1-\eta) f_{sx} dS \quad (18)$$

Si se supone que la carga está aplicada en el lado 1-2 del elemento (figura 5), entonces la ecuación (18) queda como se muestra en la ecuación (19).

Como las coordenadas  $\eta = -1$  en el lado 1-2 del elemento cuadrilátero, se obtiene que la ecuación (20).

Dependiendo del lado donde se encuentre cargado el elemento, el vector de fuerza nodal será diferente para el mismo nodo. Generalizando la ecuación (17) para la aplicación de la carga en cualquiera de los cuatro lados del elemento finito cuadrilátero se tiene la ecuación (21).

$$f_e = \begin{bmatrix} h f_{sx} a^\dagger, h f_{sx} b^\ddagger \\ h f_{sy} a^\dagger, h f_{sy} b^\ddagger \\ f_w^1 \\ h f_{sx} a^\dagger, h f_{sx} b^\ddagger \\ h f_{sy} a^\dagger, h f_{sy} b^\ddagger \\ f_w^2 \\ h f_{sx} a^*, h f_{sx} b^\otimes \\ h f_{sy} a^*, h f_{sy} b^\otimes \\ f_w^3 \\ h f_{sx} a^*, h f_{sx} b^\otimes \\ h f_{sy} a^*, h f_{sy} b^\otimes \\ f_w^3 \end{bmatrix} \quad (21)$$

† para elementos cargados en el lado  $L_{1-2}$ , ‡ para elementos cargados en el lado  $L_{1-4}$ , ★ para elementos cargados en el lado  $L_{2-3}$  y ⊗ para elementos cargados en el lado  $L_{3-4}$  (figura 5).

Para clarificar la aplicación del vector de fuerza nodal por elemento, se muestra la ecuación (22),

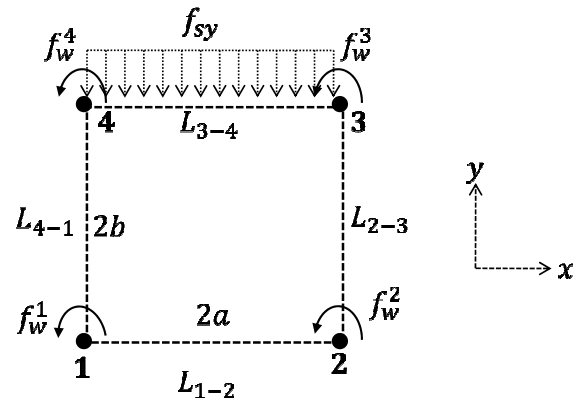
$$f_e = \{0 \quad 0 \quad f_w^1 \quad 0 \quad 0 \quad f_w^2 \quad 0 \quad h f_{sy} a \quad f_w^3 \quad 0 \quad h f_{sy} a \quad f_w^4\}^T \quad (22)$$

## RESULTADOS

### Carga uniformemente distribuida en un continuo de Cosserat con material elástico lineal

En la sección anterior se plantearon todos los elementos necesarios para realizar un análisis de elementos finitos. De lo anterior, es necesario ensamblar la matriz de rigidez general y el vector de carga general para el problema de valor de contorno y, de esta manera, obtener los desplazamientos-rotaciones en los nodos y las variables derivadas: deformaciones y gradientes de rotaciones.

Para aplicación, se plantea el caso típico de un carga distribuida en una parte de la superficie,



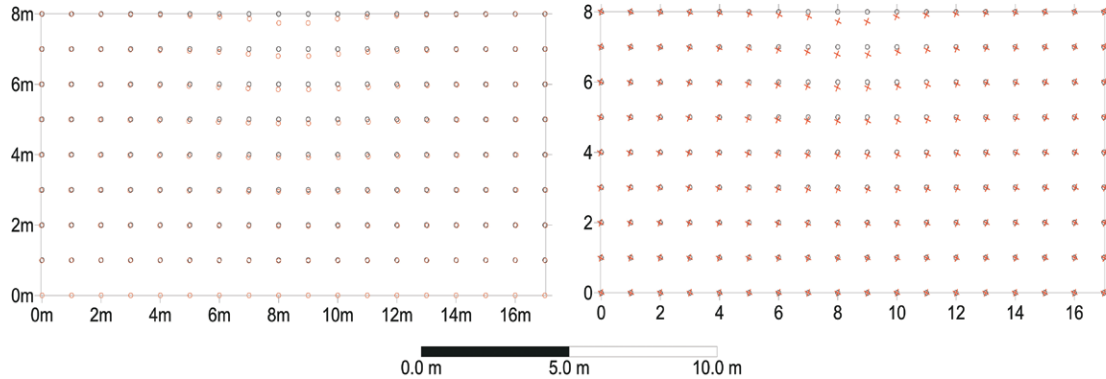
**Figura 5.** Elemento cuadrilátero de Cosserat cargado con momentos puntuales en los cuatro nodos  $f_w^i$  y una carga uniformemente distribuida  $f_{sy}$  en el lado 3-4  $L_{3-4}$

**Fuente:** elaboración propia.

que es la especialización para el elemento cuadrilátero de la figura 5.

asemejando el caso de un zapata cargada superficial. Las constantes elásticas para el modelo constitutivo seleccionadas son:  $E = 1E6 \text{ Pa}$ ,  $\nu = 0.35$ ;  $G = 3.7E5 \text{ Pa}$ ;  $G^c = 7.4E5 \text{ Pa}$ ;  $d_{50} = 2E-4 \text{ m}$ . La malla de elementos finitos se realiza con elementos cuadriláteros con base y altura igual a  $0,5 \text{ m}$  ( $u=b=0,5 \text{ m}$ ). Una vez solucionado el sistema general  $F = KX$ , se tienen los desplazamientos nodales. Al ser un modelo constitutivo elástico lineal, se puede obtener la inversa de la matriz de rigidez sin necesidad de recurrir a métodos incrementales, ya que los desplazamientos no dependen de la trayectoria (conservativos).

La malla de elementos finitos junto con la deformada en el continuo de Botzmann y el continuo de Cosserat se presentan en la figura 6.

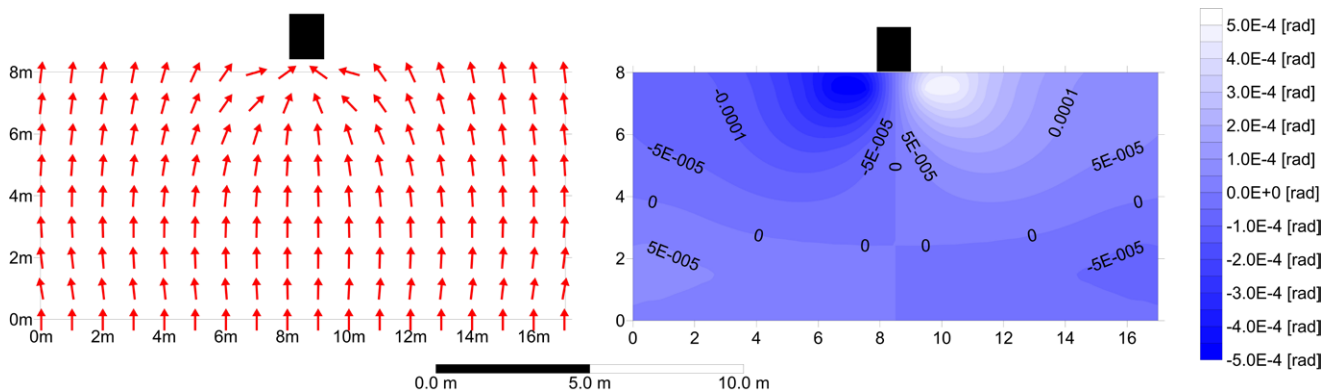


**Figura 6.** Malla de elementos finitos del problema de valor de contorno. Posición de los nodos en el estado deformado y no deformado. Izquierda: Continuo de Boltzmann. Derecha: Continuo de Cosserat

**Fuente:** elaboración propia.

Los círculos de la figura 6 presentan la posición de los nodos en su estado no deformado. Las cruces muestran la deformada de la malla una vez se aplica la carga superficial en el continuo de Cosserat y en continuo convencional. Se observa que no se generan diferencias entre los dos continuos (Cosserat y Boltzmann) en los valores de los grados de libertad convencionales, desplazamientos horizontales y verticales. Sin embargo, en la figura 7 se presentan las rotaciones de Cosserat. La dirección de la flecha indica proporcionalmente la cantidad que rotó cada nodo. Cuando no hay carga,

la totalidad de las flechas apuntan hacia arriba. La parte inferior está restringida a la rotación de Cosserat, por lo que las flechas son completamente verticales. Como es de esperarse, debido a la simetría del problema de valor de contorno, las rotaciones de Cosserat en el eje de simetría son cero. La mayor concentración de rotaciones se encuentra inmediatamente debajo de la base cargada. Este grado de libertad no está presente en el continuo de Boltzmann y está indicando la rotación como cuerpo rígido que pueden tener los elementos. La rotación, que es una característica importante de



**Figura 7.** Rotaciones de Cosserat para el problema de valor de contorno

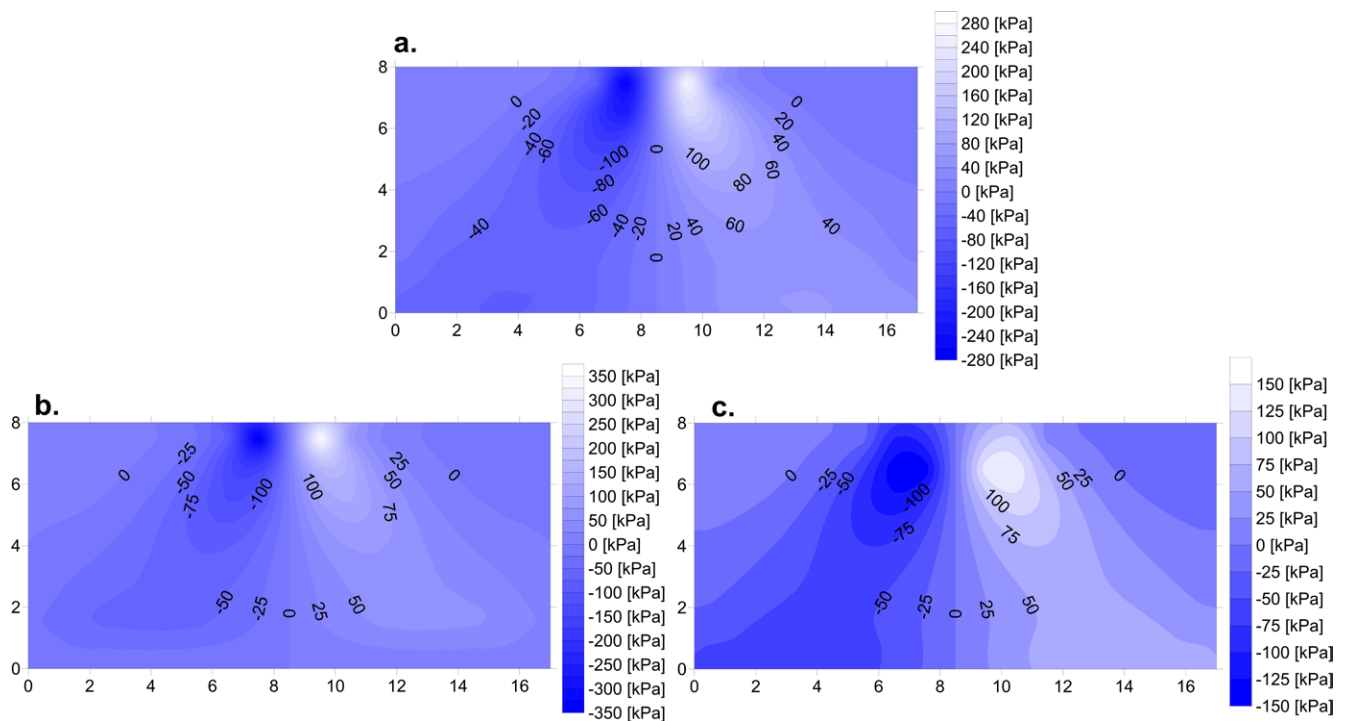
**Fuente:** elaboración propia.

los materiales particulados, no puede ser simulada con la modelación con elementos finitos basados en el continuo convencional. Se ha visto desde el punto de vista experimental y numérico con modelación con elementos discretos que la resistencia a la rotación de las partículas es la responsable de la generación de las bandas de corte y de la localización de la deformación (Arévalo, Ramos-Cañón y Prada, 2014; Correa, Maldonado, Prada y Ramos, 2015), razón por la que es ventajoso que un modelo tenga la posibilidad de tener en cuenta este grado de libertad adicional.

Con relación a los esfuerzos, en el continuo de Cosserat los esfuerzos de corte  $\sigma_{yx}$  son diferentes a los de corte  $\sigma_{xy}$  por lo que el tensor de esfuerzos no es simétrico. Para garantizar la ecuación de

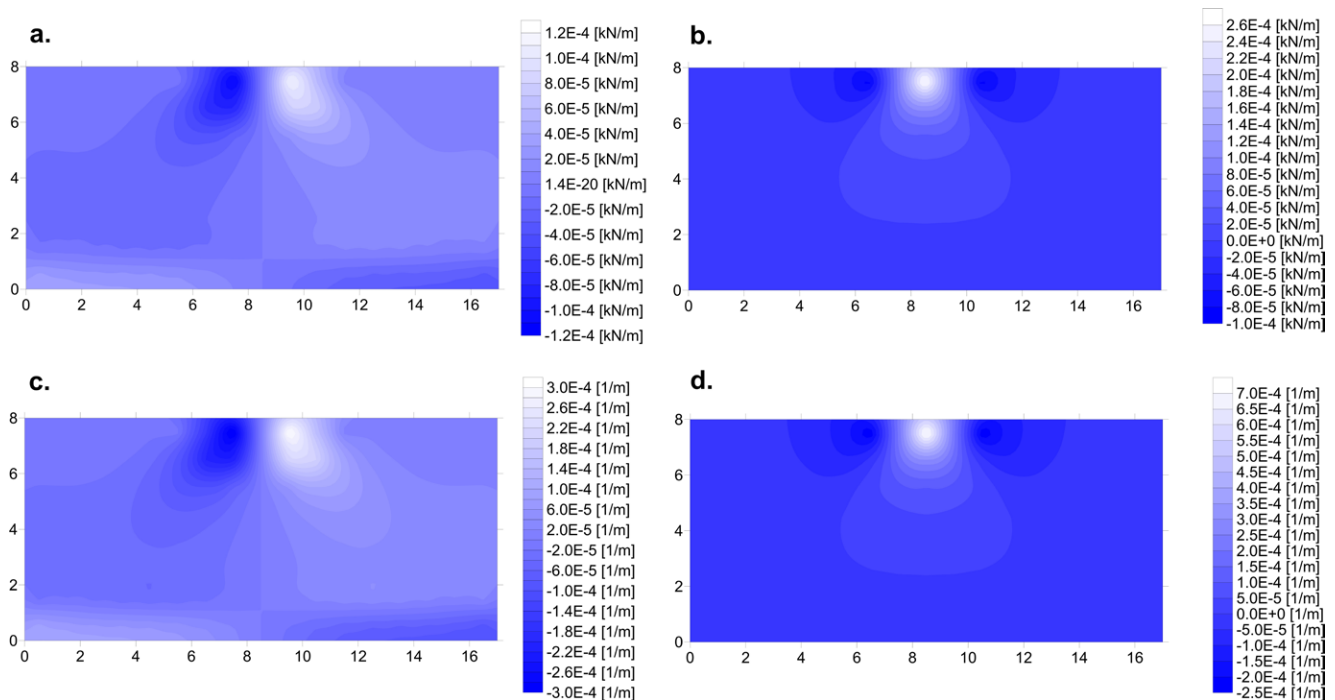
balance de momento de momentos, surgen los momentos aplicados en un punto material (figura 2). La figura 8a ilustra la distribución de esfuerzos  $\sigma_{yx} = \sigma_{xy}$  para el continuo convencional y los esfuerzos  $\sigma_{xy}$  (figura 8b) y  $\sigma_{yx}$  (figura 8c) para el continuo de Cosserat.

Finalmente se presentan los momentos del tensor de esfuerzos  $M_{zx}$  y  $M_{zy}$  junto con  $\kappa_x = \frac{\partial w_c}{\partial x}$  y  $\kappa_y = \frac{\partial w_c}{\partial y}$  (ecuación (6)). Estos últimos términos no aparecen en el continuo convencional y representan la variación infinitesimal espacial de las rotaciones con las coordenadas, análogo a las deformaciones convencionales que indican la variación infinitesimal espacial de los desplazamientos con las coordenadas (figura 9).



**Figura 8.** a. Distribución espacial de esfuerzos de corte  $\sigma_{yx} = \sigma_{xy}$  en el continuo de Boltzmann. b. Distribución de esfuerzos  $\sigma_{xy}$  en el continuo de Cosserat. c. Distribución de esfuerzos  $\sigma_{yx}$  en continuo de Cosserat.

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 9.** Distribución espacial de a. Momentos del tensor de esfuerzos  $M_{zx}$  b. Momentos del tensor de esfuerzos  $M_{zy}$  c. Microrrotaciones  $\kappa_y = \frac{\partial w_c}{\partial y}$  y d. Microrrotaciones  $\kappa_x = \frac{\partial w_c}{\partial x}$ .

**Fuente:** elaboración propia.

Se observa que los momentos que se presentan en cada una de los nodos afectando el equilibrio del tensor de esfuerzos son complementarios a los esfuerzos de corte desarrollados en el problema de valor de contorno. Las microrrotaciones surgen de forma análoga a los componentes convencionales del tensor de deformaciones. Estos no están asociados a la generación de cambio de volumen, sino que se magnifica la distorsión que puede presentar el continuo representado por Cosserat. Por otro lado, es importante anotar que dentro del modelo constitutivo elástico lineal de Cosserat se encuentra inmersa una longitud característica. En este caso se define como el tamaño medio de la partícula  $d_{50}$ . Este aspecto permite tener en cuenta que la respuesta esfuerzo deformación depende del tamaño de la partícula y, por otro lado, el continuo tiene el grado de libertad de rotación por lo que estaría representando la posibilidad cinemática inherente a su naturaleza que

tiene los materiales granulares. El efecto del tamaño de la muestra se ve reflejado que la muestra es más rígida con muestras más pequeñas que con muestras grandes para el mismo material (Ramos y Prada, 2015). Los resultados del continuo de Cosserat tiene la posibilidad de ser complementados con análisis de confiabilidad (Prada et al., 2011), de abarcar problemas de carácter dinámico (Vega-Posada, Zapata-Medina y Ramos-Cañón, 2016) o de solucionar problemas de valor de contorno donde las distorsiones pueden ser importantes (Ramos-Cañón, 2015; Lamus, Plazas y Luna, 2015).

## CONCLUSIONES

Es de esperarse que cuando un material particulado está cargado, los elementos que constituyen este material presenten rotaciones. Dicho aspecto no lo puede representar el continuo de Boltzmann, en tanto que se observa en las figuras 7 y 9 que los

nodos del continuo de Cosserat presentan rotación del orden de  $5 \text{ E-4 rad}$  como resultados del proceso de carga.

Las rotaciones, los esfuerzos normales, los esfuerzos de corte y los momentos están relacionados con la longitud característica, que en este caso es el diámetro medio de la partícula. Se presentan diferencias de los esfuerzos de corte  $\sigma_{xy}$  y  $\sigma_{yx}$  del orden de  $200 \text{ kPa}$  para nodos específicos. El análisis elástico convencional no podría tener en cuenta una longitud característica del problema por lo que los resultados serían independientes de la escala del problema del valor de contorno.

El continuo de Cosserat genera componentes adicionales del tensor de deformación denominados microrrotaciones. Los valores pueden ser mayores a  $-2\text{E-4 } 1/\text{m}$ . Es importante mencionar que dichas microrrotaciones (variación espacial de la rotación) son proporcionales a la longitud característica del problema.

Se presentan los ingredientes fundamentales para realizar un análisis de elementos finitos con el continuo de Cosserat. Las matrices de deformación, las funciones de forma, la matriz de rigidez de un elemento tipo cuadrilátero y el vector de carga se desarrollan explícitamente para que tengan la posibilidad de ser integrados a las estructuras de programación de elementos finitos en el marco de modelación convencional. Lo anterior abre las perspectivas de análisis de problemas esfuerzo-deformación cuyo material sea de carácter granular. Las formulaciones presentadas en este trabajo pueden ser adaptadas a modelos constitutivos inelásticos para poder considerar el comportamiento no lineal de geomateriales, por lo que es una manera alternativa de incluir aspectos inherentes al comportamiento del material granular que no es posible describirlos con base en el continuo convencional.

## FINANCIAMIENTO

El primer autor agradece a la Pontificia Universidad Javeriana por el apoyo económico por medio

del proyecto No. 5267 “Estudio de la inestabilidad en un flujo de material granular seco”.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arévalo, G.; Ramos-Cañón, A. y Prada, L. (2014). Análisis de confiabilidad en un modelo de descarga de silos de almacenamiento mediante el método de elementos discretos (DEM). *Obras y Proyectos*, 15, 21-30.
- Azadeh, R. y Curran, J. (2008). *Application of Cosserat Continuum approach in the finite element shear strength reduction analysis of jointed rock slopes*. The 12<sup>th</sup> International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics. Goa, India.
- Bareither, C.; Benson, C. y Edil, T. (2008). Reproducibility of Direct Shear Tests Conducted on Granular Backfill Materials. *Geotechnical Testing Journal*, 31(1), 1 -11.
- Bazant, Z. y Xiang, Y. (1997). Size Effect in Compression Fracture: Splitting Crack Band Propagation. *Journal of Engineering Mechanics*. ASCE 123(2), 162-172.
- Belytschko, T.; Liu, W. y Moran, B. (2006). *Nonlinear finite elements for continua and structures*. Londres: John Wiley & Sons, Ltd.
- Cerato, A. y Lutenegeger, A.J. (2006). Specimen Size and Scale Effects of Direct Shear Box Test of Sands. *Geotechnical Testing Journal*, 29(6), 507-516.
- Correa, C.; Maldonado, M.; Prada, L. y Ramos-Cañón, A. (2015). Aplicabilidad de la energía cinética en el inicio de la inestabilidad de materiales granulares en un tambor rotador mediante la técnica PIV. *Revista Ingeniería y Región*, 13(1), 9-18.
- Cosserat, E. y Cosserat, F. (1909). *Theorie des Corps Deformables*. París: Hermann.
- Eringen, A. (1968). *Fracture, volume II – Mathematical-Fundamentals. Chapter Theory of Micropolar Elasticity*. Londres: Academic Press.
- Gao, J.; Haixue, Y. y Weibing, Z. (2000). Characteristic Study of Interface Between Soil and Concrete by Using Larger Size Single Shear Apparatus and Numerical Analysis. *China Civil Engineering Journal*, 33(4), 42-46.

- Lamus, F.; Plazas, M. y Luna, P. (2015). Resistencia de una conexión emperrada solicitada a cizalladura doble paralela a la fibra para estructuras de guadua angustifolia. *Tecnura*, 19(43), 52-62.
- Neff, P.; Chelminski, K.; Muller, W. y Wieners, C.; (2007). A numerical solution method for an infinitesimal elasto-plastic –Cosserat model. *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 17(8), 1211-1239.
- Orlando, A.; Hanes, D. y Shen, H. (2009). *Scaling Effects in Direct Shear Test*. Powders and Grains 2009. Proceedings of the 6th International Conference on Micromechanics of Granular Media. AIP Conference Proceedings Col 1145 Issue 1.
- Palmeira, E. y Milligan, G. (1989). Scale Effects in Direct Shear Test on Sand. *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1(1), 739-742.
- Prada, L.; Ramos-Cañón, A.; Solaque, B. y Caicedo, B. (2011). Confiabilidad aplicada al diseño geotécnico de un muro de contención. *Revista Obras y Proyectos*, 9, 49-58. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132011000100006>
- Ramos-Cañón, A. (2015). Influence of the void ratio and the confining on the static liquefaction in slopes in Changi sand. *Tecnura*, 19(43), 63-73.
- Ramos-Cañón, A. y Prada, L. (2015). Desempeño del continuo de Cosserat para tener en cuenta efectos de escala en un ensayo de corte directo. *Revista EIA*, 12(23), 51-59.
- Riahi, A. y Curran, J. (2009). Full finite element Cosserat formulation with application in layered structures. *Applied Mathematical Modelling*, 33(8), 3450-3464.
- Riahi, A. y Curran, J. (2010). Comparison of the Cosserat Continuum approach with finite element interface models in a simulation of layered materials. *Transactions A: Civil Engineering*, 17(1), 39-52.
- Sharbati, E. y Naghdabadi, R. (2006). Computational aspects of the Cosserat finite element analysis of localization phenomena. *Computational Material Science*, 38(2), 303-315.
- Tejchman, J. (2007). FE Analysis of contract shear zones in loose granular materials. *Granular Matter*, 9, 49-67.
- Vega-Posada, C.; Zapata-Medina, D. y Ramos-Cañón, A. (2016). Blast densification: A proposed methodology to quantify the amount of densification required to prevent liquefaction and flow in sandy soils. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 80, 4-8.
- Wu, P.; Matsushima, K. y Tatsuoka F. (2008). Effects of Specimen Size and Some other Factors on the Strength and Deformation of Granular Soil in Direct Shear Tests. *Geotechnical Testing Journal*, 31(1), 1-20.
- Zhou, Q.; Helenbrook, B. y Shen, H. (2009). A Computational Study of the Micromechanics Under Pre and Post-Failure in a 2-D Direct Shear Test. *Chinese Science Bulletin*, 54, 4337. Doi:10.1007/s11434-009-0516-5.





## Identificación de patrones de variabilidad climática a partir de análisis de componentes principales, Fourier y clúster k-medias

### Identifying patterns of climate variability from principal component analysis – PCA, Fourier and k-means clustering.

Juan Gabriel Rueda Bayona<sup>1</sup>, Cindy Judith Elles Pérez<sup>2</sup>, Edgar Humberto Sánchez Cotte<sup>3</sup>, Ángel León González Ariza<sup>4</sup>, Germán Daniel Rivillas Ospina<sup>5</sup>

**Fecha de recepción:** 17 de febrero de 2016

**Fecha de aceptación:** 10 de septiembre de 2016

**Cómo citar:** Rueda-Bayona, J.G.; Elles-Pérez, C.J.; Sánchez, E.H.; González, A.L. y Rivillas-Ospina, G.D. (2016). Identificación de patrones de variabilidad climática a partir de análisis de componentes principales, Fourier y clúster k-medias. *Revista Tecnura*, 20(50), 55-68. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a04

#### RESUMEN

**Contexto:** Una investigación mediante el Análisis de Componentes Principales (APC) se llevó a cabo para identificar la variabilidad y los patrones climáticos de dos importantes ciudades del Caribe Colombiano.

**Método:** Para el desarrollo de este trabajo se empleó información satelital de resolución temporal trihoraria de 35 años (1980-2014) y se efectuó escalamiento espacial mediante información in situ para dos ciudades en Colombia (Cartagena y Barraquilla).

**Resultados:** Los resultados de correlación superiores al 80% permitieron efectuar un adecuado ajuste para el análisis de información de velocidad de viento y temperatura ambiente. Para cada una de las 4 series de tiempo se construyó una matriz de empotramiento y de desfase con el objetivo de aplicar análisis de componentes principales o conocido también como análisis espectral singular. Fueron

identificados los componentes principales cuya representatividad es inmediatamente superior al 70% para la temperatura y para el viento en ambas ciudades. Se efectuó un análisis de Fourier a la velocidad del viento y la temperatura y se detectaron modos de oscilación similares a los modos de oscilación (componentes principales) detectados mediante el APC.

**Conclusiones:** Se encontró una variabilidad diurna para temperatura, y variabilidad diurna del viento para la ciudad de Cartagena, explicada por las brisas de mar y de tierra. Adicionalmente se encontró variabilidad trimestral asociada a las oscilaciones Maden Julian, variabilidades semestrales, anuales, y variabilidad de 6 años relacionada con el fenómeno del Niño. Finalmente mediante análisis de clúster se identificaron dos patrones climáticos en las zonas de estudio.

**Palabras clave:** Clima, Temperatura, Velocidad del viento, Componentes Principales, Fourier. Clúster.

1 Ingeniero civil, magíster en Ingeniería – Recursos Hidráulicos, tecnólogo en Oceanografía, candidato a doctor en Ingeniería Civil, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. Contacto: [jgrueda@uninorte.edu.co](mailto:jgrueda@uninorte.edu.co)

2 Ingeniera química, candidata a doctor en Ingeniería Civil, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. Contacto: [ellesc@uninorte.edu.co](mailto:ellesc@uninorte.edu.co)

3 Ingeniero civil, magíster en Ingeniería Civil, estudiante de Doctorado en Ingeniería Civil en la Universidad del Norte, Barranquilla, docente de planta, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D. C. Contacto: [esanchez@udistrital.edu.co](mailto:esanchez@udistrital.edu.co)

4 Ingeniero industrial, doctor en Ingeniería Industrial, docente investigador, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. Contacto: [agonzale@uninorte.edu.co](mailto:agonzale@uninorte.edu.co)

5 Ingeniero civil, máster en Ingeniería, doctor en Ingeniería. Profesor, asistente Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. Contacto: [grivillas@uninorte.edu.co](mailto:grivillas@uninorte.edu.co)



## ABSTRACT

**Context:** Is achieved a research through Principal Component Analysis (PCA) for determining the variability and climate patterns of two important cities in the Colombia Caribbean.

**Method:** This research used satellite data with three hourly resolution contained in a 35 year data set (1980 to 2014), and a spatial scaling was performed using information related to Cartagena and Barranquilla cities, located in the north of Colombia.

**Results:** The correlation results, above 80 %, show an appropriate adjustment for the information analysis of wind speed and temperature. Time lag matrixes were built for the time series with the aim of applying the Principal Component Analysis (PCA), known as Singular Spectrum Analysis. The main components

were identified, which represent more than 70% of the temperature and the wind data in both cities. A Fourier analysis for the wind speed and the temperature allowed identifying similar oscillation modes (main components) detected by the PCA.

**Conclusions:** Sea and land breezes explain the identified diurnal temperature and wind speed variability in Cartagena. Additionally were observe a quarterly variability associated with fluctuations Maden Julian, semiannual, annual, and 6-year variability associated with ENSO. Finally, the cluster analysis allowed the identification of two-climate pattern in the study area.

**Keywords:** Climate, Temperature, Wind speed, Principal Components, Fourier, Cluster.

## INTRODUCCIÓN

Los procesos físicos que se dan en la atmósfera presentan un carácter dinámico, aleatorio y de diferente naturaleza, lo que los convierte en fenómenos complejos de comprender y cuantificar. Para estudiar los efectos que en los sistemas ambientales y la infraestructura producen dichos procesos, es necesario caracterizar en detalle los cambios que se dan en las variables atmosféricas a diferentes escalas. En ingeniería es muy importante caracterizar las componentes de viento, precipitación, oleaje y caudal para el diseño de infraestructura hidráulica o para la definición de sistemas de gestión de riesgo. Para el pronóstico de estas variables se emplean comúnmente modelos estocásticos que permiten obtener con base en series de tiempo conocidas, el comportamiento futuro de los parámetros físicos evaluados en una localidad específica. El empleo de modelos numéricos estructurados a partir de métodos numéricos o estadísticos para estudiar el clima en distintas escalas, se ha evidenciado en diversos estudios de investigación.

Skittides y Früh (2014) emplean el análisis de componentes principales (ACP) para estimar los

campos de viento, basados en el comportamiento de los procesos físicos en el pasado para predecir eventos futuros de naturaleza dinámica. El potencial de esta técnica se basa en la capacidad de pronosticar el error probable que será obtenido y en efectuar pronósticos a partir de un conjunto de eventos pasados de características similares, lo que permite generar series sintéticas de gran precisión en el instante que la información es generada.

Rojó-Hernández y Carvajal-Serna (2010) estudiaron la dinámica no lineal de los caudales de los ríos de Colombia utilizando un modelo periódico de predicción basado en el análisis espectral singular (AES), el cual deriva su funcionamiento en los métodos ACP. El estudio se enfocó en estudiar los ciclos que influyen sobre la dinámica de las series de caudales a partir del empleo ACP, mediante la aplicación de regresiones lineales múltiples, bien sobre componentes principales o mediante componentes reconstruidas, e involucrando variables climáticas macrorrezagadas en el tiempo.

Carvajal y Marco (2004) llevaron a cabo un estudio de ACP a 50 estaciones de precipitación mensual y 8 de caudal, con el fin de verificar la asociación entre variables macroclimáticas

relacionadas con el fenómeno ENSO (El Niño Oscilación del Sur) y la hidrometeorología del Valle del Cauca (Colombia). Encontraron que al emplear esta metodología en la modelación de la precipitación y el caudal se obtiene un mejor ajuste de los modelos regresivos.

En la investigación realizada por Giraldo, León y Gómez (2013) se empleó el método K-medias (*K-means*) para inicializar algoritmos particionales aplicados al proceso de minería de flujo de datos.

Los investigadores Plazas-Nossa y Torres (2014) combinaron la técnica de PCA y Fourier con el objetivo de pronosticar series de tiempo obtenidas mediante la técnica de espectrometría UV-Vis. Los autores recomendaron efectuar los análisis de los rangos de los espectros UV y Vis de manera independiente, facilitando así la identificación de los componentes principales y los armónicos fundamentales.

Miao *et al.* (2015) utilizaron en conjunto el método K-medias tradicional con el método *spectral clustering* (SC), dando como resultado el método SKC (*spectralanalysis*-basado *K-means clustering*). Mo y Ghil (1988) hacen uso de un método de análisis de clúster modificado para identificar patrones espaciales de flujo del viento en el planeta, y su interacción. Skapa *et al.* (2012) utilizan el agrupamiento K-medias para identificar los fenómenos climáticos que tienen efectos sobre la propagación de las ondas de radio en telecomunicaciones móviles, y a su vez centran su trabajo en analizar los parámetros meteorológicos importantes como los resultados de K-medias. Kumar *et al.* (2012) aplicaron funciones de densidad de probabilidad en conjunto con el método de K-medias para predecir el clima en Quinland.

Frecuentemente la información climática disponible para la realización de investigaciones y estudios de ingeniería a escala local es limitada. Por lo general, se disponen de estaciones climatológicas cercanas para inferir sobre el comportamiento local de las variables atmosféricas, lo que puede conllevar establecer patrones de variabilidad climática no asociados a las condiciones esperadas. Adicionalmente, las estaciones cercanas

al área de estudio poseen registros de información, con series de tiempo menores a 10 años, limitando así identificar modos de oscilación climáticos superiores al tiempo de medición *in situ* de las estaciones. Otra limitación observada en las estaciones climatológicas, son los vacíos de información generados principalmente por fallas en los instrumentos de medición, dando como resultado a que se afecte la calidad de los estudios.

Las limitaciones para la realización de estudios climatológicos locales se han reducido con el avance de los sistemas de teledetección con aplicación meteorológica, la evolución de los modelos numéricos, y el mejoramiento de las técnicas de análisis de información numérica satelital. Con base en lo anterior, la aplicación conjunta de información medida y modelada, se conoce como reanálisis, la cual es una técnica de asimilación de datos para la creación de conjunto de datos climáticos de alta resolución espacial y temporal.

Con base en las consideraciones anteriores, el presente trabajo identifica patrones de comportamiento de velocidad del viento y temperatura en localidades donde la disponibilidad de información es limitada. Se empleó información de reanálisis localmente ajustada con información *in situ*, y se estudió la variabilidad climática mediante análisis de componentes principales, Fourier y clúster K-medias.

## METODOLOGÍA

### Manejo de la información

Como paso previo a la aplicación de los métodos numéricos y estadísticos de modelación y análisis, se efectuó asimilación de información de reanálisis perteneciente a la base de datos NCEP North American Regional Reanalysis NARR (NOAA, 2015). La asimilación pretende escalar información satelital a los puntos de estudio, mediante análisis de regresión lineal a una serie de tiempo trihoraria de 30 años (NARR); como información *in situ* de referencia para la asimilación, se empleó información horaria de 2013 y 2014 de las

estaciones climáticas ubicadas en los aeropuertos de Barranquilla y Cartagena (Ideam, 2016).

### Pronóstico basado en análisis de componentes principales

Una forma de entender la dinámica de las series de tiempo climatológicas es a través del análisis espectral singular (AES), que en términos generales

$$X_2(t) = \left\{ X\left(t + \frac{1}{2}M\tau - \tau\right), \dots, X(t + 2\tau), X(t + \tau), X(t), X(t - \tau), X(t - 2\tau), \dots, X\left(t - \frac{1}{2}M\tau\right) \right\} \quad (1)$$

De esta forma, la matriz de retraso queda con las siguientes dimensiones para  $N_d$  datos de la serie de tiempo.

Filas:  $N = N_d - M\tau + \tau$ ; Columnas:  $M$ .

El análisis de componentes principales se hace obteniendo la matriz de varianza-covarianza para la matriz de retrasos, a través de los eigenvalores y los eigenvectores de acuerdo con la ecuación (2).

$$Ae_i = \lambda_i e_i \quad (2)$$

Donde  $A$  es la matriz de varianza-covarianza,  $e_i$  los eigenvectores, que representan la contribución de cada variable a la señal original y  $\lambda_i$  los eigenvalores, que expresan la variabilidad asociada a cada eigenvector.

La reconstrucción de la señal original se puede lograr al proyectar los eigenvalores sobre la matriz de datos originales  $X(t)$  mediante la ecuación (3).

$$Y_i(t) = \sum X(t + j - 1)e_i(j) \quad (3)$$

Donde  $Y_i(t)$  son los componentes principales asociados a cada eigenvector  $e_i$ . Al final, mediante la ecuación (4) se puede reconstruir la señal como la sumatoria de los  $Y_i(t)$  (García-Cabrejo y Moreno-Sánchez, 2006).

$$X_i(t) = \sum_{i=1} Y_i(t) \quad (4)$$

El análisis de componentes principales se logró mediante la aplicación de los supuestos teóricos

es la aplicación del análisis de componentes principales (ACP) a series de tiempo rezagadas (Elsner y Tsonis, 2013). El tratamiento de los datos se hace mediante la aplicación del teorema de Takens (1980), para la construcción de una matriz de retrasos. La matriz se construye a partir de un vector de retrasos con dimensión  $M$ , representando la ventana de tiempo escogida para la modelación de los datos, (ecuación (1)) (Skitties y Früh, 2014).

anteriormente mencionados. Primero, se obtuvo la matriz de retrasos para valores de ventana  $M$  de 3 días, 1 mes, 6 meses, 1 año y 6 años, con el fin de determinar la ventana de tiempo que ofrecía un mejor ajuste de los datos. Segundo, se obtuvieron los eigenvectores y los eigenvalores según la ecuación (3) y con los eigenvalores, se extrajo información acerca de la varianza acumulada explicada por los eigenvectores.

Seguidamente, se determinó el número de eigenvectores necesarios para modelar los datos, sin incluir ruido en el modelo, esto se hizo teniendo en cuenta que los eigenvectores explicaran más del 70 % de la variabilidad total del sistema. Se proyectaron todos los eigenvectores sobre la serie de datos original, tanto para la temperatura como para la velocidad del viento de Barranquilla y Cartagena respectivamente, para espacios de tiempo de 25 años y luego se modelaron de 3 días, 1 mes, 6 meses, 1 año y 6 años para observar patrones de oscilación y relacionarlos con fenómenos naturales. Por último se realizó la sumatoria de los componentes encontrados según la ecuación (4). El ajuste de la señal proyectada con los datos originales de la serie de tiempo se midió por medio del cálculo del coeficiente de correlación.

### Pronóstico basado en análisis de fourier

En líneas generales el análisis de Fourier consiste en descomponer series de tiempo, en un conjunto de ondas regulares con fase, amplitud y periodo

definido, a través de funciones seno y coseno. Debido a que la variabilidad climática representa las oscilaciones o cambios de patrón recurrente de variables atmosféricas, se decidió emplear la técnica de Fourier, considerando el método mínimos cuadrados elaborado por Dronkers y Schonfeld (1959).

Para el presente estudio, la velocidad del viento y la temperatura se aproximan entonces, a la suma de esas ondas regulares (ecuación (5)).

$$y(t_n) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^M a_k \cos(\omega_k t_n) + b_k \sin(\omega_k t_n) \quad (5)$$

Donde,

$$t_n = n\Delta t$$

$$\omega_n = 2\pi \frac{k}{N} = 2\pi f_k$$

$\Delta t$ : intervalo de muestreo o de registro.

$N$ : número de observaciones de nuestra serie de tiempo.

$k$ : es el armónico.

$\omega_n$ : es la frecuencia del k-ésimo armónico en radianes.

$M$ : número de armónicos a determinar.

La frecuencia mínima a partir de los registros de medición o de las observaciones se calcula utilizando la ecuación (6).

$$k = 1 \rightarrow f_0 = \frac{1}{N} \rightarrow \omega_1 = \frac{2\pi}{N} \quad (6)$$

La frecuencia máxima de las mediciones se calcula utilizando la ecuación (7).

$$k = M \rightarrow f_M = \frac{1}{2\Delta t} \rightarrow \omega_1 = \frac{\pi}{\Delta t}, M = \frac{N}{2} \quad (7)$$

Cumpléndose que:  $f_0 \leq f \leq f_M$

Los coeficientes de Fourier se calculan utilizando las ecuaciones (8) – (11)

$$a_0 = \frac{2}{N} + \sum_{n=1}^M y(t_n) \quad (8)$$

$$a_k = \frac{2}{N} + \sum_{n=1}^N y(t_n) \cos(\omega_k t_n) \quad (9)$$

$$a_{N/2} = \frac{1}{N} + \sum_{n=1}^N y(t_n) \cos(\pi \cdot t_n) \quad (10)$$

$$b_k = \frac{2}{N} + \sum_{n=1}^N y(t_n) \sin(\omega_k \cdot t_n) \quad (11)$$

La señal obtenida, se construyó mediante la ecuación (12).

$$y(t_n) = \frac{C_0}{2} + \sum_{k=1}^M C_k \cos(\omega_k t_n - \theta_k) \quad (12)$$

Los coeficientes  $C_k$  y  $\theta_k$  se obtiene mediante la ecuación (13) y ecuación (14).

$$c_k^2 = a_k^2 + b_k^2 = \text{amplitudes de los armónicos} \quad (13)$$

$$\theta_k = \tan^{-1} \frac{b_k}{a_k} = \text{fases de los armónicos} \quad (14)$$

## Identificación de patrones de asociación bivariado mediante análisis de cluster k-medias

En busca de identificar si existen patrones de agrupación entre la velocidad del viento y la temperatura ambiente para cada una de las dos ciudades, se efectuó un análisis de clúster mediante el método del k-medias (*k-means clustering*), y para determinar el número de grupos de una manera cuantitativa, se empleó el método de identificación de silueta (*silhouette*).

El análisis de clúster (conglomerados) es una técnica multivariante que busca agrupar elementos (o variables), tratando de lograr la máxima homogeneidad posible en cada grupo y marcadas diferencias entre ellos; se puede combinar con otras técnicas como el ACP, y de esta forma reducir el volumen de los datos correlacionados, en un número de componentes principales representativos no correlacionados, y posteriormente hacer un análisis clúster sobre los componentes obtenidos.

La técnica de análisis de clúster puede ser de tipo jerárquico o no jerárquico, y para la presente investigación se empleó el análisis de tipo no jerárquico conocido como la metodología de

K-medias. En esta metodología se seleccionan unos valores considerados base de cada conglomerado, para agrupar en torno a ellos todos los elementos que se encuentren en una determinada distancia (distancia euclidiana). Se toman los k primeros casos como grupos unitarios y se asignan el resto de casos a los grupos con el centroide más próximo, después de cada asignación se recalculan los centroides y se vuelven a asignar los individuos al centroide más próximo; iterando hasta que ningún individuo cambie de grupo cuando se haga la reasignación, de forma que tenga un comportamiento convergente. El tamaño del grupo o del conglomerado puede ser definido con base a la distancia euclidiana entre elementos (ecuación (15)).

$$d_2(x_i, x_j) = \|xi - xj\|^2 = \sqrt{\sum_{l=1}^p (x_{il} - x_{jl})^2} \quad (15)$$

## RESULTADOS

### Manejo de la información

Las tablas 1 y 2 presentan el ajuste de los datos NARR, junto con los de las estaciones climatológicas del Ideam. A partir de los estadísticos de regresión para los datos de velocidad del viento y de temperatura de las ciudades de Barranquilla y Cartagena, se infirió que el ajuste era adecuado, y permitía establecer una interpolación para obtener la información trihoraria desde enero 1 de 1980 hasta diciembre 31 de 2014, de las series de tiempo bajo estudio.

**Tabla 1.** Estadísticos de regresión entre los datos de velocidad del viento (km/h) de NARR y los datos del Ideam

Estadísticos Ciudades	CCM	R <sup>2</sup>	Intercepto	Pendiente
Barranquilla	0,84	0,71	0	0,6
Cartagena	0,7	0,49	0	0,47

CCM: Coeficiente de correlación múltiple

**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 2.** Estadísticos de regresión entre los datos de temperatura (°C) de NARR y los datos de estaciones climatológicas

Estadísticos Ciudades	CCM	R <sup>2</sup>	Intercepto	Pendiente
Barranquilla	0,99	0,98	0	0,984
Cartagena	0,99	0,99	0	0,995

CCM: Coeficiente de correlación múltiple

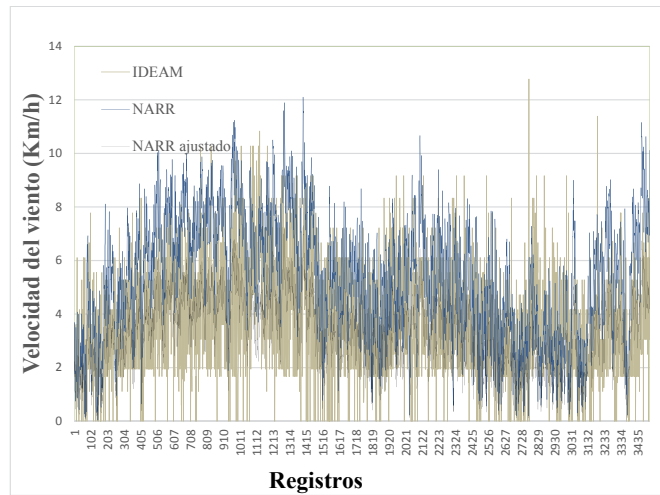
**Fuente:** elaboración propia.

La figura 1 presenta, a manera de ilustración, las series de tiempo trihorarias de los datos tomados de NARR y los del Ideam, junto con los NARR ajustados según el modelo obtenido para la velocidad del viento en Barranquilla, Colombia.

### Pronóstico basado en ACP

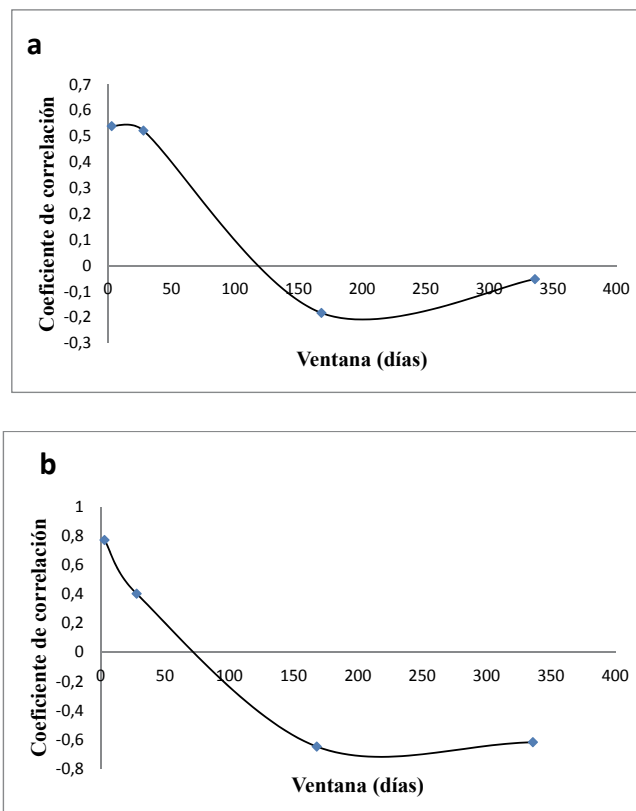
La escogencia del tamaño de la ventana se realizó a partir del coeficiente de correlación del modelo obtenido por ACP; en la figura 2, se puede observar que a medida que se aumentó el tamaño de la ventana para los datos de temperatura y velocidad del viento de Barranquilla y Cartagena respectivamente, el coeficiente de correlación se disminuyó de manera significativa.

El gráfico de sedimentación en el cual se muestran los eigenvalores  $l_r$  o autovalores, se presenta en la figura 3 de aquí podemos observar que a partir de cierto número de componentes los autovalores permanecen constantes.



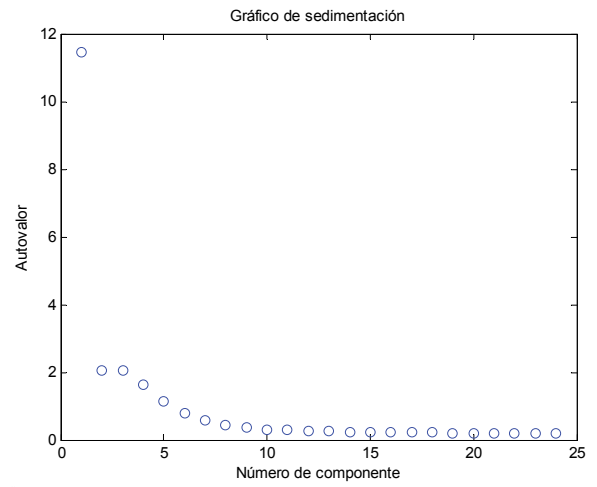
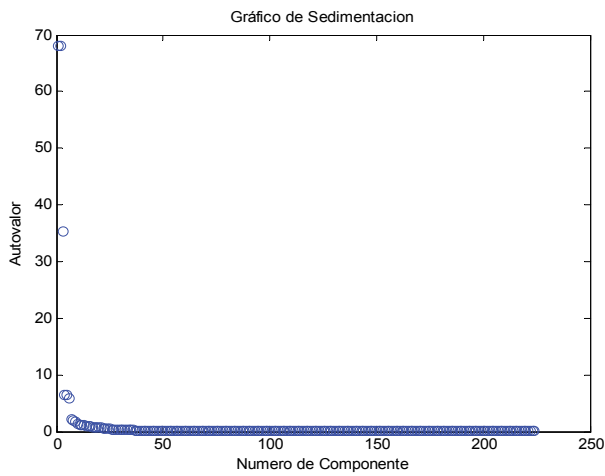
**Figura 1.** Series de tiempo trihoraria de velocidad del viento para la ciudad de Barranquilla desde 1 enero de 1980 a 31 diciembre de 2014

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 2.** Coeficientes de correlación de modelación de serie de tiempo de: a) temperatura para la ciudad de Barranquilla; b) velocidad del viento de Cartagena, para un tiempo de 25 años con ventana cambiante, usando ACP

**Fuente:** elaboración propia.



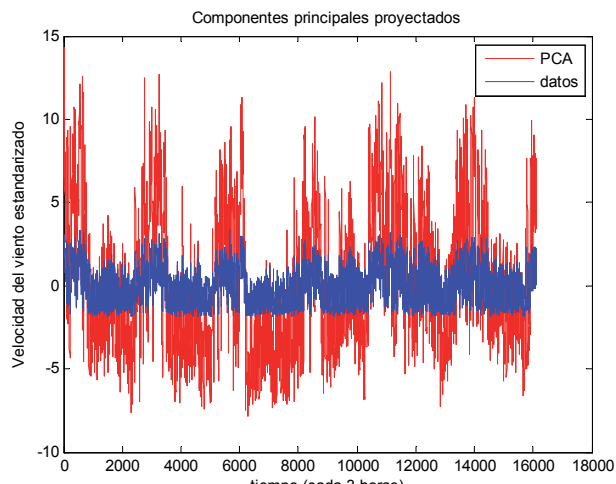
a.

b.

**Figura 3.** Gráficos de sedimentación de modelación de datos: a) temperatura de Barranquilla, b) velocidad del viento de Cartagena.

**Fuente:** elaboración propia.

Finalmente, al proyectar los eigenvalores escogidos sobre la serie original se obtuvo el pronóstico a 25 años de velocidad del viento para la ciudad de Cartagena, con cambio de ventana de 3 días. En la figura 4 se exhibe la comparación de la proyección lograda con la serie original.



**Figura 4.** Eigenvalores proyectados de una serie de 6 años de modelación y ventana de tiempo de desfase de 3 días para la velocidad de viento en Cartagena. Coeficiente de correlación: 0.7585, P-valor: 0

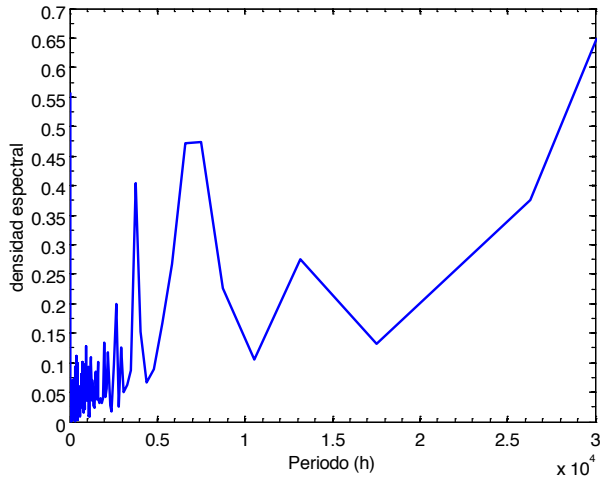
**Fuente:** elaboración propia.

### Pronóstico basado en análisis de Fourier

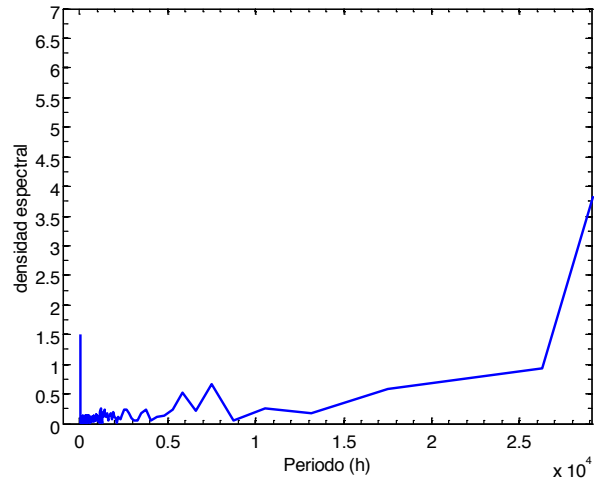
Con base en el periodograma (figura 5) de la velocidad del viento para la ciudad de Barranquilla y Cartagena, se identificaron ciclos de variabilidad de 8, 12, 24 horas; 81, 109,5, 156,41, 312,87 días; 2 años. Estos ciclos de oscilación se asocian a la variabilidad natural del parámetro, donde el ciclo de 6 años se encuentra relacionado con el fenómeno de El Niño.

Inspeccionando los resultados de análisis espectral para temperatura ambiente (figura 6) se identificaron ciclos de variabilidad de 24 horas, 109,5 días, 312,87 días, 2 años y 6 años. Estos ciclos de oscilación se asociaron a la variabilidad natural del parámetro, donde el ciclo de 6 años esté posiblemente relacionado con el fenómeno de El Niño.

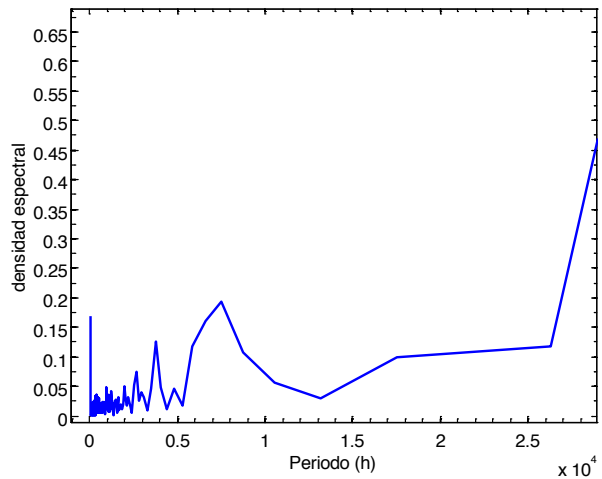
Los modos de oscilación natural para la ciudad de Barranquilla (figuras 5 y 6) fueron similares a los de Cartagena, en donde se observó un ciclo diurno, cuasitrimestral, anual, de 2 y 6 años. El ciclo cuasitrimestral puede estar asociado a los cambios de estación relacionados con los solsticios y equinoccios.



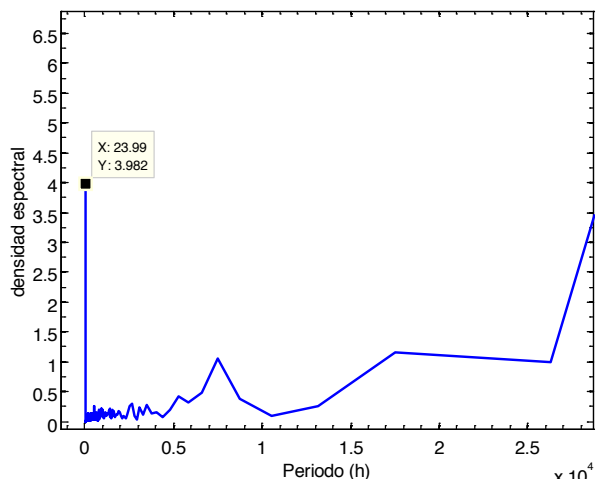
a.



a.



b.



b.

**Figura 5.** Periodo grama para: a) velocidad del viento en Barranquilla, b) velocidad de viento en Cartagena

**Fuente:** elaboración propia.

**Figura 6.** Periodograma para a) temperatura ambiente en Barranquilla, b) temperatura ambiente en Cartagena

**Fuente:** elaboración propia.

Se efectuaron las pruebas de sensibilidad mediante la variación del lapso de tiempo del conjunto de datos al cual se le efectuó el análisis de Fourier, y la variación del tiempo de modelación para las dos ciudades, obteniéndose modelos muy similares. Efectuadas las pruebas se encontró que para la ciudad de Barranquilla, se obtuvo

un modelo de Fourier para el pronóstico del viento empleando una serie de tiempo trihoraria la cual debe tener un lapso de 6 años. A partir de lo anterior se obtuvo al comparar los resultados del modelo con la información satelital ajustada, un coeficiente de determinación de 0,9432 y un p-valor significativo de 0 (tabla 3).



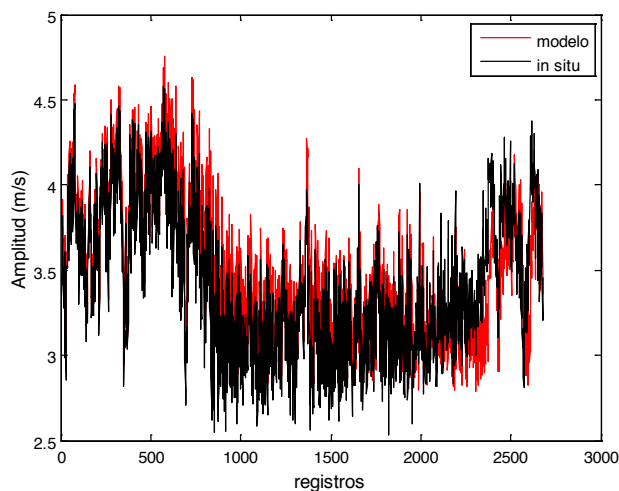
**Tabla 3.** Resultados de las pruebas de sensibilidad para la modelación de velocidad de viento y temperatura ambiente en la ciudad de Barranquilla

lapso de tiempo 6 años				
Pronóstico	Velocidad del viento		Temperatura ambiente	
	p-valor	R <sup>2</sup>	p-valor	R <sup>2</sup>
3 días	0	0.9917	0	0.9949
7 días	0	0.9646	0	0.9956
15 días	0	0.9844	0	0.9782
1 mes	0	0.9823	0	0.9839
3 meses	0	0.9617	0	0.9679
6 meses	0	0.9432	0	0.9263
12 meses	0	0.7631	0	0.786
6 años	0	0.0023	0	0.0248

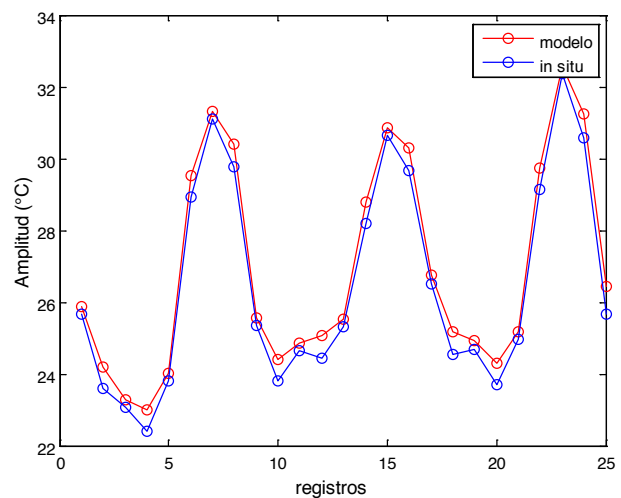
Fuente: elaboración propia.

Los resultados de la prueba de sensibilidad del modelo de Fourier construido indicaron que se puede modelar velocidad del viento y temperatura ambiente para la ciudad de Cartagena y Barranquilla hasta 6 meses según el coeficiente de determinación de 0,93 con p-valor significativo de 0 (tabla 3).

Con respecto a la temperatura se obtuvo un modelo de Fourier de temperatura para pronosticar cada 3 horas hasta 6 meses (figura 7). El modelo fue validado con los datos de satélite ajustado, y se obtuvo un coeficiente de determinación de 0,93 con p-valor significativo de 0.



a.



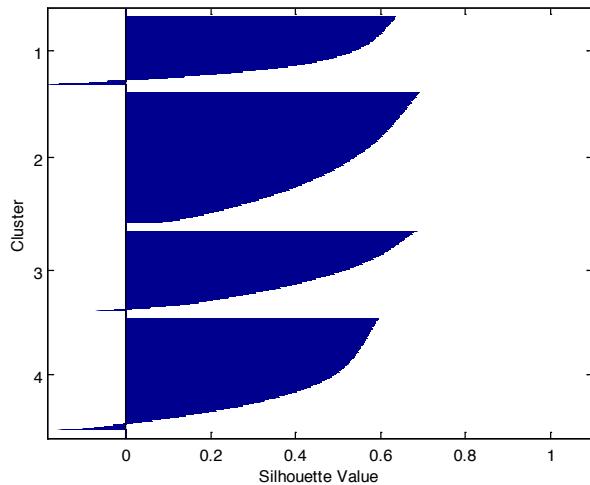
b.

**Figura 7.** Modelación de a) 3 días de temperatura ambiente en Barranquilla, b) 6 meses de la velocidad del viento en Cartagena

Fuente: elaboración propia.

## Agrupamiento mediante k-medias

Con el objeto de identificar patrones de asociación de las variables atmosféricas, se efectuó el análisis de conglomerados. El número de grupos puede ser inspeccionado mediante el diagrama de siluetas (figura 8).



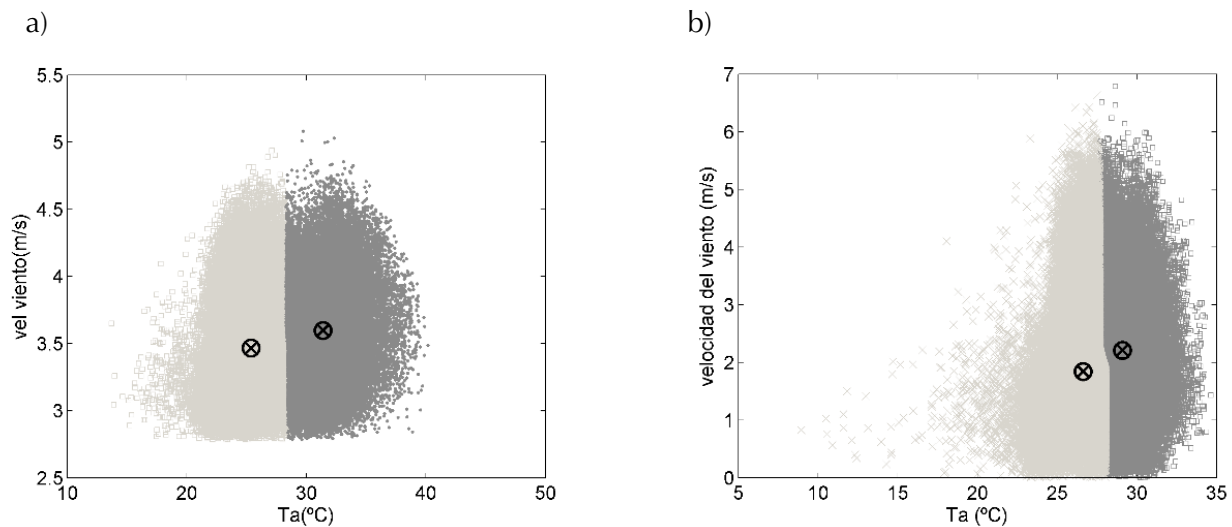
**Figura 8.** Identificación de número de clúster mediante diagrama de siluetas para Barranquilla

**Fuente:** elaboración propia.

Las siluetas deben ser iguales o mayores a 0,6, de lo contrario, nos indican que los grupos no están correctamente diferenciados. Con base en los resultados en esta investigación, fue posible identificar dos grupos o clúster de asociación entre la temperatura ambiente y el viento para la ciudad de Barranquilla y Cartagena (figura 8).

A partir de la agrupación no jerárquica de clúster (k-medias) vista en la figura 9, se encontró que para la ciudad de Barranquilla se presentan dos patrones característicos del clima, siendo el primero de temperaturas de 25 °C y velocidad de viento de 3,5 m/s, y el segundo de 31 °C y velocidad de viento de 3,6 m/s, donde los rangos de viento y temperatura ambiente se encontraron entre 2,7 – 4,7 m/s y 20-39 °C.

Los resultados de agrupación no jerárquica de clúster para la ciudad de Cartagena, evidenciaron dos patrones característicos del clima, donde el primero indicó temperaturas de 26 °C y velocidad de viento de 2 m/s, y el segundo de 29 °C y velocidad de viento de 2,2 m/s, donde los rangos de viento y temperatura ambiente se encontraron entre 0-6 m/s y 20-35 °C.



**Figura 9.** Agrupación por clúster tipo k-medias de la información de temperatura y velocidad de viento para: a) Barranquilla, b) Cartagena

**Fuente:** elaboración propia.

## Discusión

La ventana de tiempo escogida para realizar el ACP fue de 3 días, ya que esta presentó un mejor ajuste de los datos y mayores coeficientes de correlación tanto para la temperatura como para la velocidad del viento de las ciudades de Barranquilla y Cartagena.

Para la temperatura de Barranquilla (figura 3a) solo fue necesaria la inclusión de siete autovalores, y para la velocidad del viento en Cartagena cuatro (los cuales explicaron el 70 % de la variabilidad de sistema); la inclusión de más componentes introduciría ruido en la predicción.

El ACP permitió replicar el comportamiento oscilatorio de la serie de tiempo; sin embargo, la amplitud de la señal proyectada es menor que la de la serie original, lo que indica que es necesario el uso de otra técnica en conjunto para lograr un mejor ajuste, que para la presente investigación se seleccionó un análisis de Fourier.

Con los análisis de Fourier, fue posible identificar patrones de variabilidad climática esperados, donde el ciclo diurno fue el de mayor densidad espectral para las dos ciudades y los dos parámetros. Las pruebas de sensibilidad, las cuales se efectuaron para conjunto de datos de tamaño de 1 y 6 años, se encontraron que a medida que aumenta el tamaño del lapso de tiempo, la técnica incrementa la identificación de los modos de oscilación natural. Para Barranquilla, el mejor modelo de viento mediante Fourier para la velocidad de viento y temperatura, requirió de 6 años del conjunto de información, con capacidad de pronosticar hasta de 6 meses. Con respecto a la ciudad de Cartagena, se requirió de un conjunto de datos de 6 años de duración, obteniéndose un modelo de Fourier con capacidad para modelar de manera trihoraria hasta 3 meses velocidad de viento, y 6 meses temperatura ambiente.

Los patrones de clima obtenidos mediante el análisis de clúster permitieron identificar que, para la ciudad de Barranquilla, con la forma esférica de

agrupación los datos se asocian a una distribución normal conjunta, tomando como las medias los valores de los centroides de cada clúster. Para Cartagena, el comportamiento de agrupación denotó que mayores velocidades de viento se presentan con respecto a Barranquilla principalmente cuando se registran 27 °C. Se encontró que las más bajas temperaturas tienen cierto grado de asociación con velocidad de viento inferior a 2 m/s donde se registraron valores de temperatura mínimos de 20 °C y atípicos alrededor de 10 °C.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La asimilación de datos de reanálisis, mediante el ajuste con información *in situ* de estaciones climatológicas, permitió construir una serie de tiempo de 30 años con intervalos trihorarios. Las series de tiempo construidas fueron posteriormente analizadas mediante ACP, Fourier y K-medias.

El análisis de componentes principales (ACP) permitió a través de las matrices de varianza de las series de tiempo, identificar modos de oscilación contenidos en los autovalores. Los autovectores calculados mediante AES permitieron modelar con un alto grado de correlación, 25 años de velocidad del viento para la ciudad de Cartagena, con cambio de ventana de 3 días. Si bien el método AES pudo representar el periodo y la fase de la señal atmosférica, tuvo limitaciones en la amplitud de la misma. Lo anterior evidenció una debilidad en la técnica cuando se trata de obtener pronósticos con una ventana de tiempo grande.

Mediante el análisis de Fourier fue posible identificar patrones de variabilidad en diversas escalas, de las cuales se pueden mencionar la diaria, mensual, trimestral, semestral, anual, 2 años y 6 años, las cuales pueden estar asociadas a eventos climáticos locales y de orden regional como el fenómeno de El Niño. El modelo fue construido y validado con resultados estadísticos significativos, los cuales permiten emplear el modelo de Fourier para

pronosticar temperatura ambiente y velocidad de viento en las localidades de estudio, hasta un lapso de tiempo de 6 meses. Con la técnica de clúster fue posible identificar dos patrones climáticos en las localidades de estudio, donde a través del centroide de cada clúster se reconocieron condiciones medias de temperatura y velocidad de viento.

En términos generales, fue posible emplear información de reanálisis, escalada espacialmente hasta las ciudades de Barranquilla y Cartagena, y validar el modelo mediante el empleo de información de estaciones climatológicas de resolución horaria. A través de ajustes de regresión fue posible ajustar la información de reanálisis, y con este se emplearon las técnicas de APC-AES, Fourier y K-medias, para identificar los principales modos de oscilación y agrupamiento de cada parámetro meteorológico. A partir de los modos de oscilación calculados mediante Fourier, se construyeron 4 modelos con capacidad de pronósticos de resolución trihoraria y de horizonte de pronóstico de 6 meses.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad del Norte por el apoyo financiero a través de las becas de doctorado UN-OJ-2013-22058 y UN-OJ-2013-22022, y al Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental por el apoyo académico y administrativo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carvajal, Y. y Marco, J.B. (2004). Análisis de variabilidad de datos medioambientales aplicando funciones ortogonales empíricas o componentes principales. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 1(2), 4-12.
- Dronkers, J.J. y Schonfeld, J.C. (1955). *Tidal computations in shallow water*. Am. Soc. Civil Engineers Proc. Hydraulics Div. A. Waalewijn (81, No. 714, 49 p.).
- Elsner, J.B. y Tsonis, A.A. (2013). *Singular Spectrum Analysis: a new tool in time series analysis*. Nueva York: Springer Science & Business Media.
- García-Cabrejo, O. y Moreno-Sánchez, G. (2006). Sobre la utilización del análisis de Fourier, análisis espectral singular y redes neuronales artificiales en estratigrafía. Parte 1: Teoría y caso sintético. *Geología Colombiana*, 31.
- Giraldo, F.; León, E. y Gómez, J. (2013). Caracterización de flujos de datos usando algoritmos de agrupamiento. *Revista Tecnura*, 17(37), 153-166.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) (2016). Recuperado el 05 de 02 de 2016, de: <http://www.ideam.gov.co>
- Kumar, A.; Sinha, R.; Bhattacharjee, V.; Verma, D. y Singh, S. (2012). *Modeling using K-means clustering algorithm*. Recent Advances in Information Technology (RAIT), 1st International Conference.
- Kumar, V.; Steinbach, M.; Tan, P.; Klooster, S.; Potter, C. y Torregrosa, A. (2001). *Mining scientific data: Discovery of patterns in the global climate system*. Joint Statistical Meeting.
- Miao, C.; Chen, J.; Liu, J. y Su, H. (2015). *An improved Markov chain model for hour-ahead wind speed prediction*. Control Conference (CCC), 2015 34th Chinese.
- Mo, K. y Ghil, M. (1988). Cluster analysis of multiple planetary flow regimes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 93, 10927-10952.
- NOAA (10 de octubre de 2015). *Earth System Research Laboratory*. Recuperado el 11 de mayo de 2016, de: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.narr.html>.
- Plazas-Nossa, L. y Torres, A. (2014). PCA/DFT como herramienta de pronóstico para series temporales de absorbancia registradas mediante captosres UV-Vis en sistemas de saneamiento urbano. *Revista Tecnura*, 19(44), 47-57.
- Rojo-Hernández, J.D. y Carvajal-Serna, L.F. (2010). Predicción no lineal de caudales utilizando variables macroclimáticas y análisis espectral singular. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1(4), 59-73.

Skapa, J.; Dvorsky, M.; Michalek, L.; Sebesta, R. y Blaha, P. (2012). *K-mean clustering and correlation analysis in recognition of weather impact on radio signal*. Telecommunications and Signal Processing (TSP), 35th International Conference.

Skittides, C. y Früh, W. (2014). Wind forecasting using principal component analysis. *Renewable Energy*, 69, 365-374.

Takens, F. (1980). *Detecting strange attractors in turbulence*. Warwick: Springer, 1980.



## Computación con palabras para el análisis de factibilidad de proyectos de software

### Computing with words to feasibility study of software projects

Marieta Peña Abreu<sup>1</sup>, Carlos Rafael Rodríguez Rodríguez<sup>2</sup>, Pedro Yobanis Piñero Pérez<sup>3</sup>

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

**Fecha de aceptación:** 10 de septiembre de 2016

**Cómo citar:** Peña A., M.; Rodríguez R.; C.R. y Piñero P., P.Y. (2016). Computación con palabras para el análisis de factibilidad de proyectos de *software*. *Revista Tecnura*, 20(50), 69-84. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a05

#### RESUMEN

**Objetivo:** Este trabajo propone un método para analizar la factibilidad técnica, comercial y social de proyectos de software en entornos de incertidumbre. Permite el trabajo con múltiples expertos y múltiples criterios y facilita la toma de decisiones.

**Método:** La propuesta contiene dos fases, en la primera se recopila la información necesaria y en la segunda se evalúan los proyectos utilizando el modelo de representación lingüístico 2-tupla. Los expertos son seleccionados mediante el análisis de su síntesis curricular. Los criterios de evaluación son definidos utilizando la técnica Grupo Focal y ponderados en el intervalo (0,1) según su importancia. Se ofrecen tres dominios para expresar las valoraciones: numérico, intervalar y lingüístico. Para la agregación se emplean la media aritmética extendida y la media ponderada extendida, que evitan la pérdida de información. Como resultado se obtiene por cada proyecto el par (factibilidad, precisión).

**Resultado:** El método se validó con tres proyectos, se evaluaron diez criterios y participaron seis expertos. La evaluación del proyecto p1 fue factibilidad muy alta con -0,33 de precisión, el proyecto p2 obtuvo una factibilidad alta con 0,38 de precisión

y p3 alcanzó una factibilidad media con -0,21 de precisión.

**Conclusiones:** Este método es una solución favorable para el análisis de factibilidad de proyectos de software con presencia de múltiples expertos y criterios en entornos de incertidumbre. Trata valoraciones heterogéneas sin pérdida de información. Sus resultados son consistentes y útiles para los decisores.

**Palabras Clave:** Análisis de factibilidad, computación con palabras, evaluación de proyectos, incertidumbre, riesgos.

#### ABSTRACT

**Objective:** This paper proposes a method to analyze the technical, commercial and social feasibility of software projects in environments of uncertainty. It allows working with multiple experts and multiple criteria and facilitates decision-making.

**Method:** The proposal contains two phases, first the necessary information is collected and in second place projects are evaluated using 2-tuple linguistic representation model. The experts are selected by analyzing their curricular synthesis. The evaluation criteria are defined using the technique Focus Group and weighted in the interval (0,1) according to their

1 Ingeniera en Ciencias Informáticas, máster en Gestión de Proyectos Informáticos, Universidad de las Ciencias Informáticas, La Habana, Cuba. Contacto: [mpabreu@uci.cu](mailto:mpabreu@uci.cu)

2 Ingeniero en Ciencias Informáticas, máster en Gestión de Proyectos Informáticos, Universidad de las Ciencias Informáticas, La Habana, Cuba. Contacto: [crodriguezr@uci.cu](mailto:crodriguezr@uci.cu)

3 Licenciado en Ciencias de la Computación, doctor en Ciencias Técnicas, Universidad de las Ciencias Informáticas, La Habana, Cuba. Contacto: [ppp@uci.cu](mailto:ppp@uci.cu)

importance. three domains are offered to express the preferences: numeric, interval-valued and linguistic. For aggregation extended arithmetic mean and weighted average extended are used, preventing the loss of information. A 2-tuple (feasibility, precision) is obtained as a result for each project.

**Results:** The evaluation of P1 project was a very high feasibility with -0,33 of precision. The P2 project obtained a high feasibility with 0,38 of precision and

P3 project achieved a medium feasibility with -0,21 of precision.

**Conclusions:** This method is favorable for software projects feasibility analysis with presence of multiple experts and criteria, in environments of uncertainty. It tries heterogeneous assessments without loss of information. Their results are consistent and useful for decision makers.

**Keywords:** Feasibility study, computing with word, project evaluation, uncertainty, risks.

## INTRODUCCIÓN

El éxito de los proyectos de inversión es esencial para el desarrollo de las organizaciones, lo cual incide directamente en el cumplimiento de sus objetivos estratégicos y contribuye a su vez al desarrollo social. Seleccionar adecuadamente los proyectos a emprender en un periodo, es una de las decisiones más complejas para la alta gerencia de cualquier entidad. Esto está dado por los múltiples factores que se deben considerar para tomar tal decisión.

Paralelamente, el desarrollo de las tecnologías en los últimos años, la aparición de internet y el desarrollo de las redes sociales han provocado un auge creciente del desarrollo de *software* en diferentes dominios de aplicación. Los sistemas informáticos pueden incidir directamente en la productividad de las empresas, así como en el control y la toma de decisiones. El desarrollo justificado de proyectos de *software* contribuye al desarrollo de la sociedad, aportando al hombre herramientas informáticas en el nuevo contexto en el que se desempeña. Estos proyectos, a diferencia de los de otras ingenierías, imponen retos adicionales que están dados fundamentalmente por el carácter intangible del *software*.

Sin embargo, al igual que cualquier otro proyecto, obtener un producto informático es una inversión que requiere una eficiente gestión de los recursos disponibles para obtener los resultados

esperados. Un estudio realizado a alrededor de 50.000 proyectos de desarrollo de sistemas en el mundo arrojó que solo 29 % culminan satisfactoriamente, 52 % son renegociados y 19 % son fallidos (The Standish Group, 2015). Entre las principales causas se encuentran: el aumento de los costos durante la ejecución, incumplimiento en los cronogramas pactados, deficiencias en la estimación de los tiempos y costos, entre otros. Ante esta situación, realizar un análisis de factibilidad antes de comenzar la ejecución de un proyecto, se vuelve un proceso imprescindible que pueda garantizar en gran medida el éxito del proyecto.

El análisis de factibilidad debe documentarse como un informe para la alta gestión. Su resultado pretende determinar de manera objetiva si el proyecto puede continuar o se puede optar por otras alternativas para resolver el problema identificado. Esto se logra mediante la evaluación de una serie de criterios (económicos, técnicos, entre otros) y alternativas. El análisis de factibilidad constituye una fase indispensable en el desarrollo del proyecto (PMI, 2013; Pressman, 2010). En este análisis intervienen generalmente un grupo multidisciplinario de expertos. El análisis de factibilidad es el paso más importante antes de aprobar el proyecto.

Las principales escuelas de gestión de proyectos (ISO 21500, 2012; PMBOK [PMI, 2013]; CMMI [SEI, 2010]; IPMA, 2015; PRINCE2 [OGC, 2009]) suponen que se haya realizado con anterioridad el análisis de factibilidad. Este elemento motiva la necesidad

de formular métodos que establezcan con claridad y pertinencia, la forma de realizar estos análisis.

El proceso de análisis de factibilidad tiene analogía con un clásico problema de toma de decisiones, que inicia cuando se detecta una situación y termina cuando se elige una alternativa (entre varias) que soluciona el problema (Burstein y Holsapple, 2008).

Para realizar estos análisis a criterios cualitativos, generalmente se utilizan métodos tradicionales de toma de decisiones (Cables, García y Lamata, 2012; Chen, Hung y Cheng, 2011), dentro de los más referenciados, se encuentra: el *proceso de análisis jerárquico* (AHP) (Saaty, T., 2003; Saaty, T.L., 1990), pero este método no trabaja la pérdida de información. Seleccionar correctamente los criterios a evaluar y el método adecuado para realizarlo garantiza en gran medida el éxito del análisis de factibilidad.

Al realizar valoraciones, en los métodos tradicionales, se depende en gran medida de la experiencia de los evaluadores, lo cual puede producir ruido e imprecisiones en los datos de entrada al proceso. Estas situaciones provocan que con frecuencia en el análisis de factibilidad no se pueda estimar con una precisión aceptable la posibilidad de éxito o fracaso de los proyectos. Es necesario seleccionar métodos de evaluación que faciliten a los expertos emitir sus opiniones en diferentes dominios, que consideren la naturaleza cualitativa y cuantitativa de los criterios y la incertidumbre del entorno. Para manejar la incertidumbre, los investigadores han utilizado diferentes técnicas de *soft computing* en contextos diversos (Bermúdez, Lugo y Piñero, 2015; Bolaños y Correa, 2014; Melo y Cortés, 2016; Novoa, Cruz y Pelta, 2014; Wang y Tang, 2015).

Como contribución para solucionar las limitaciones anteriores, este trabajo tiene como objetivo proponer un método para el análisis de factibilidad de criterios sociales, técnicos y comerciales de proyectos de *software* que considere la incertidumbre de la información. El método trata el análisis de factibilidad como un problema de toma de decisiones multiexperto y multicriterio en entornos de incertidumbre. Se utiliza el paradigma de la computación con palabras (CWW) (Zadeh, 1996)

considerando las ventajas que ofrece para resolver problemas similares en otras áreas (Arza, 2013; Rodríguez, 2010; Torres, 2015; Zulueta, 2014).

Estos trabajos presentan modelos basados en toma de decisión lingüística aplicados a áreas como la evaluación de competencias laborales (Torres, 2015) y la recomendación de roles en equipos de software (Arza, 2013). Particularmente en Zuleta (2014) se proponen modelos basados en toma de decisión lingüística con información heterogénea para evaluar la importancia del impacto ambiental. A pesar de su utilidad, estos trabajos tienen características muy específicas de sus áreas de aplicación que limitan su aplicación inmediata a los análisis de factibilidad de proyectos de *software*. En contraste con esos trabajos, el método que aquí se propone comprende la utilización de una amplia selección de criterios técnicos, comerciales y sociales previamente recopilados y redefinidos en Peña (2012). Además, se emplea la matriz de comparación por pares del método AHP para el proceso de pesado de los criterios.

En este documento, la siguiente sección fundamenta las actividades del método propuesto. Luego se presenta una síntesis de su aplicación de manera experimental a tres proyectos. Finalmente se exponen las conclusiones y referencias bibliográficas.

## METODOLOGÍA

### Método para análisis de factibilidad basado en 2-Tuplas

La aplicación de la CWW en el análisis de factibilidad de proyectos de *software* facilita operar con palabras o sentencias definidas en lenguaje natural, que pueden ser instanciadas por números, simulando el proceso cognitivo humano. Esta metodología permite fortalecer modelos de decisión en los que la información presenta imprecisión y vaguedad (Herrera, Alonso, Chiclana y Herrera-Viedma, 2009), representándose mediante variables lingüísticas.



Se selecciona el modelo lingüístico basado en 2-tupla (Herrera y Martínez, 2000), debido a que supera la pérdida de la información que se produce en la agregación de modelos anteriores. Este modelo intenta mejorar el modelo simbólico clásico (Delgado, Verdegay y Vila, 1993), del enfoque lingüístico difuso. El modelo se ha utilizado satisfactoriamente para tratar información: lingüística multigranular (Herrera y Martínez, 2001), lingüística no balanceada (Herrera, Herrera-Viedma y Martínez, 2008) y heterogénea (Herrera, Martínez y Sánchez, 2005).

El proceso de análisis de factibilidad que se propone se estructura en dos fases: iniciación y evaluación. En la primera se desarrollan las actividades de preparación para la evaluación. Luego empleando 2-tupla se evalúa la factibilidad de los proyectos. Con el método se puede analizar uno o varios proyectos durante una misma evaluación. Como resultado final arroja un listado ordenado de varios proyectos según su valor de factibilidad. La figura 1 muestra el flujo de actividades en cada fase; seguidamente se describen los detalles de cada actividad.

### Fase de iniciación

En esta fase se recopila la información necesaria para evaluar los proyectos. En ella se ejecutan las siguientes actividades:

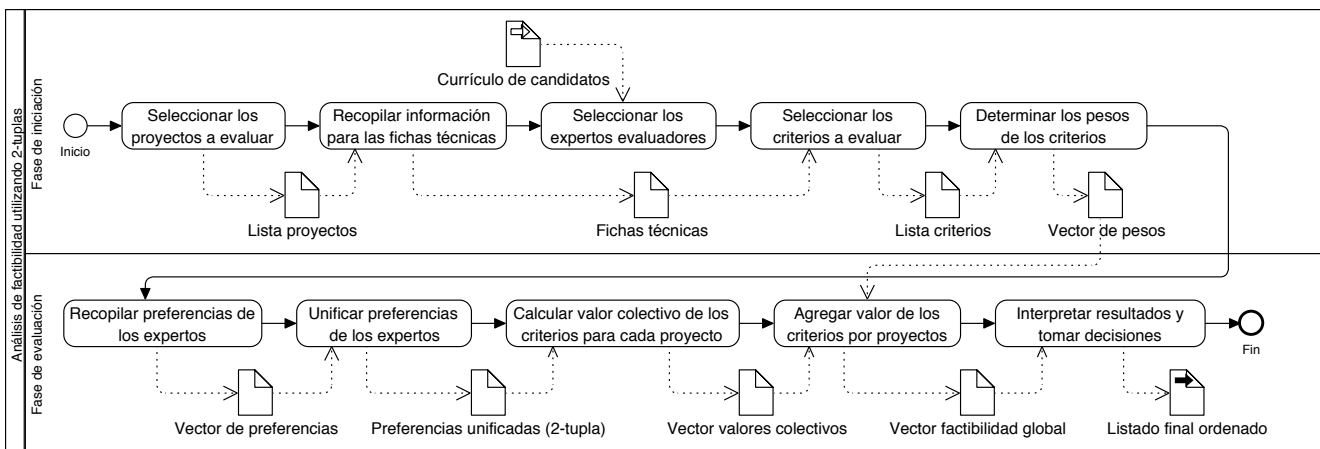
*Actividad 1:* Seleccionar el conjunto de proyectos  $P = \{p_j \mid j \in (1, \dots, n)\}$ , a los cuales se les realiza el análisis.

*Actividad 2:* Recopilar información de los proyectos a evaluar para obtener una ficha técnica más detallada que contenga las especificidades técnicas, comerciales y sociales de los proyectos.

*Actividad 3:* Seleccionar el conjunto de expertos  $E = \{e_i \mid i \in (1, \dots, m)\}$  que participarán en la evaluación, mediante el análisis de la síntesis curricular, de forma similar a como se propone en Trujillo (2014).

*Actividad 4:* Seleccionar mediante el método grupo focal (Balcázar, González, Gurrola y Moysén, 2015) el conjunto de criterios  $C = \{c_k \mid k \in (1, \dots, p)\}$  técnicos, comerciales y sociales a evaluar, partiendo de un listado previamente definido en Peña (2012).

*Actividad 5:* Determinar los pesos de los criterios. Para esto se utiliza la matriz de comparación por pares para elementos de un mismo nivel del método *proceso de análisis jerárquico* (AHP) (Saaty, T.L., 1990). Los expertos a través de juicio comparativo ordenan los criterios. Luego se utiliza el promedio geométrico para combinar las valoraciones. Por último, se obtiene un vector de prioridad  $W^c = (w_i^c \mid i \in (1, \dots, p))$ ,  $w_i^c \in [0,1]$  que cumple la



**Figura 1.** Diagrama de actividades del método propuesto

**Fuente:** elaboración propia.

propiedad  $\sum_{i=1}^p w_i^c = 1$ , conforme a como se utiliza en Rodríguez (2010) y Zuleta (2014).

En la tabla 1 se ofrece una vista de la recopilación de los pesos y el resultado de la agregación.

**Tabla 1.** Recopilación de los pesos y valor final del peso para cada criterio

Criterios	Expertos				Peso final del criterio
	e <sub>1</sub>	e <sub>2</sub>	...	e <sub>m</sub>	
c <sub>1</sub>	w <sub>e<sub>1</sub></sub> <sup>c<sub>1</sub></sup>	w <sub>e<sub>2</sub></sub> <sup>c<sub>1</sub></sup>	...	w <sub>e<sub>m</sub></sub> <sup>c<sub>1</sub></sup>	w <sub>c<sub>1</sub></sub>
c <sub>2</sub>	w <sub>e<sub>1</sub></sub> <sup>c<sub>2</sub></sup>	w <sub>e<sub>2</sub></sub> <sup>c<sub>2</sub></sup>	...	w <sub>e<sub>m</sub></sub> <sup>c<sub>2</sub></sup>	w <sub>c<sub>2</sub></sub>

Fuente: elaboración propia.

Una vez realizadas todas las actividades antes expuestas se procede a la fase de evaluación.

### Fase de evaluación

La evaluación es la fase principal del proceso, ya que el resultado final de esta son los proyectos evaluados por su grado de factibilidad obtenido a partir de la aplicación del modelo de CWW 2-tuplas. Aquí se realizan las siguientes actividades:

#### Actividad 1: Recopilar las preferencias de los expertos

Para expresar las valoraciones de los expertos se define el vector de preferencias  $X = (x_j^{k1}, \dots, x_n^{pm})$ , donde  $x_j^{ki}$  indica la opinión del experto  $e_i$  sobre el proyecto  $p_j$  de acuerdo con el criterio  $c_k$ . Los expertos podrán emitir sus preferencias a través de diferentes dominios de información. La utilización de uno u otro estará condicionada por: la naturaleza de los criterios a evaluar, su pertenencia a diferentes áreas de conocimientos y su nivel de conocimiento sobre el problema. Dadas las características del análisis de factibilidad, donde es aconsejable que participen equipos multidisciplinares, se propone en este trabajo el uso de los dominios numérico (N), intervalar (I) y lingüístico (S), que se especifican a continuación, para expresar las preferencias.

- Valores numéricos:  $x_j^{ki} = v_j^{ki} \in [1,5]$ .
- Valores intervalares:  $x_j^{ki} = I([0,1]) = [a_j^{ki}, b_j^{ki}]$  con  $a_j^{ki}, b_j^{ki} \in [0,1]$  y  $a_j^{ki} \leq b_j^{ki}$ .
- Valores lingüísticos:  $x_j^{ki} = s_j^{ki} \in S = \{S_0, \dots, S_g\}$ , donde  $g+1$  representa la cardinalidad del conjunto de términos lingüísticos (CTL)  $S$ . Cada uno de estos  $S_i \in S$  tiene asociada una función de pertenencia  $\mu_{S_i}(y), y \in [0,1]$ .

En la tabla 2 se ofrece una vista de la estructura del vector  $X$  y la información que contiene.

**Tabla 2.** Vectores de preferencia de los expertos

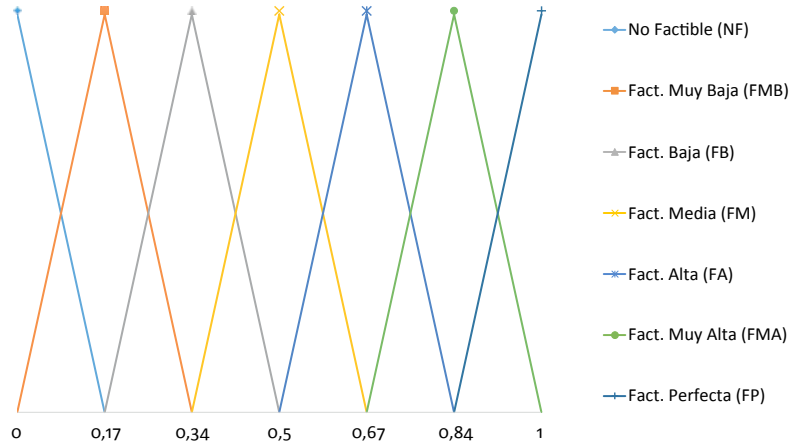
Proyectos	Criterios	Expertos		
		e <sub>1</sub>	...	e <sub>m</sub>
P <sub>j</sub>	c <sub>1</sub>	x <sub>j</sub> <sup>11</sup>	...	x <sub>j</sub> <sup>1m</sup>
	...	...	...	...
	c <sub>k</sub>	x <sub>j</sub> <sup>k1</sup>	...	x <sub>j</sub> <sup>km</sup>

Fuente: elaboración propia.

#### Actividad 2: Unificar las preferencias de los expertos según el dominio lingüístico

Dada la naturaleza heterogénea de las preferencias emitidas, es necesario transformarlas a un único dominio. Para ello se utiliza el dominio lingüístico, siguiendo lo propuesto por Herrera, Martínez y Sánchez (2005). Como conjunto básico de términos lingüísticos (CBTL) se propone a  $S_T = \{NF, FMB, FB, FM, FA, FMA, FP\}$  cuya semántica se muestra en la figura 2.

Para realizar la unificación al dominio lingüístico es necesario representar las valoraciones de los expertos en el CBTL, por lo que cada valor de entrada se transforma en un conjunto difuso  $F(S_T)$ . Esta conversión se realiza mediante funciones específicas según el dominio en que originalmente está expresado el valor. La conversión sigue un proceso de comparación entre conjuntos difusos utilizando en este trabajo medidas de semejanza (Bouchon-Meunier, Rifqi y Bothorel, 1996).



**Figura 2.** Conjunto básico de términos lingüísticos de siete etiquetas con su semántica asociada

**Fuente:** elaboración propia.

- Para transformar  $T_{NST}$  del dominio numérico al lingüístico se emplea la definición dada por Herrera, Martínez y Sánchez (2005) que se formaliza en las ecuaciones (1), (2) y (3).

$$T_{NST}: [0,1] \rightarrow F(S_T) \quad (1)$$

$$T_{NST}(N) = \{(S_0, \gamma_0), \dots, (S_g, \gamma_g)\}, S_i \in S_T \text{ y } \gamma_i \in [0,1] \quad (2)$$

$$\gamma_i = \mu_{S_i}(N) = \begin{cases} 0, & N < a \text{ ó } N > c \\ \frac{N - a}{b - a}, & a < N < b \\ 1, & b \leq N \leq d \\ \frac{c - N}{c - d}, & d < N < c \end{cases} \quad (3)$$

Donde  $F(S_T)$  es un conjunto difuso de los definidos en  $S_T = \{S_0, \dots, S_g\}$ . De manera que al transformar el valor numérico 0,60 a un conjunto del CBTL de la figura 2 se obtendría:

$$T_{NST}(0,60) = \{(S_0; 0), (S_1; 0), (S_2; 0), (S_3; 0,41), (S_4; 0,59), (S_5; 0), (S_6; 0)\}$$

- Para transformar ( $T_{IST}$ ) la información intervalar se utiliza la definición correspondiente dada por Herrera, Martínez y Sánchez (2005) y que se expresa en las ecuaciones (4), (5) y (6).

$$T_{IST}: I \rightarrow F(S_T) \quad (4)$$

$$T_{IST}(I) = \{(S_k, \gamma_k^i) / k \in \{0, \dots, g\}\} \quad (5)$$

$$\gamma_k^i = \max_y \min\{\mu_l(y), \mu_{S_k}(y)\} \quad (6)$$

Donde  $F(S_T)$  es el conjunto definido en  $S_T = \{S_0, \dots, S_g\}$ , y  $\mu_l(\cdot)$  y  $\mu_{S_k}(\cdot)$  y son las funciones de pertenencia asociadas con el intervalo  $I$  y el término  $S_k$  respectivamente. De manera que al transformar el intervalo  $[0,45; 0,60]$  a un conjunto del CBTL de la figura 2 se obtendría:

$$T_{IST}([0,45; 0,60]) = \{(S_0; 0), (S_1; 0), (S_2; 0,31), (S_3; 1,00), (S_4; 0,59), (S_5; 0), (S_6; 0)\}$$

- Para transformar ( $T_{SST}$ ) la información lingüística se recurre a la definición dada al efecto por Herrera, Martínez y Sánchez (2005) y que se describe en las ecuaciones (7), (8) y (9).

$$T_{SST}: S \rightarrow F(S_T) \quad (7)$$

$$T_{SST}(l_i) = \{(S_k, \gamma_k^i) / k \in \{0, \dots, g\}\} \forall l_i \in S \quad (8)$$

$$\gamma_k^i = \max_y \min\{\mu_{l_i}(y), \mu_{S_k}(y)\} \quad (9)$$

Donde  $S_T = \{S_0, \dots, S_g\}$  y  $S = \{l_0, \dots, l_p\}$  son dos conjuntos difusos tal que  $g \geq p$ ,  $F(S_T)$  es el conjunto definido en, y  $\mu_{l_i}(\cdot)$  y  $\mu_{S_k}(\cdot)$  y son las funciones de pertenencia asociadas con los

$$T_{SS_T}(l_i) = \{(S_0; 0,39), (S_1; 0,85), (S_2; 0,85), (S_3; 0,39), (S_4; 0), (S_5; 0), (S_6; 0)\}$$

Luego de convertidas las preferencias de los expertos a conjuntos difusos, estos conjuntos deben ser transformados a 2-tuplas lingüísticas del CBTL definido anteriormente. Considerando las definiciones de traslación simbólica y 2-tuplas dadas por Herrera y Martínez (2000), se utilizará como función de transformación la propuesta por Martínez y Herrera (2012) y que se define según la ecuación (10).

$$X(\{(S_0; 0), (S_1; 0), (S_2; 0), (S_3; 0,41), (S_4; 0,59), (S_5; 0), (S_6; 0)\}) = X\left(\frac{3 \times 0,41 + 4 \times 0,59}{0,41 + 0,59}\right) = \Delta(3,59) = (S_4; 0,41) = (FMA; 0,41)$$

*Actividad 3: Calcular el valor colectivo de cada criterio para cada proyecto*

En este punto se tienen todas las preferencias de los expertos transformadas en 2-tuplas lingüísticas, tal como se presenta en la tabla 3.

**Tabla 3.** Preferencias unificadas en 2-tuplas lingüísticas

Proyectos	Criterios	Expertos		
		$e_1$	...	$e_m$
$P_j$	$c_1$	$(s_a, \alpha_a)_j^{11}$	...	$(s_a, \alpha_a)_j^{1m}$
	...	...	...	...
	$c_k$	$(s_a, \alpha_a)_j^{k1}$	...	$(s_a, \alpha_a)_j^{km}$

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 4.** Valores colectivos de los criterios y evaluación global de los proyectos

Proyectos	Criterios	Expertos			Valores colectivos de los criterios	Evaluación de los proyectos (factibilidad, precisión)
		$e_1$	...	$e_m$		
$P_j$	$c_j$	$(s_a, \alpha_a)_j^{11}$	...	$(s_a, \alpha_a)_j^{1m}$	$(s_b, \alpha_b)_j^1$	$(s_c, \alpha_c)_j$
	...	...	...	...	...	
	$c_k$	$(s_a, \alpha_a)_j^{k1}$	...	$(s_a, \alpha_a)_j^{km}$	$(s_b, \alpha_b)_j^k$	

Fuente: elaboración propia.

términos  $l_i$  y  $S_k$  respectivamente. De manera que al transformar el conjunto  $l_i = (0; 0,25; 0,5)$  a un conjunto del CBTL de la figura 2 se obtendría:

$$X(F(S_T)) = \Delta\left(\frac{\sum_{j=0}^g j\gamma_j}{\sum_{j=0}^g \gamma_j}\right) = \Delta(\beta) = (S, \alpha) \quad (10)$$

Por lo que en el caso que se mostró arriba para ejemplificar la unificación del dominio numérico al lingüístico, el resultado de la transformación a 2-tuplas sería:

Para calcular el valor colectivo de cada criterio para cada proyecto, considerando las preferencias brindadas por los expertos se utilizará el operador *media aritmética extendida* (Herrera y Martínez, 2000), que significa el punto de equilibrio del conjunto de valores y que se formaliza en la ecuación (11).

$$\Phi(x) = \Delta\left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta^{-1}((S_i, \alpha_i))\right) = \Delta\left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \beta_i\right) \quad (11)$$

*Actividad 4: Agregar el valor de los criterios para cada proyecto*

Luego de la actividad 3, se tiene la 2-tupla lingüística que simboliza el valor medio de cada criterio para cada proyecto y la precisión de esa información, como se muestra en la columna "Valores colectivos de los criterios" de la tabla 4.

Para agregar el valor de los criterios de cada proyecto, se utiliza el operador *media ponderada extendida* (Herrera y Martínez, 2000), el cual permite agrupar los valores de los criterios considerando sus diferentes pesos. Los pesos se definen en la actividad 5 de la fase de iniciación. La agregación mediante este operador se formaliza en la ecuación (12).

$$\Psi(x) = \Delta \left( \frac{\sum_{i=1}^m w_i \Delta^{-1}((S_i, \alpha_i))}{\sum_{i=1}^m w_i} \right) = \Delta \left( \frac{\sum_{i=1}^m w_i \beta_i}{\sum_{i=1}^m w_i} \right) \quad (12)$$

Como resultado de esta actividad se obtiene la 2-tupla que representa el valor de factibilidad de cada proyecto y la precisión de esa información, tal y como se muestra en la última columna de la tabla 4. La 2-tupla que representa la factibilidad de cada proyecto, contiene el término lingüístico correspondiente y la precisión de esa evaluación. La precisión es un valor entre [-0.5, 0.5] que indica la distancia entre el punto de máxima pertenencia al término lingüístico y el resultado de la agregación. Utilizando el valor de precisión es posible determinar la certeza de la factibilidad calculada para cada proyecto.

#### Actividad 5: Interpretar los resultados y tomar las decisiones

Una vez que se tienen los valores colectivos de cada uno de los criterios y la evaluación final (global) de los proyectos, se está en condiciones de analizarlos y tomar las decisiones apropiadas. Esa información puede ser analizada de diferentes maneras de acuerdo con la naturaleza de los proyectos y a las condiciones actuales de la entidad desarrolladora. Para realizar el análisis se utilizarán los operadores de comparación para 2-tuplas definidos en Herrera y Martínez (2000) y que plantean que para las 2-tuplas  $(s_k, \alpha_1)$  y  $(s_l, \alpha_2)$  que representan dos valoraciones:

- Si  $k > l$  entonces  $(s_k, \alpha_1) > (s_l, \alpha_2)$
- Si  $k < l$  entonces  $(s_k, \alpha_1) < (s_l, \alpha_2)$
- Si  $k = l$  entonces:
  - Si  $\alpha_1 = \alpha_2$  entonces  $(s_k, \alpha_1) = (s_l, \alpha_2)$
  - Si  $\alpha_1 < \alpha_2$  entonces  $(s_k, \alpha_1) < (s_l, \alpha_2)$
  - Si  $\alpha_1 > \alpha_2$  entonces  $(s_k, \alpha_1) > (s_l, \alpha_2)$

Con estos operadores es posible ordenar los proyectos considerando su evaluación global o analizarlos según alguno de los criterios evaluados. Esto ofrece algunas variantes para la toma de decisiones, como:

- Seleccionar los proyectos considerando solo su factibilidad total (global).
- Si dos proyectos tienen el mismo resultado de factibilidad global, podrá aumentarse el nivel de detalles ordenándolos según alguno de los criterios analizados.
- Es posible decidir sobre cada proyecto de manera individual, basando el análisis para cada uno, en los criterios más relevantes según su naturaleza y considerando además las condiciones actuales y planes futuros de la organización desarrolladora. Esto permite analizar al mismo tiempo proyectos con características diferentes en cuanto a los criterios analizados y contemplar otros elementos como: duración, costos, riesgos, etc.

## SÍNTESIS DE APLICACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO

Para mostrar la aplicación práctica del método propuesto para realizar análisis de factibilidad de proyectos de *software*, se desarrolla un ejemplo ilustrativo aplicado a un entorno de desarrollo de *software* en la Universidad de las Ciencias Informáticas de Cuba.

Dentro de la fase de iniciación, primeramente se seleccionaron tres proyectos  $P = \{p_1, p_2, p_3\}$  de los que se tienen los resultados reales del análisis de factibilidad que se le hizo antes de su inicio. Toda la información disponible de cada proyecto se encuentra en la herramienta informática Xedro-GESPRO (Piñero, Torres e Izquierdo, 2013) que emplea la institución para gestionar sus proyectos. En este acápite solo se presenta una breve descripción sobre estos:

$p_1$ : Tiene como objetivo informatizar todos los procesos aduanales del país, aprovechando el desarrollo de las tecnologías que se están llevando a cabo en estos momentos como apoyo para el

control de los mismos. Es una solución web desarrollada sobre tecnologías libres.

$p_2$ : Tiene como objetivo informatizar un sistema penitenciario para apoyar los procesos de control, tratamiento y atención a los internos en los establecimientos penitenciarios; así como los de todos los niveles de mando. Incluido el diseño de un almacén de datos. La propuesta de solución está basada en una aplicación web.

$P_3$ : Tiene como objetivo diagnosticar del estado actual de una empresa en las dimensiones de la arquitectura empresarial para conocer las principales debilidades y oportunidades existentes, determinar el estado deseado y los estados intermedios para alcanzarlo.

Considerando las características de los proyectos a evaluar se analizó la síntesis curricular de un grupo de expertos candidatos, seleccionando

finalmente un grupo  $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6\}$  de seis expertos que presenta las siguientes características:

- El 50 % forma parte del claustro del programa de Maestría en Gestión de Proyectos Informáticos, acreditada de excelencia en 2015.
- El 83 % se ha desempeñado durante cinco años o más en equipos de proyectos informáticos.
- El 100 % se ha desempeñado como líder de equipos de proyecto.

Siguiendo el método *grupo focal* se seleccionaron diez criterios (tabla 5) a partir de criterios definidos previamente en Peña (2012). Luego, los seis expertos asignaron pesos a los criterios según el nivel de importancia que le concedieron. El peso final de cada criterio es el que se presenta en la columna “peso” de la tabla 5.

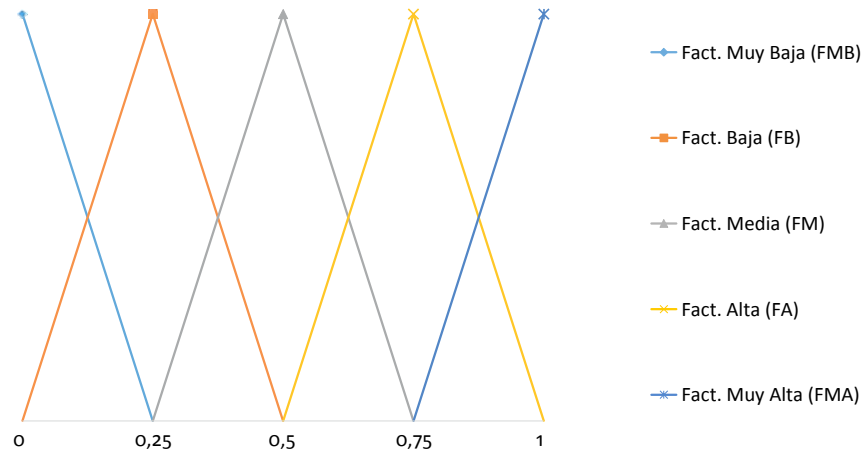
**Tabla 5.** Criterios utilizados para la evaluación (clasificación, descripción y peso)

Clasif.	Criterios	Descripción	Peso
Técnicos	$c_1$ : Especificaciones técnicas de hardware	Dentro de este criterio se considera: • Hardware existente en la organización. • Necesidad de compra de hardware (licencias, patentes, soporte de hardware)	0,1
	$c_2$ : Especificaciones técnicas de software	Dentro de este criterio se considera: • Herramientas de software existentes. • Necesidad de producir herramientas. • Necesidad de comprar herramientas (privativas, libres, restricciones o políticas de la empresa). • Soporte de software. • Reutilización de componentes.	0,2
	$c_3$ : Plataforma tecnológica	Dentro de este criterio se considera: • Confidencialidad. • Integridad. • Disponibilidad. • Conexión con otros sistemas de información. • Acceso a medios de respaldo.	0,2
Comerciales	$c_4$ : Nivel de especialización del equipo de desarrollo	Grado de especialización del equipo de desarrollo en las diferentes áreas del conocimiento.	0,1
	$c_5$ : Grado de comercialización en el mercado	Nivel máximo al que puede ser comercializado el producto en el mercado.	0,05
	$c_6$ : Consumidores potenciales	Clientes identificados que desean el producto.	0,03
	$c_7$ : Productos similares	Los productos similares que existan en el mercado.	0,05
Sociales	$c_8$ : Impacto en la sociedad	Nivel de impacto en la sociedad o localidad donde se aplique.	0,1
	$c_9$ : Número de personas beneficiadas	Cantidad de beneficiados.	0,1
	$c_{10}$ : Solución de un problema social	Soluciona o no un problema social de la localidad o el país.	0,07

**Fuente:** elaboración propia.

En la fase de evaluación los seis expertos procedieron a emitir sus preferencias de manera heterogénea. Los expertos  $\{e_1, e_3, e_4, e_6\}$  utilizaron el dominio lingüístico auxiliándose del CTL de cinco términos que se muestran en la figura 3. Mientras

que el experto  $\{e_2\}$  utilizó una escala numérica entre 1 y 5. Por su parte, el experto  $\{e_5\}$  empleó un dominio intervalar acotado entre  $[0,0; 1,0]$ . Las preferencias recopiladas sobre los tres proyectos se muestran en la tabla 6.



**Figura 3.** Conjunto de términos lingüísticos utilizados por los expertos  $\{e_1, e_3, e_4, e_6\}$  en la evaluación.

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 6.** Preferencias de los expertos emitidas en los tres dominios

Proyectos	Criterios	Expertos					
		$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$	$e_5$	$e_6$
$P_1$	$c_1$	A	5	MA	A	$[0,81; 1]$	A
	$c_2$	MA	5	M	MA	$[0,81; 1]$	A
	$c_3$	A	4	MA	MA	$[0,81; 1]$	A
	$c_4$	A	4	A	MA	$[0,81; 1]$	M
	$c_5$	A	4	M	A	$[0,41; 0,60]$	MA
	$c_6$	M	4	M	M	$[0,41; 0,60]$	M
	$c_7$	M	3	M	M	$[0,21; 0,40]$	M
	$c_8$	A	5	A	MA	$[0,81; 1]$	A
	$c_9$	A	4	MA	A	$[0,41; 0,60]$	M
	$c_{10}$	A	5	A	A	$[0,81; 1]$	A
$P_2$	$c_1$	M	4	M	MA	$[0,61, 0,80]$	A
	$c_2$	B	5	A	M	$[0,41; 0,60]$	A
	$c_3$	M	4	A	A	$[0,41; 0,60]$	A
	$c_4$	A	5	M	M	$[0,81; 1]$	MA
	$c_5$	A	3	A	MA	$[0,41; 0,60]$	A
	$c_6$	B	4	B	B	$[0,21; 0,40]$	B
	$c_7$	M	3	M	M	$[0,21; 0,40]$	M
	$c_8$	MA	4	A	A	$[0,81; 1]$	MA
	$c_9$	MA	4	M	A	$[0,41; 0,60]$	M
	$c_{10}$	MA	5	MA	MA	$[0,81; 1]$	MA

Proyectos	Criterios	Expertos					
		$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$	$e_5$	$e_5$
$p_3$	$c_1$	B	3	M	MA	[0,41; 0,60]	B
	$c_2$	B	4	M	B	[0,21; 0,40]	A
	$c_3$	M	3	B	M	[0,41; 0,60]	M
	$c_4$	MA	4	A	M	[0,81; 1]	M
	$c_5$	A	4	M	A	[0,21; 0,40]	MA
	$c_6$	A	3	A	A	[0,21; 0,40]	A
	$c_7$	B	3	B	B	[0,21; 0,40]	B
	$c_8$	B	3	M	B	[0,41; 0,60]	B
	$c_9$	M	3	M	B	[0,21; 0,40]	B
	$c_{10}$	B	4	B	B	[0,41; 0,60]	B

Fuente: elaboración propia.

Luego las preferencias heterogéneas fueron unificadas sobre el dominio lingüístico, utilizando el CBTL de siete términos, propuesto en la

actividad 2 de la fase de evaluación (figura 2). El resultado de la unificación es el que se expone en la tabla 7.

Tabla 7. Preferencias unificadas en el dominio lingüístico (representadas en 2-tuplas)

Proyectos	Criterios	Expertos					
		$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$	$e_5$	$e_5$
$p_1$	$c_1$	(FMA; -0,5)	(FP; 0)	(FMA; 0,44)	(FMA; -0,5)	(FMA; 0,4)	(FMA; -0,5)
	$c_2$	(FMA; 0,44)	(FP; 0)	(FM; 0)	(FMA; 0,44)	(FMA; 0,4)	(FMA; -0,5)
	$c_3$	(FMA; -0,5)	(FMA; -0,5)	(FMA; 0,44)	(FMA; 0,44)	(FMA; 0,4)	(FMA; -0,5)
	$c_4$	(FMA; -0,5)	(FMA; -0,5)	(FMA; -0,5)	(FMA; 0,44)	(FMA; 0,4)	(FM; 0)
	$c_5$	(FMA; -0,5)	(FMA; -0,5)	(FM; 0)	(FMA; -0,5)	(FM; 0,02)	(FMA; 0,44)
	$c_6$	(FM; 0)	(FMA; -0,5)	(FM; 0)	(FM; 0)	(FM; 0,02)	(FM; 0)
	$c_7$	(FM; 0)	(FM; 0)	(FM; 0)	(FM; 0)	(FM; 0,02)	(FM; 0)
	$c_8$	(FMA; -0,5)	(FP; 0)	(FMA; -0,5)	(FMA; 0,44)	(FMA; 0,4)	(FMA; -0,5)
	$c_9$	(FMA; -0,5)	(FMA; -0,5)	(FMA; 0,44)	(FMA; -0,5)	(FM; 0,02)	(FM; 0)
	$c_{10}$	(FMA; -0,5)	(FP; 0)	(FMA; -0,5)	(FMA; -0,5)	(FMA; 0,4)	(FMA; -0,5)
$p_2$	$c_1$	(FM; 0)	(FMA; -0,5)	(FM; 0)	(FMA; 0,44)	(FA; 0,21)	(FMA; -0,5)
	$c_2$	(FB; -0,5)	(FP; 0)	(FMA; -0,5)	(FM; 0)	(FM; 0,02)	(FMA; -0,5)
	$c_3$	(FM; 0)	(FMA; -0,5)	(FMA; -0,5)	(FMA; -0,5)	(FM; 0,02)	(FMA; -0,5)
	$c_4$	(FMA; -0,5)	(FP; 0)	(FM; 0)	(FM; 0)	(FMA; 0,4)	(FMA; 0,44)
	$c_5$	(FMA; -0,5)	(FM; 0)	(FMA; -0,5)	(FMA; 0,44)	(FM; 0,02)	(FMA; -0,5)
	$c_6$	(FB; -0,5)	(FMA; -0,5)	(FB; -0,5)	(FB; -0,5)	(FB; -0,1)	(FB; -0,5)
	$c_7$	(FM; 0)	(FM; 0)	(FM; 0)	(FM; 0)	(FB; -0,1)	(FM; 0)
	$c_8$	(FMA; 0,44)	(FMA; -0,5)	(FMA; -0,5)	(FMA; -0,5)	(FMA; 0,4)	(FMA; 0,44)
	$c_9$	(FMA; 0,44)	(FMA; -0,5)	(FM; 0)	(FMA; -0,5)	(FM; 0,02)	(FM; 0)
	$c_{10}$	(FMA; 0,44)	(FP; 0)	(FMA; 0,44)	(FMA; 0,44)	(FMA; 0,4)	(FMA; 0,44)



Proyectos	Criterios	Expertos					
		$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$	$e_5$	$e_6$
$P_3$	$c_1$	(FB; -0,5)	(FM; 0)	(FM; 0)	(FMA; 0,44)	(FM; 0,02)	(FB; -0,5)
	$c_2$	(FB; -0,5)	(FMA; -0,5)	(FM; 0)	(FB; -0,5)	(FB; -0,1)	(FMA; -0,5)
	$c_3$	(FM; 0)	(FM; 0)	(FB; -0,5)	(FM; 0)	(FM; 0,02)	(FM; 0)
	$c_4$	(FMA; 0,44)	(FMA; -0,5)	(FMA; -0,5)	(FM; 0)	(FMA; 0,4)	(FM; 0)
	$c_5$	(FMA; -0,5)	(FMA; -0,5)	(FM; 0)	(FMA; -0,5)	(FB; -0,1)	(FMA; 0,44)
	$c_6$	(FMA; -0,5)	(FM; 0)	(FMA; -0,5)	(FMA; -0,5)	(FB; -0,1)	(FMA; -0,5)
	$c_7$	(FB; -0,5)	(FM; 0)	(FB; -0,5)	(FB; -0,5)	(FB; -0,1)	(FB; -0,5)
	$c_8$	(FB; -0,5)	(FM; 0)	(FM; 0)	(FB; -0,5)	(FM; 0,02)	(FB; -0,5)
	$c_9$	(FM; 0)	(FM; 0)	(FM; 0)	(FB; -0,5)	(FB; -0,1)	(FB; -0,5)
	$c_{10}$	(FB; -0,5)	(FMA; -0,5)	(FB; -0,5)	(FB; -0,5)	(FM; 0,02)	(FB; -0,5)

Fuente: elaboración propia.

Una vez unificadas las preferencias sobre el dominio lingüístico, se procedió a computar el valor colectivo (agregación) de cada criterio para cada proyecto. Para esta actividad se empleó el operador “media aritmética para 2-tuplas”. Los resultados de esta actividad se exponen en la columna

“valores colectivos de los criterios” de la tabla 8. Por último, utilizando el operador *media ponderada para 2-tuplas*, se calculó la factibilidad global de cada proyecto. Los valores obtenidos se ofrecen en la última columna de la tabla 8.

**Tabla 8.** Valores colectivos de los criterios y evaluación global de los proyectos

Proyectos	Criterios	Valores colectivos de los criterios	Evaluación de los proyectos (factibilidad, precisión)
$P_1$	$c_1$	(FMA; 0,06)	(FMA; -0,33)
	$c_2$	(FMA; -0,04)	
	$c_3$	(FMA; -0,03)	
	$c_4$	(FMA; -0,44)	
	$c_5$	(FA; 0,16)	
	$c_6$	(FM; 0,25)	
	$c_7$	(FM; 0)	
	$c_8$	(FMA; 0,06)	
	$c_9$	(FA; 0,16)	
	$c_{10}$	(FMA; -0,1)	
$P_2$	$c_1$	(FA; 0,11)	(FA; 0,38)
	$c_2$	(FA; -0,25)	
	$c_3$	(FP; -0,5)	
	$c_4$	(FMA; -0,05)	
	$c_5$	(FA; 0,16)	
	$c_6$	(FB; -0,07)	
	$c_7$	(FM; -0,32)	
	$c_8$	(FMA; -0,04)	
	$c_9$	(FA; -0,09)	
	$c_{10}$	(FP; 0,48)	

Proyectos	Criterios	Valores colectivos de los criterios	Evaluación de los proyectos (factibilidad, precisión)
$p_3$	$c_1$	(FM; -0,09)	(FM; -0,21)
	$c_2$	(FM; -0,32)	
	$c_3$	(FM; -0,25)	
	$c_4$	(FA; 0,3)	
	$c_5$	(FA; -0,16)	
	$c_6$	(FA; -0,32)	
	$c_7$	(FB; -0,32)	
	$c_8$	(FB; 0,25)	
	$c_9$	(FB; 0,18)	
	$c_{10}$	(FB; 0,25)	

Fuente: elaboración propia.

La información de la tabla 8, constituye el principal insumo para la toma de decisiones sobre los proyectos evaluados. Como se comentó anteriormente, esa información puede analizarse de diferentes maneras, según la naturaleza de los proyectos y las condiciones actuales de la entidad desarrolladora. Inicialmente sería razonable interpretar los

resultados de la evaluación global de los proyectos y, luego, si fuese necesario, refinar el análisis particularizando sobre algunos de los criterios. Para la comparación de las evaluaciones se emplearán los operadores de comparación para 2-tuplas.

Los resultados de la evaluación de los tres proyectos fueron:

$$\{p_1 = (FMA; -0,33), \quad p_2 = (FA; 0,38), \quad p_3 = (FM; -0,21)\} .$$

Al aplicar los operadores de comparación se puede observar que se cumple el que plantea: para las 2-tuplas  $(s_k, \alpha_1)$  y  $(s_l, \alpha_2)$  que representan dos valoraciones, si  $k > l$  entonces  $(s_k, \alpha_1) > (s_l, \alpha_2)$ . Por lo que, teniendo en cuenta la semántica del CBTL y los valores de la evaluación global,  $p_1$  es el proyecto más factible, mientras que  $p_3$  es el de menor factibilidad.

A partir de estos resultados, los decisores podrán tomar las medidas más apropiadas según los intereses y condiciones actuales de la organización, en cuanto a disponibilidad de recursos humanos y financieros. Como en este caso los tres proyectos resultaron ser factibles, la dirección de la organización podría aprobar los tres, si dispone de los recursos necesarios. Si, por el contrario, decide no ejecutar todos los proyectos, podría auxiliarse de otros elementos como el resultado individual de los criterios; o analizarlos agrupados según su clasificación en técnicos, comerciales y sociales. Cualquiera que sea la decisión sobre los proyectos a ejecutar,

el análisis individual de los criterios contribuye a identificar y gestionar los riesgos del proyecto.

### Comparación de resultados con el método AHP

Para comparar los resultados del método propuesto con los del método AHP, se ha evaluado la factibilidad de los proyectos con los mismos criterios y los mismos expertos, utilizando el método AHP. Como se observa en la tabla 9, el orden de factibilidad global de los proyectos coincide. No obstante, existen diferencias entre los resultados de los métodos que radican en:

- El método propuesto brinda como salida final una 2-tupla compuesta por un término lingüístico que indica el valor de factibilidad del proyecto y un valor numérico entre [-0,5; 0,5) que representa la precisión de ese resultado. Mientras que el AHP muestra un vector de prioridad global expresada en valores entre 0 y 1, donde mientras exista mayor cercanía a 1, el proyecto será más factible.

- El método propuesto permite emitir preferencias en diferentes dominios de expresión, mientras que el AHP limita a los expertos a utilizar una escala numérica definida por su autor (Saaty, T., 2003).
- El método propuesto permite evaluar tanto proyectos individuales como carteras de proyectos, mientras que el AHP, por ser un método para jerarquizar alternativas, no puede emplearse para evaluar proyectos individuales.

1. Facilidades para el análisis de factibilidad técnica.
2. Facilidades para el análisis de factibilidad social.
3. Facilidades para el análisis de factibilidad comercial.
4. Tratamiento de la incertidumbre de la información.
5. Tratamiento a la pérdida de información.
6. Permite modelado lingüístico.

**Tabla 9.** Comparación de resultados entre el método propuesto y el método AHP

Proyecto	Resultado método propuesto	Resultado con AHP
P1	(FMA;-0,33)	0,38
P2	(FA;0,38)	0,53
P3	(FM;-0,21)	0,09

Fuente: elaboración propia.

### Comparación cualitativa con otros modelos de evaluación de proyectos

Con el objetivo de comparar cualitativamente el método propuesto con algunos de los modelos de evaluación de proyecto, se seleccionan seis indicadores que cubren aspectos esenciales para afrontar un análisis de factibilidad con múltiples expertos y múltiples criterios, en condiciones de incertidumbre:

Como se evidencia en la tabla 10, el método propuesto permite el tratamiento a la incertidumbre de la información al igual que otros; sin embargo, el uso de la computación con palabras dota al modelo propuesto de mayores potencialidades para esto. El tratamiento a la pérdida de información es un elemento en el que supera al resto de los modelos. Las facilidades para evaluar los proyectos, a través de variables lingüísticas, brindan mayor flexibilidad a los expertos para emitir sus preferencias. Además, ha sido creado específicamente para brindar facilidades para realizar análisis de criterios técnicos, sociales y comerciales. La combinación del modelado lingüístico con el tratamiento a la incertidumbre de la información y la capacidad de evitar la pérdida de información durante la agregación, hacen del modelo propuesto una opción más integral que las restantes.

**Tabla 10.** Comparación cualitativa con otros modelos de evaluación de proyectos

Tipos de modelos	Modelos	Indicadores					
		1	2	3	4	5	6
Modelos basados en la experiencia	Tablas de decisión	No	No	No	No	No	Sí
	Árboles de decisión	No	No	No	No	No	Sí
	Criterios de expertos	Sí	No	Sí	Sí	No	Sí
Modelos matemáticos	Modelos comparativos	No	No	No	No	No	No
	Conteo de la dominancia	No	No	No	No	No	No
	Modelos de puntuación	Sí	No	Sí	Sí	No	No
Modelos de simulación		Sí	Sí	No	Sí	Sí	No
Modelos de programación matemática	Monoobjetivo	No	No	No	Sí	No	No
	Multiobjetivo	No	No	No	Sí	No	No
Modelos basado en clúster		No	No	No	No	No	No
Método propuesto en este trabajo		Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí

Fuente: elaboración propia.

## CONCLUSIONES

En la presente investigación se ha propuesto un método para realizar análisis de factibilidad de proyectos de *software* en entornos de incertidumbre. Como principales conclusiones se tienen las siguientes:

- Existe un alto índice de fracaso de proyectos informáticos, donde incide el aumento de los costos durante la ejecución; incumplimiento en los cronogramas pactados; deficiencias en la estimación de los tiempos y costos; entre otros. Los análisis de factibilidad pueden tributar al éxito de los proyectos.
- El análisis de factibilidad de proyectos de *software* constituyen un problema de toma de decisiones multiexperto y multicriterio, que se desarrolla en condiciones de incertidumbre.
- Dado el carácter multiexperto del análisis de factibilidad, debe brindarse la posibilidad de expresar valoraciones en diferentes dominios, que consideren la incertidumbre y la naturaleza de los criterios. El modelo de representación lingüístico basado en 2-tuplas, es una solución favorable para el tratamiento de la información heterogénea sin pérdida de información, como demandan los análisis de factibilidad.
- El modelo presentado para realizar análisis de factibilidad se divide en dos fases: iniciación y evaluación, y propone la aplicación del modelo de representación lingüístico basado en 2-tuplas con todas las actividades a realizar, así como las entradas y salidas del método.
- Para mostrar la utilidad práctica del método propuesto, se aplicó experimentalmente a una muestra de tres proyectos de la Universidad de las Ciencias Informáticas de Cuba. Los resultados de los tres proyectos fueron positivos, aunque con diferentes valores de factibilidad y precisión. La evaluación global arrojó que  $p_1$  es el proyecto más factible, mientras que  $p_3$  es el de menor factibilidad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arza, L. (2013). *Modelo computacional para la recomendación de roles en el proceso de ubicación*

*de estudiantes en la industria de software*. Tesis doctoral. La Habana: Universidad de las Ciencias Informáticas.

- Balcázar, P., González, N., Gurrola, G., & Moy-sén, A. (2015). Investigación Cualitativa. Toluca, México: Universidad Autónoma del Estado de México. Obtenido de <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/21589>, ISBN 968-835-947-5
- Bermúdez, A.; Lugo, J.A. y Piñero, P.Y. (2015). An Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System for Project Evaluation. *Ingeniería y Universidad*, 19(2), 299-313. doi:10.11144/Javeriana.iyu19-2.sdib
- Bolaños, R. y Correa, C. (2014). Planeamiento de la transmisión considerando seguridad e incertidumbre en la demanda empleando programación no lineal y técnicas evolutivas. *Revista Tecnura*, 18(39), 62-76.
- Bouchon-Meunier, B.; Rifqi, M. y Bothorel, S. (1996). Towards general measures of comparison of objects. *Fuzzy Sets and Systems*, 84(2), 143-153.
- Burstein, F. y Holsapple, C. (2008). *Handbook on Decision Support Systems 1*. Berlín: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Cables, E.; García, M.S. y Lamata, M. (2012). The LTOPSIS: An alternative to TOPSIS decision-making approach for linguistic variables. *Expert Systems with Applications*, 39(2), 2119-2126.
- Chen, C.T.; Hung, W.Z. y Cheng, H.L. (2011). Applying linguistic PROMETHEE method in investment portfolio decision-making. *International Journal of Electronic Business Management*, 9(2), 139-148.
- Delgado, M.; Verdegay, J. y Vila, M. (1993). On aggregation operations of linguistic labels. *International Journal of Intelligent Systems*, 8(3), 351-370.
- Herrera, F. y Martínez, L. (2000). A 2-tuple fuzzy linguistic representation model for computing with words. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 8(6), 746-752.
- Herrera, F. y Martínez, L. (2001). A model based on linguistic 2-tuples for dealing with multigranularity hierarchical linguistic contexts in multiexpert decision-making. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Part B: Cybernetics.*, 31(2), 227-234.

- Herrera, F.; Alonso, S.; Chiclana, F. y Herrera-Viedma, E. (2009). Computing with words in decision making: foundations, trends and prospects. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 8(4), 337-364.
- Herrera, F.; Herrera-Viedma, E. y Martínez, L. (2008). A fuzzy linguistic methodology to deal with unbalanced linguistic term sets. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 16(2), 354-370.
- Herrera, F.; Martínez, L. y Sánchez, P. (2005). Managing non-homogeneous information in group decision making. *European Journal of Operational Research*, (166), 115-132. doi:10.1016/j.ejor.2003.11.031
- International Project Management Association (IPMA) (2015). Standars. Recuperado el 20 de enero de 2015, de: <http://www.ipma.world/resources/standards>
- International Organization for Standardization ISO (2012). *ISO 21500 Guidance on project management*. Recuperado el 20 de enero de 2016, de: [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail?csnumber=50003](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=50003)
- Martínez, L. y Herrera, F. (2012). An overview on the 2-tuple linguistic model for computing with words in decision making: Extensions, applications and challenges. *Information Sciences*, 207(1), 1-18.
- Melo, J.A. y 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
- Novoa, P.; Cruz, C. y Pelta, D. (2014). Un estudio comparativo sobre la evolución diferencial auto-adaptativa en ambientes dinámicos. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 8(4), 86-99.
- Office of Government Commerce (OGC) (2009). *Managing Successful Projects with PRINCE2*. Londres: Renouf Pub Co Ltd.
- Peña, M. (2012). *Modelo para análisis de factibilidad en la evaluación de proyectos de software*. Tesis de maestría. La Habana: Universidad de las Ciencias Informáticas.
- Piñero Pérez, P.; Torres, S. e Izquierdo, M. (2013). GES-PRO Paquete para la gestión de proyectos. *Nueva Empresa*, 9(1), 45-53. La Habana: GECYT.
- Pressman, R.S. (2010). *Software Engineering: A Practitioner's Approach*. 7a. ed. Nueva York: McGraw-Hill.
- Project Management Institute (PMI) (2013). *Guía de los fundamentos para la gestión de proyectos*. 5a ed. Newtown Square, Pennsylvania.
- Rodríguez, R.M. (2010). *Un nuevo modelo para procesos de computación con palabras en toma de decisión lingüística*. Tesis doctoral. Jaén: Universidad de Jaén, Departamento de Informática.
- Saaty, T. (2003). *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process*. Pittsburgh: RWS Publications.
- Saaty, T.L. (1990). How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9-26.
- Software Engineering Institute (SEI) (2010). *CMMI for Dev v1.3*. Pittsburgh: Carnegie Mellon University.
- The Standish Group. (2015). *CHAOS Report*. Boston: The Standish Group.
- Torres, S. (2015). *Modelo de evaluación de competencias a partir de evidencias durante la gestión de proyectos*. Tesis doctoral. La Habana: Universidad de las Ciencias Informáticas.
- Trujillo, Y. (2014). *Modelo para valorar las organizaciones desarrolladoras de software al iniciar la mejora de procesos*. Tesis doctoral. La Habana: Universidad de las Ciencias Informáticas.
- Wang, W.P. y Tang, M.C. (2015). A Multi-criteria Assessment for R&D Innovation with Fuzzy Computing with Words. En: H.A. Le Thi, T.P. Dinh, N.T. (eds.). *Nguyen Modelling, Computation and Optimization in Information Systems and Management Sciences* (pp. 3-14). Metz, Francia: Springer International Publishing.
- Zadeh, L. (1996). Fuzzy logic = computing with words. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 4(2), 103-111.
- Zulueta, Y. (2014). *Modelos de evaluación de la importancia del impacto ambiental en contextos complejos bajo incertidumbre*. Tesis doctoral. Granada: Universidad de Granada, Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial.





## Impacto de la penetración de la energía solar fotovoltaica en sistemas de distribución: estudio bajo supuestos del contexto colombiano

### Impact of penetration of solar PV energy in distribution systems: case of study based on assumptions of the colombian context

Carlos Adrián Correa Flórez<sup>1</sup>, Geovanny Alberto Marulanda García<sup>2</sup>,  
Andrés Felipe Panesso Hernández<sup>3</sup>

**Fecha de recepción:** 4 de febrero de 2016

**Fecha de aceptación:** 10 de septiembre de 2016

**Cómo citar:** Correa F., C.A.; Marulanda G., G.A.; Panesso H., A.F. (2016). Impacto de la penetración de la energía solar fotovoltaica en sistemas de distribución: estudio bajo supuestos del contexto colombiano. *Revista Tecnura*, 20(50), 85-95. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a06

#### RESUMEN

**Contexto:** El presente artículo muestra un método de evaluación del impacto de la penetración de energía solar fotovoltaica sobre los sistemas de distribución. La evaluación considera la minimización del costo de pérdidas de energía para el período de vida útil de los Paneles Fotovoltaicos (PFV) e incluye el cálculo del valor presente de los costos totales por compra de energía, e inversión, operación y mantenimiento de los PFV.

**Método:** Los parámetros para la simulación se basan en estudios recientes en Colombia, con el fin de proponer alternativas más realistas. El problema de optimización se resuelve utilizando un algoritmo genético especializado y el método se prueba sobre el sistema de prueba de 37 nodos de la IEEE, modificado para incluir comportamiento de cargas residenciales e industriales.

**Resultados:** Se presenta gráficamente la disminución de las pérdidas en el sistema de prueba a medida que se incrementa el número de barras con PFV. Los nodos más alejados de la fuente de alimentación

son más atractivos para la ubicación de PFV en términos de inversión y costo total de la energía.

**Conclusiones:** Los resultados de la evaluación llevan a una reducción de las pérdidas técnicas en las líneas además de mostrar las ventajas del soporte local de potencia reactiva. Según el escenario se observa que es posible generar con PFV obteniendo un retorno de la inversión desde la óptica del operador como inversionista.

**Palabras clave:** Energía solar fotovoltaica, pérdidas de energía, algoritmo genético, sistemas de distribución.

#### ABSTRACT

**Context:** This article presents an evaluation method for penetration of solar photovoltaic energy in distribution systems. This evaluation considers cost minimization of energy losses during the lifetime of the solar photovoltaic panels and includes calculation of total costs of energy, and investment, operation and maintenance of the panels.

1 Ingeniero electricista, magíster en Ingeniería Eléctrica, estudiante de doctorado en MINES ParisTech, Sophia Antipolis, Francia. Contacto: [carlos-adrian.correa\\_florez@mines-paristech.fr](mailto:carlos-adrian.correa_florez@mines-paristech.fr)

2 Ingeniero electricista, magíster en Ingeniería Eléctrica, profesor del programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Contacto: [gemarulanda@unisalle.edu.co](mailto:gemarulanda@unisalle.edu.co)

3 Ingeniero electricista, magíster en Ingeniería Eléctrica, profesor del programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Contacto: [afpanesso@unisalle.edu.co](mailto:afpanesso@unisalle.edu.co)

**Method:** The parameters used in this study are based on recent studies in Colombia with the purpose of proposing more realistic alternatives. The optimization problem is solved using a specialized genetic algorithm and the method is tested on the IEEE 37-bus test-system modified, to include behavior of residential and industrial loads.

**Results:** Power losses in feeders are graphically presented as a relationship with the number of buses with photovoltaic panels. The farther buses from the power supply are more attractive for the location of

photovoltaic panels in terms of investment and total cost of energy.

**Conclusions:** Results of the evaluation presents a reduction of power losses in lines. In addition, it shows the advantages of local reactive power support. According to the scenario, it shows that it is possible to generate with photovoltaic panels obtaining an investment return from the perspective of the network operator and investor.

**Keywords:** Solar photovoltaic energy, genetic algorithm, energy losses.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos han sido objeto de importantes cambios en los últimos años en áreas asociadas a la regulación, operación y la planeación. Parte de estos cambios se deben al creciente interés por minimizar los impactos ambientales asociados a la generación de energía con combustibles fósiles. Este hecho ha motivado a diferentes sectores hacia el desarrollo y promoción de las energías renovables en diferentes etapas del sistema, como una de las soluciones para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero.

Una de estas alternativas es la generación distribuida (GD) basada en energías renovables, cuya filosofía es ubicar fuentes de energía más cercanas a los centros de consumo (Walling *et al.*, 2008). A través de esta alternativa no solamente se pueden obtener beneficios desde el punto de vista ambiental, sino que también se tienen beneficios técnicos y económicos, como: reducción de la energía transportada a través de la red de transmisión y la transformada en las subestaciones de distribución, aumento de la vida útil de los equipos, mejoramiento de los perfiles de tensión, reducción de pérdidas, reducción en las necesidades de expansión, control de inyección de reactivos, entre otros (Zobaa y Cecati, 2006).

Diferentes estudios han abordado la GD para cuantificar los beneficios en la red y las estrategias

de inclusión. Por ejemplo, en Sadeghi y Kalantar (2014) se presenta un modelo probabilístico para la inclusión de las variaciones de la energía de PFV, con el fin de reducir los costos de las pérdidas de energía, a través de un algoritmo genético continuo y se prueba sobre un sistema de nueve nodos. En Castillo (2011) se presenta una revisión de las barreras que dificultan la implementación de la GD en los sistemas eléctricos, lo que ha reducido la penetración esperada de estos elementos en las redes tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo.

Esmailian y Fadaeinedjad (2014) plantean un algoritmo híbrido heurístico-metaheurístico para minimizar las pérdidas de energía y a la vez realizar reconfiguración óptima del sistema. Una estrategia para reducir el costo total de operación de la red se muestra en (Nafisi, Farahani, Abyaneh y Abedi, 2015), también incorporando reconfiguración e incluyendo costos de pérdidas.

Por otro lado, Mahmoud, Yorino y Ahmed (2015) muestra un modelo para la ubicación de GD con el fin de minimizar las pérdidas de potencia. En general, entre las estrategias para reducción de pérdidas con GD se encuentran: programación lineal, flujo óptimo AC, metaheurísticas, programación multiobjetivo y análisis probabilístico (Keane *et al.*, 2013).

Es importante mencionar que a pesar de múltiples estudios que se han realizado en los últimos

años, no existe todavía una masificación importante de la GD como alternativa. Algunas de las barreras comunes para adoptar estos sistemas son: información insuficiente sobre escenarios reales para la implementación de algoritmos y efectuar un planeamiento adecuado, esquemas de costos con horizontes de tiempo limitados, incertidumbre en la generación y los costos asociados a las diferentes tecnologías, falta de incentivos para los agentes del mercado con el fin de promover la penetración de GD y marcos regulatorios insuficientes.

En el caso colombiano, las barreras mencionadas son evidentes, ya que la promoción de este tipo de alternativas es todavía insuficiente, o tal vez inexistente. Un primer esfuerzo importante en esta materia, se dio a través de la promulgación de la Ley 1715 de 2014, “por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional” (Congreso de la República de Colombia, 2014). Esta es una iniciativa de gran valor en el contexto del actual desarrollo de las energías renovables a nivel mundial y de la perspectiva de modernización de la red eléctrica hacia el uso eficiente de recursos renovables.

Aunque es todavía largo el camino por recorrer, se han realizado esfuerzos después de la promulgación de la ley, con el fin de sentar las bases de sus posteriores desarrollos y priorizar las áreas para promoción, desarrollo y regulación. Uno de estos esfuerzos es el documento de “Integración de las Energías Renovables No Convencionales en Colombia”, realizado por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) (UPME y BID, 2015). En dicho estudio, se realiza un análisis de las oportunidades de promoción de alternativas como la energía eólica, solar, biomasa y geotérmica, y las opciones para la promoción de soluciones en las zonas no interconectadas (ZNI).

Para cada alternativa se abordan los elementos que imposibilitan la implementación de proyectos y se analizan las diferentes alternativas bajo supuestos financieros. Para determinar la posibilidad

real de la puesta en marcha de diferentes propuestas, se analizan esquemas de incentivos en el marco de la Ley 1715 de 2014 y sus posteriores desarrollos.

Como resultado, se identifican –entre otras– oportunidades en torno al aprovechamiento eólico en La Guajira, el desarrollo de un mercado intradiario que tenga en cuenta la incertidumbre de energía eólica y solar, el esquema de medición neta como instrumento de promoción y la puesta en marcha de programas para energización de ZNI.

Uno de los aspectos que llaman la atención del estudio en mención es la necesidad de promover proyectos de energía solar fotovoltaica como alternativa de generación distribuida. En especial, se plantea que la ciudad de Bogotá posee la mayor capacidad instalable de PFV en techos, entre 22 ciudades de interés.

Esta conclusión motiva la realización de diferentes estudios y análisis que permitan allanar el camino hacia la implementación de estas alternativas, bajo escenarios reales y mediados por los incentivos adecuados y una regulación robusta.

Por lo anterior, se plantea el presente trabajo, en torno a la evaluación el impacto de los proyectos de PFV incorporando variables técnicas y económicas de acuerdo con la realidad del sistema eléctrico colombiano, el potencial en Bogotá y desde el punto de vista de un operador de red (OR). Con este estudio se pretende evaluar diferentes escenarios de penetración de GD por medio de PFV y cuantificar los costos asociados a los proyectos para el periodo de vida de dicha tecnología. Esta evaluación se realiza a través de la minimización del costo por medio de un algoritmo genético de Chu-Beasley (AGCB) y el análisis eléctrico de las alternativas utilizando un flujo de carga para sistemas de distribución. Posteriormente se determina la relación entre inversión en GD y las potenciales reducciones de compra de energía por parte de una empresa de distribución para cubrir demanda y pérdidas.



Las principales contribuciones del presente trabajo son las siguientes:

- Se presenta un análisis desde el punto de vista económico, teniendo en cuenta el comportamiento típico de la demanda para cada franja horaria.
- El sistema de prueba utilizado se modifica para reflejar la presencia de cargas residenciales e industriales.
- Se incorporan variables como: el incremento de los precios de la energía comprada en bolsa, el crecimiento de la carga, la inflación y los costos nivelados de energía (*levelized cost of energy*, LCOE,) para los PFV. Todos basados en el contexto colombiano.
- Los supuestos de penetración de energía solar se basan en recientes estudios del potencial para la ciudad de Bogotá, con el fin de hacer un estudio más realista.

El documento está estructurado de la siguiente forma: primero, se hace la formulación matemática del problema; después, se presenta el algoritmo de optimización utilizado. Seguidamente, se describen las pruebas y los resultados, y por último se presentan las conclusiones.

## FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Para enfrentar el problema del impacto de los PFV se deben incorporar variables técnicas y económicas. A continuación se explican las funciones de costo involucradas en el esquema propuesto.

$$C_E = \sum_{y=1}^{n_y} \frac{C_y}{(1+i)^y} \left[ 365 \sum_{t=1}^{24} \left( \sum_{l=1}^L R_l |I_{t,l,y}|^2 + \sum_{b=1}^{n_b} (D_{b,t,y} - P_{b,t}^{PV}) \right) \right] \quad (2)$$

En donde,  $n_b$  es el número de nodos,  $D_{b,t,y}$  es la demanda en el nodo  $b$ , franja  $t$  y año  $y$ , y  $P_{b,t}^{PV}$  es la potencia inyectada por el panel en el nodo  $b$  y franja  $t$ . Con esta expresión se encuentra el VPN de los costos en los que se incurre por

## Costo de pérdidas de energía

Para la evaluación del impacto sobre el costo total de las pérdidas de energía del sistema de distribución, se evalúa el valor presente neto (VPN) de las pérdidas para el horizonte de tiempo planteado, teniendo en cuenta las variaciones diarias de la carga. Su formulación matemática se presenta en la ecuación (1).

$$CP = \sum_{y=1}^{n_y} \frac{C_y}{(1+i)^y} \left[ 365 \sum_{t=1}^{24} \left( \sum_{l=1}^L R_l |I_{t,l,y}|^2 \right) \right] \quad (1)$$

En donde,  $y$ ,  $t$  y  $l$ , son los subíndices asociados al año de análisis, la franja horaria y el corredor del sistema, respectivamente.  $L$  y  $n_y$  son el número de corredores del sistema y la cantidad total de años, respectivamente. Además,  $C_y$ ,  $i$ ,  $R_l$  e  $I_{t,l,y}$  representan respectivamente, el costo de la energía en el año  $y$ , la inflación, la resistencia del tramo  $l$  y la corriente en el periodo  $t$ , el tramo  $l$  y el año  $y$ .

## Costo total de energía

Para incorporar los costos en los que incurre el OR con el fin de suplir la energía necesaria del alimentador primario, se consideran los costos asociados a la compra de energía durante el periodo considerado. Estos tienen como componentes la energía consumida por los usuarios y la energía que se pierde debido al efecto Joule. Dicho cálculo se realiza de acuerdo con la ecuación (2).

compra de energía. También se considera que el costo de la energía incrementa anualmente de acuerdo con proyecciones del mercado y las proyecciones de los precios de bolsa. La demanda a atender en cada nodo varía dependiendo

de la cantidad de generación que se pueda atender localmente por medio de los PFV. De esta forma, se disminuye la energía transportada por la red y por tanto se reducen las necesidades de compra por parte del OR.

### Costo de la inclusión de los PFV

Para determinar los costos asociados con los proyectos de PFV a nivel de distribución, se determinan las cantidades totales de energía inyectada a través de esta tecnología a lo largo de su periodo de vida y se encuentra su costo asociado a través del LCOE (IRENA, 2012), de acuerdo con la ecuación (3).

$$C_{PV} = 365 \times n_y \times LCOE \left( \sum_{t=1}^{24} \sum_{b=1}^{n_b} P_{b,t}^{PV} \right) \quad (3)$$

Es importante mencionar que el LCOE se obtiene a partir de un flujo de caja que tiene en cuenta el valor del dinero en el tiempo. Este análisis incorpora los costos de instalación, operación y mantenimiento, y en general, los costos asociados a la tecnología renovable a implementarse por el tiempo de vida útil y en función de la energía total generada en kWh, de acuerdo a lo presentado en UPME y BID (2015) e IRENA (2012).

Las restricciones del problema están dadas por las ecuaciones (4) a (10).

$$P_{b,t}^{PV} - D_{b,t,y} = \sum_{m \in \Omega_b} V_{b,t,y} V_{m,t,y} Y_{bm} \cos(\theta_{bm} - \delta_{b,t,y} + \delta_{m,t,y}) \quad (4)$$

$$Q_{b,t}^{PV} - QD_{b,t,y} = \sum_{m \in \Omega_b} V_{b,t,y} V_{m,t,y} Y_{bm} \sin(\theta_{bm} - \delta_{b,t,y} + \delta_{m,t,y}) \quad (5)$$

$$Q_{b,t}^{PV} = \sqrt{P_{b,max}^{PV^2} - P_{b,t}^{PV^2}} \quad (6)$$

$$\sum_{b=1}^{n_b} X_b \leq N_{GD} \quad (7)$$

$$P_{b,max}^{PV} = \beta \bar{D}_b^{base} \quad (8)$$

$$X_b \in \{0,1\} \quad (9)$$

$$t \in \{1,2, \dots, 24\}; y \in \{1,2, \dots, n_y\}; b \in \{1,2, \dots, n_b\} \quad (10)$$

Donde,  $V_{b,t,y}$  y  $\delta_{b,t,y}$  son la tensión y el ángulo en el nodo  $b$ , en la franja horaria  $t$  y el año  $y$ ;  $Y_{bm}$  y  $\theta_{bm}$  son la amplitud y el ángulo de la admitancia entre los nodos  $b$  y  $m$ ;  $Q_{b,t}^{PV}$  es la potencia reactiva de soporte que puede inyectar el inversor asociado al panel instalado en el nodo  $b$  y la franja  $t$ ;  $N_{GD}$  es el número máximo de nodos permitidos para la instalación de PFV;  $\beta$  es el porcentaje de penetración del PFV instalado en cada nodo con respecto a la demanda máxima;  $\bar{D}_b^{base}$  es la demanda máxima

en el nodo  $b$  en el año base;  $X_b$  es una variable binaria que indica si en el nodo  $b$  existe instalación de PFV.

Las restricciones (4) y (5) son las asociadas al flujo de carga. La restricción (6) indica la cantidad de potencia reactiva que puede ser inyectada a través del inversor asociado al PFV. El modelo resultante es del tipo *no lineal entero mixto* debido a la presencia de variables reales y enteras, y para su solución se emplea un algoritmo genético en

dos niveles. Un primer nivel que genera propuestas de instalación de PFV y un segundo nivel que determina el estado del sistema a través del flujo de carga, cuyos resultados sirven para determinar los valores de la función objetivo.

## ALGORITMO DE SOLUCIÓN

Para resolver el problema de optimización descrito en la sección anterior, se utiliza un AGCB (Correa, Bolaños y Garcés, 2012).

El algoritmo implementado en este trabajo tiene la ventaja de evaluar un solo descendiente por ciclo generacional e incluirlo en la población dependiendo de su calidad y diversidad con respecto al resto de individuos, acelerando el proceso de convergencia. La codificación utilizada es la decimal  $\{0,1\}$  para denotar instalación o ausencia de PFV en un nodo determinado.

A continuación se explican, de manera resumida, los pasos del algoritmo implementado.

### Verificación de diversidad

La población inicial se genera de manera aleatoria. Con el fin de ubicar esta población en diferentes lugares del espacio de solución se realiza una modificación de los bits similares entre cada individuo. Esto garantiza que cada solución generada en el ciclo inicial difiera en un número mínimo de bits.

### Selección, cruzamiento y mutación

En esta etapa se utiliza la selección por torneo. Se realizan dos torneos cada uno con un número variable de padres, de tal manera que resulten dos padres. Un número alto de padres prioriza el elitismo y viceversa.

El cruzamiento se hace de manera tradicional, siguiendo la lógica de punto simple. En la etapa de mutación se modifica un bit seleccionado aleatoriamente.

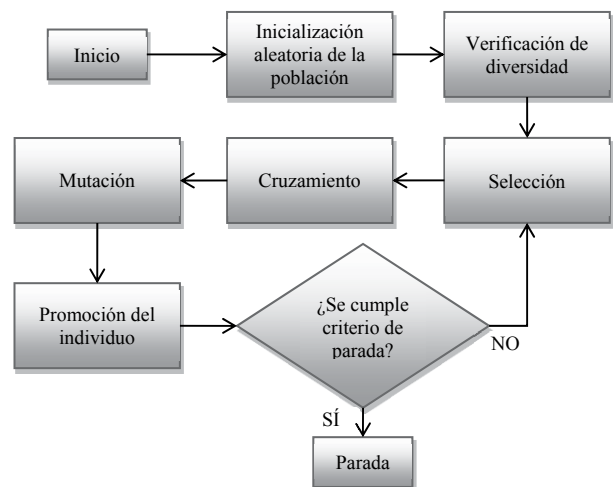
### Promoción

Para la promoción de una solución al siguiente ciclo generacional se evalúa que dicho individuo sea diferente a los presentes en la población del ciclo generacional en cuestión. Si se cumple esta condición y el individuo tiene mejor calidad que el peor de la población, es incluido.

### Criterio de parada

El proceso de optimización finaliza una vez se cumple alguno de los siguientes criterios: 1) el algoritmo ha alcanzado un número máximo de iteraciones; 2) se cumple un número predeterminado de iteraciones sin mejorar la incumbente (mejor solución actual).

El diagrama de flujo del algoritmo de solución se muestra en la figura 1.

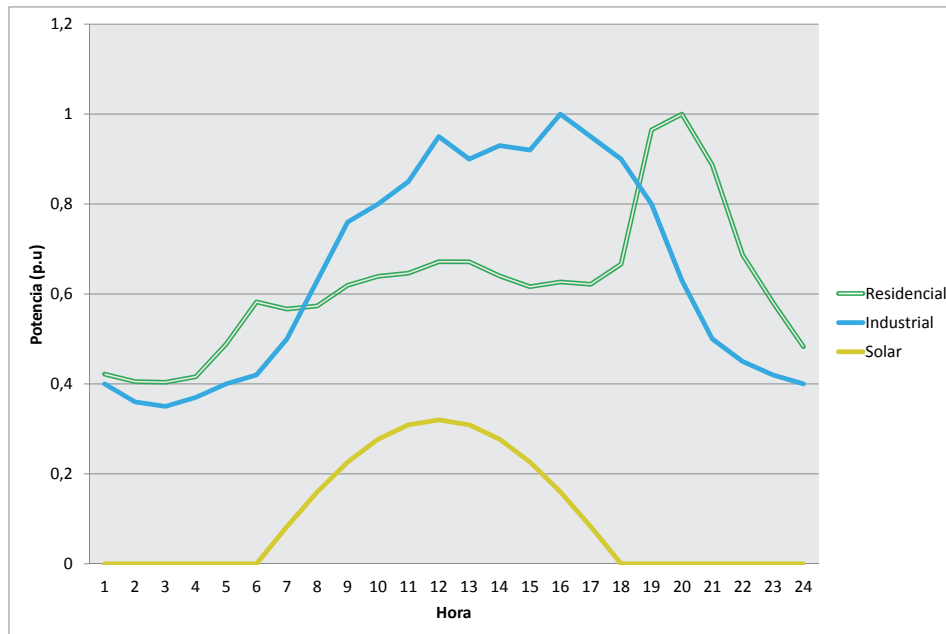


**Figura 1.** Diagrama de flujo del AGCB implementado

**Fuente:** elaboración propia.

## RESULTADOS

Para determinar el impacto de los PFV sobre el sistema de distribución, se toma el sistema de prueba de la IEEE de 37 nodos asumiendo cargas balanceadas (Garcés, Correa y Bolaños, 2014). Este



**Figura 2.** Curva de carga para nodos residenciales e industriales

Fuente: elaboración propia.

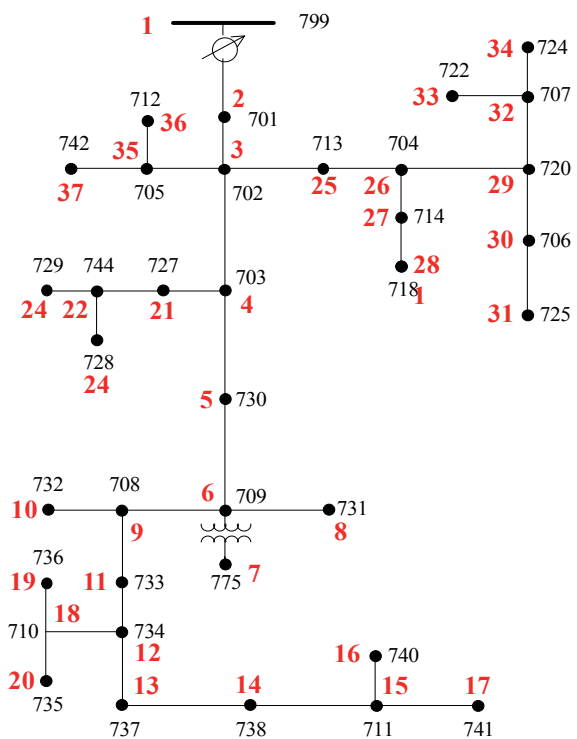
alimentador tiene una carga total de 2.457 kW. Para dicho sistema se suponen nodos con cargas residenciales e industriales que siguen las curvas de carga normalizadas como se muestra en la figura 2.

La carga industrial se encuentra ubicada en los nodos 25 a 34 y las demás cargas son del tipo residencial. El diagrama unifilar del alimentador del caso de estudio se muestra en la figura 3 con renumeración de los nodos (en rojo) para facilidad en la presentación de los resultados.

Con el fin de realizar el análisis de pérdidas de energía del sistema durante el periodo de vida útil de 25 años de los PFV, se tienen en cuenta los siguientes factores:

### Penetración de PFV

Teniendo en cuenta el estudio en UPME y BID (2015) y con el objeto de realizar un estudio más realista, se determina la capacidad de instalación de PFV de acuerdo con el potencial aprovechable en techos de la ciudad de Bogotá. Este



**Figura 3.** Alimentador de 37 nodos

Fuente: modificada de IEEE-PES (2000).

procedimiento ya se ha utilizado exitosamente en trabajos como Garcés, Correa y Sánchez (2014).

De acuerdo con este estudio, se tiene un factor de instalación factible técnicamente de 0,11 kWp. Al incorporar información sobre la propiedad de los predios y demanda promedio se llega a un valor total de 698 MWp. Al compararse este valor con la demanda máxima en la zona de cobertura de Codensa, que es 2.186 MW para el año 2013 según Fedesarrollo (2013), se obtiene una relación de 0,32.

Este dato se utiliza para dimensionar los paneles a ser instalados en cada nodo de acuerdo con su propio valor de demanda máxima. Lo anterior se hace con el fin de mantener una relación más cercana entre las zonas disponibles para generación y aspectos reales de posibilidades técnicas de instalación de PFV para un alimentador ubicado en Bogotá.

Para cada instalación a ser evaluada, se considera una curva de potencia como se muestra en la curva en amarillo de la figura 2, en donde la totalidad de la energía aprovechable es inyectada a la red y la escala del máximo de potencia es 0,32 de la demanda máxima en el nodo de instalación. Es importante mencionar que el dimensionamiento del panel se hace a partir de la demanda del año inicial y se mantiene constante en el tiempo.

### Crecimiento anual de la demanda

Para incluir el incremento natural de la demanda cada año, se toman los datos de evolución de demanda máxima en el área de Codensa presentados en Fedesarrollo (2013) y se toma un promedio de las variaciones desde el año 2000 hasta 2013. De esta forma se obtiene un crecimiento anual promedio de la demanda de 2,39 %, valor que se incorpora en este estudio.

### Variables económicas

La inflación se calcula con el promedio de 9 años presentado en UPME y BID (2015, p. 122, tabla

5.3), y su resultado es 3,04 % anual. El costo de la energía se toma del mismo documento, a partir de un precio de bolsa de 175 pesos colombianos por kWh (COP/kWh) para el año 2014. Para el incremento anual del precio de la energía se toma un promedio de 3 %. Para evaluar el impacto financiero de la instalación de los PFV se asume un LCOE base de 0,2 USD/kWh de acuerdo con lo planteado en UPME y BID (2015), con el fin de realizar variaciones y determinar los niveles necesarios para la factibilidad de los proyectos.

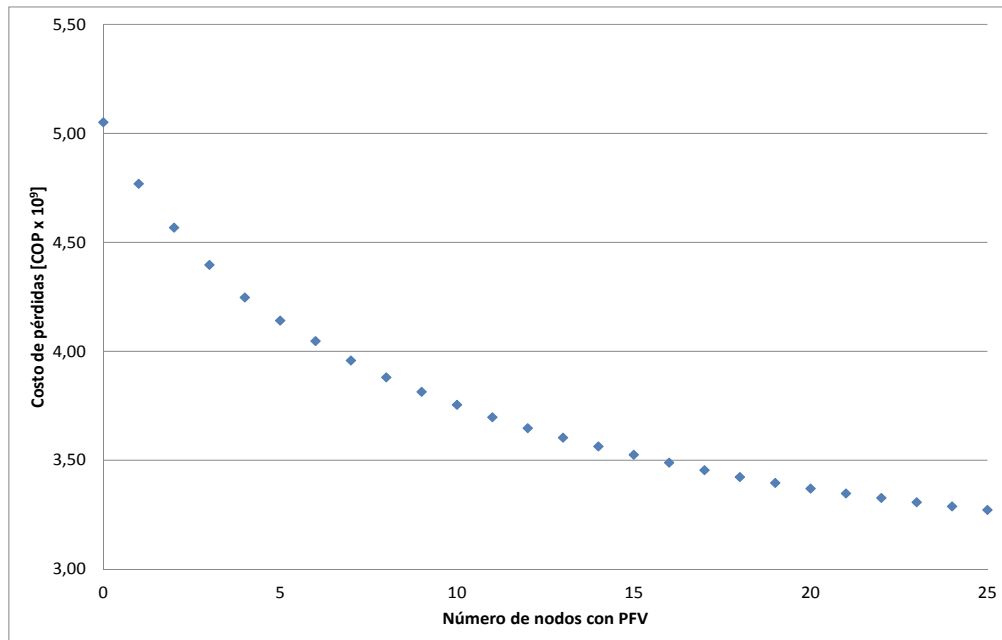
### Minimización de pérdidas

Con los supuestos anteriores se resuelve el problema de minimización presentado en (1) sujeto a las restricciones (4) a (10), con el fin de determinar el impacto sobre las pérdidas del sistema por el tiempo de vida útil de los paneles (estimado en 25 años), para diferentes valores de  $N_{CD}$ .

Una vez realizada la simulación se obtienen los valores de costos de energía para todo el periodo analizado y se consignan en la figura 4.

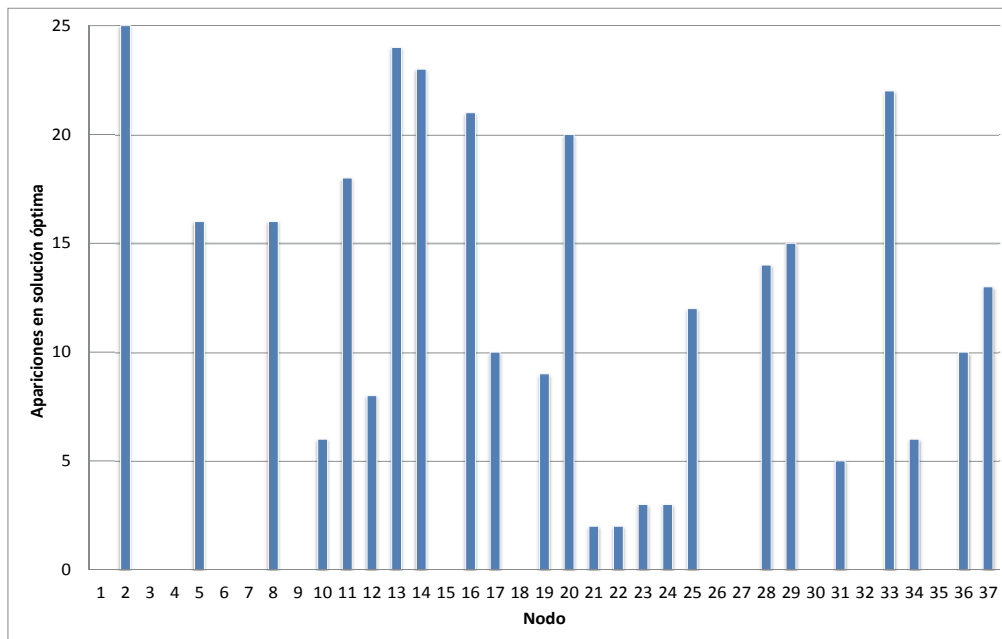
Para un escenario sin instalación de PFV los costos asociados a las pérdidas de energía son 5.050 millones de pesos colombianos. Cuando  $N_{CD}$  aumenta, disminuyen a su vez las pérdidas, debido a la disminución de carga que se debe suplir desde la subestación de distribución y su consecuente impacto sobre las corrientes en el sistema. También influye el soporte de potencia reactiva local a través de los inversores de los PFV, utilizando para ello la ecuación (6). Para instalación de PFV en 25 nodos, se alcanza una disminución de 35,3 % en el costo asociado a las pérdidas.

También es importante determinar los nodos más influyentes sobre la disminución de pérdidas. Para esto se muestra el número de veces que el algoritmo de optimización elige un nodo específico para instalación de PFV (del total de 37 nodos). De la figura 5 se observa que el nodo 2 estuvo presente para todas las simulaciones realizadas. De igual manera, los nodos 5, 7, 11, 13, 14, 16, 20, 25, 28, 29, 33 y 37 tienen presencia frecuente en



**Figura 4.** Relación entre costo total de pérdidas de energía y  $N_{CD}$

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 5.** Número de apariciones de PFV en la solución óptima para cada nodo del sistema

**Fuente:** elaboración propia.

las soluciones óptimas. Esto quiere decir que son los nodos más atractivos para la instalación de PFV con el fin de disminuir las pérdidas.

Del diagrama unifilar, se observa que estos nodos tienen la característica de estar en finales de circuitos, en zonas topológicamente alejadas de la subestación o en nodos del área industrial. Este último aspecto es importante, ya que debido a que la curva de carga industrial tiene un comportamiento más cercano al de los PFV, dicha energía se puede aprovechar de forma más eficiente, diferente a lo que ocurre con las cargas residenciales, en donde el pico de demanda ocurre en una hora en la que no existe inyección de potencia por parte del panel.

### **Minimización de costos totales**

La siguiente prueba consiste en la minimización de las ecuaciones (2) y (3) sujeto a las restricciones (4) a (10). Para este caso se observa que la factibilidad de los proyectos se alcanza con un LCOE de US\$ 90, ya que para valores mayores a este, no se compensan los ahorros en pérdidas y energía comprada en bolsa con respecto a la inversión realizada en PFV. Para un LCOE de US\$ 90, el costo total asumido por el OR, sería de 8.386 millones pesos colombianos y las 7 ubicaciones para los PFV se encuentran en los nodos 13, 14, 16, 17, 19, 20 y 27. En este caso el algoritmo prioriza los nodos que están alejados de la subestación y solo un panel es instalado en el nodo industrial 27.

### **Minimización de costos totales en alimentadores industriales**

Para esta simulación se asume que todas las cargas tienen comportamiento industrial, con el fin de determinar el impacto sobre decisiones de inversión para este escenario. Para este caso, el proyecto de inclusión de PFV tiene equilibrio financiero para un valor del LCOE de US\$ 104, con un costo total asociado de 8.806 millones de pesos colombianos, y paneles en los nodos 16, 17 y 19. De esta

simulación se concluye que los proyectos en alimentadores con predominancia de cargas industriales pueden ser atractivos financieramente para valores más altos de LCOE, en comparación con redes de alta presencia de cargas residenciales.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

La metodología presentada permite evaluar la inclusión de PFV en una red de distribución, desde el punto de vista de las pérdidas de energía y los costos totales asociados durante el periodo de vida útil de esta tecnología. Este estudio incorpora variables eléctricas y de mercado con el fin de reflejar escenarios más realistas.

Se obtiene un ahorro importante asociado a la disminución de las pérdidas, debido a la disminución de corrientes por los conductores y al soporte local de potencia reactiva a través de los inversores de los PFV.

Debido a la característica de potencia generada de los PFV, los proyectos tienden a cerrar financieramente para valores comparativamente más altos de LCOE en alimentadores con cargas predominantemente industriales, ya que la potencia de los paneles puede ser aprovechada durante el día, mientras existe mayor demanda en este tipo de cargas.

La inclusión de PFV también impacta sobre la planeación del sistema de distribución, ya que aumenta la vida útil de los transformadores y disminuye la cargabilidad de los conductores. Esta información debe ser incluida en un estudio futuro con el fin de evaluar los proyectos de generación solar bajo una perspectiva más holística y generar señales para futuros incentivos.

Si bien el costo asociado a los PFV ha decrecido en los últimos años, todavía es necesaria una mayor disminución del LCOE para hacer este tipo de proyectos más atractivos desde la óptica del operador de red. Mientras tanto, se deben generar incentivos financieros con el fin de promover estas alternativas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Castillo, A. (2011). Barreras para la implementación de generación distribuida: dos representantes de países desarrollados vs. un representante de país en desarrollo. *Tecnura*, 15(29), 62-75.
- Congreso de la República de Colombia (mayo de 2014). *Ley 1715: Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional*. Bogotá D.C.
- Correa, C.; Bolaños, R. y Garcés, A. (2012). Environmental transmission expansion planning using non-linear programming and evolutionary techniques. *IEEE International Symposium on Alternative Energies and Energy Quality (SIFAE)*, (pp. 1-5). Colombia.
- Esmaelian, H. y Fadaeinedjad, R. (agosto de 2014). Energy loss minimization in distribution systems utilizing an enhanced reconfiguration method integrating distributed generation. *IEEE Systems Journal*, (9), 1-10.
- Fedesarrollo (2013). *Análisis de la situación energética de Bogotá y Cundinamarca*. Bogotá D.C., Colombia: EEB.
- Garcés, A.; Correa, C. y Bolaños, R. (2014). Optimal operation of distributed energy storage units for minimizing energy losses. *IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition-Latin America (PES T&D-LA)*, (pp. 1-6). Colombia.
- Garcés, A.; Correa, C. y Sánchez, A. (2014). Operación económica de dispositivos almacenadores de energía para disminución de pérdidas. *Tecnura*, 18(42), 53-64.
- IEEE-PES. (2000). *Distribution System Analysis Subcommittee. IEEE 37 Node Test Feeder*. Recuperado el 22 de junio de 2015, de: <http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html>
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (junio de 2012). Renewable energy technologies: cost analysis series. *IRENA working paper: Solar Photovoltaics*, 1(4/5).
- Keane, A.; Ochoa, L.; Borges, C.; Ault, G.; Alarcon, A.; Currie, R.; ... Harrison, G. (mayo de 2013). State-of-the-art techniques and challenges ahead for distributed generation planning and optimization. *IEEE Trans. on Power Syst.*, 28(2), 1493-1502.
- Mahmoud, K.; Yorino, N. y Ahmed, A. (abril de 2015). Optimal distributed generation allocation in distribution systems for loss minimization. *IEEE Trans. on Power Syst.*, (99), 1-10.
- Nafisi, H.; Farahani, V.; Abyaneh, H. y Abedi, M. (2015). Optimal daily scheduling of reconfiguration based on minimisation of the cost of energy losses and switching operations in microgrids. *IET Gener. Transm. Distrib.*, 9(6), 513-522.
- Sadeghi, M. y Kalantar, M. (2014). Solar units planning using continuous genetic algorithm to reduce energy loss cost of the distribution system. *14th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)* (pp. 127-131). Polonia.
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) (UPME y BID) (2015). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*. Convenio financiado con recursos del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM) a través del Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Bogotá D.C.
- Walling, R.; Saint, R.; Dugan, R.; Burke, J. y Kojovic, L. (julio de 2008). Summary of distributed resources impact on power delivery systems. *IEEE Trans. on Power Deliv.*, 23(3), 1636-1644.
- Zobaa, A. y Cecati, C. (2006). A comprehensive review on distributed power generation. *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM 2006*, (pp. 514-518). Italia.







## Prototipo para la compensación de armónicos en sistemas trifásicos

### Prototype for harmonic compensation in three phase systems

Alfonso Alzate Gómez<sup>1</sup>, Duberney Murillo Yarce<sup>2</sup>, Ricardo León Silva Cárdenas<sup>3</sup>

**Fecha de recepción:** 01 de abril de 2016

**Fecha de aceptación:** 10 de septiembre de 2016

**Cómo citar:** Alfonso Alzate G., A.; Murillo Y., D. y Silva C.; R.L. (2016). Prototipo para la compensación de armónicos en sistemas trifásicos. *Revista Tecnura*, 20(50), 96-105. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a07

#### RESUMEN

**Contexto:** La metodología tradicional para el control de armónicos consiste en el uso de filtros pasivos sintonizados a las componentes armónicas a eliminar. Los filtros pasivos requieren de un diseño exigente en frecuencia para evitar fenómenos de resonancia con otros elementos y no responden a cambios en la dinámica del sistema eléctrico de potencia.

**Método:** Una alternativa de solución de mejores características son los filtros activos de potencia paralelos. Estos filtros a diferencia de los filtros pasivos, inyectan corrientes de compensación a la red y tienen la capacidad de adaptarse a los cambios en las condiciones de operación. La implementación de un filtro activo implica desarrollo de hardware pero también desarrollo de software. Se requieren algoritmos para el cálculo de las corrientes de compensación, control de corriente y de la tensión del bus de continua.

**Resultados:** En este trabajo se diseña y construye un prototipo para la compensación de armónicos de 5kVA en sistemas de distribución trifásica de 220V. Los elementos fundamentales que constituyen el hardware son: bobina de acople, condensador, dispositivos semiconductores y controlador. Los algoritmos de control que se encargan de la operación del filtro activo en cada instante de tiempo son Teoría PQ, Control Lineal-PWM y control PI.

**Conclusiones:** Los filtros activos de potencia son una solución a la presencia de armónicos en los sistemas de potencia. Compensan los armónicos generados por las cargas, no presentan problemas de resonancia y tienen respuesta dinámica.

**Palabras Clave:** Calidad de energía, Compensación de armónicos, Control de corriente, Filtro activo, Inversor de potencia.

#### ABSTRACT

**Context:** The traditional methodology for the control of harmonics consists in the use of passive filters tuned to the harmonic components to be eliminated. Passive filters require a frequency-demanding design to avoid resonance phenomena with other elements and they not respond to changes in the dynamics of the electric power system.

**Method:** A best-performing solution alternative is parallel power active filters. These filters, unlike passive filters, inject compensation currents into the network and have adaptation to changes in operating conditions. The implementation of an active filter involves hardware development but also software development. Algorithms are required for calculation of compensation currents and dc bus voltage control.

1 Ingeniero electricista, magíster en Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Contacto: [alalzate@utp.edu.co](mailto:alalzate@utp.edu.co)

2 Ingeniero electricista, magíster en Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Contacto: [duberm@utp.edu.co](mailto:duberm@utp.edu.co)

3 Ingeniero electricista, Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Cali, Colombia. Contacto: [rsilva@sena.edu.co](mailto:rsilva@sena.edu.co)

**Results:** In this work a prototype for the harmonic compensation of 5kVA is designed and built in three phase distribution systems of 220V. The hardware fundamental elements are: coupling coil, capacitor, semiconductor devices and controller. The control algorithms that are responsible for the operation of the active filter at each instant of time are PQ theory, Linear Control-PWM and PI Control.

**Conclusions:** The active power filters are a solution to the presence of harmonics in power systems. They compensate the harmonics generated by nonlinear loads and they don't have resonance problems and good dynamic response.

**Keywords:** Active filter, Current controller, Energy quality, Harmonics compensation, Power inverter.

## INTRODUCCIÓN

La metodología tradicional para el control de armónicos consiste en el uso de filtros pasivos sintonizados a las componentes armónicas a eliminar. Los filtros pasivos utilizan componentes pasivos (redes LC), que a bajas frecuencias son dispositivos grandes y de costo elevado (Martínez, 2003). Además, requieren de un diseño exigente en frecuencia para evitar fenómenos de resonancia con otros elementos y no responden a cambios en la dinámica del sistema eléctrico de potencia. Estos inconvenientes, plantean la necesidad de otras alternativas.

Como consecuencia del desarrollo tecnológico en el campo de los semiconductores y los procesadores, la electrónica de potencia ha desarrollado dispositivos que permiten mejorar la calidad de la energía. Entre ellos se encuentran los filtros activos de potencia, los cuales son equipos dinámicos diseñados para la compensación de armónicos. Estos, a diferencia de los pasivos, inyectan componentes de compensación a la red anulando el efecto de los armónicos y tienen la capacidad de ajustarse a los cambios en las condiciones de operación. Están basados en convertidores PWM (modulación por ancho de pulso) y pueden conectarse al sistema de distribución en serie o paralelo (Ramana, Chowdary y Ratnam, 2014).

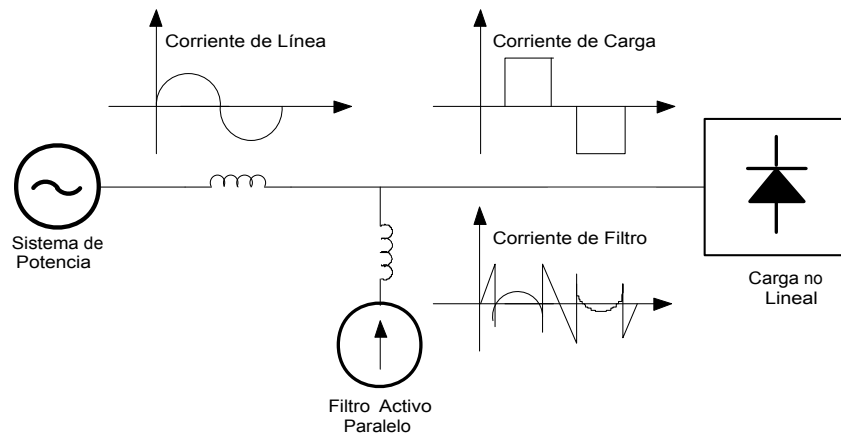
La topología utilizada en este proyecto es un filtro activo de potencia paralelo o *shunt*. En la figura 1, el filtro activo paralelo se representa como una fuente de corriente que inyecta en el nodo donde está conectada la carga, corrientes de

compensación para cada frecuencia armónica con la misma amplitud y opuesta en fase a la de la red de alimentación, cancelando los efectos de los armónicos producidos por la carga (Kumar, Jaykanth y Borghate, 2014).

El filtro activo está constituido por cinco bloques funcionales: el convertidor de potencia, la inductancia de interconexión, el dispositivo de almacenamiento de energía, los acondicionadores de señal y el controlador (Cárdenas, Jiménez y Peña, 2009). El control del filtro activo es implementado en procesadores de alta velocidad como procesadores digitales de señal (DSP) y FPGA (Dey y Mekhilef, 2015).

La forma de onda de corriente para cancelar los armónicos se obtiene mediante el convertidor fuente de tensión controlado en corriente y el enlace de corriente, constituido por una inductancia. El convertidor usa un capacitor como fuente de voltaje de corriente continua, para poder generar las señales de compensación. La forma de onda para la señal de referencia inyectada al sistema se obtiene mediante la conmutación de los dispositivos de potencia (Juhai, 2012).

El controlador del filtro activo realiza tres acciones principales: a) generación de la corriente de referencia; b) control de corriente; c) control del bus de continua (Belonkar y Salodkar, 2013). La corriente de referencia, también llamada corriente de compensación, es la que debe inyectar el filtro activo en el punto de conexión de la carga. Para generar y controlar la corriente de compensación se debe determinar:



**Figura 1.** Características de compensación de un filtro activo de potencia paralelo

**Fuente:** adaptada de Morán, Dixon, Espinoza y Wallace (1999).

- Los voltajes y corrientes en el punto de conexión de la carga.
- El método de cálculo de las corrientes de compensación con base en las tensiones y corrientes medidas.
- La técnica de control de corriente que garantiza corrientes de inyección equivalentes a las corrientes de compensación halladas.

Después de obtener las corrientes de compensación se generan las señales de conmutación para el puente inversor. La conmutación de los dispositivos electrónicos determina el sentido del flujo de potencia entre el filtro y la red; y permite en conjunto con el elemento de acople, sintetizar las corrientes de compensación halladas previamente. Un sistema de control en lazo cerrado conocido como técnica de control de corriente, garantiza la acción de seguimiento entre la corriente de compensación y la inyectada en el punto de conexión por el filtro activo para realizar la acción de compensación.

## METODOLOGÍA

La implementación del filtro activo implica desarrollo tanto de *hardware* como de *software*. El inversor de potencia es el principal componente del prototipo. Está compuesto por los dispositivos semiconductores, redes de ayuda a la conmutación,

el elemento almacenador de energía y bobina de acople (*hardware*). Este conjunto de elementos es responsable de compensar los armónicos en el punto de conexión y para este fin, se requiere de la implementación de algoritmos (*software*) para su adecuado funcionamiento. Los algoritmos de control son ejecutados por el controlador, que es responsable en todo momento del funcionamiento del sistema y requiere de información para ejecutar las acciones de control correspondientes. Por tanto, se requiere sensores y sistemas de acondicionamiento con su correspondiente fuente de alimentación.

## Descripción del prototipo

El prototipo está conformado por el inversor de potencia, el elemento de enlace, el elemento almacenador de energía, circuitos de acondicionamiento y fuente de alimentación.

### *Inversor de potencia*

El convertidor está constituido por IGBT que mediante su conmutación permiten controlar el flujo de energía entre el elemento almacenador de potencia y la red (Hidalgo, Díaz y Trujillo, 2014). Se diseñó y construyó un puente inversor de tres ramas y el correspondiente circuito de disparo (*driver*). El inversor consta de dos circuitos impresos:

tarjeta de potencia y el *driver*. En la primera, se disponen los IGBT con sus conexiones de control, redes de ayuda a la conmutación, protecciones y salidas, mientras que en la segunda se localizan los componentes para activar y desactivar los IGBT. El *driver* tiene dos elementos básicos: un optoacoplador de alta frecuencia (6N137) y el circuito integrado IR2110 que amplifica y genera referencias independientes para cada señal de entrada.

#### *Elemento de enlace*

El puente inversor está conectado a la red mediante bobinas de acople. Se diseñó y construyó una bobina con protección de corriente de 30A, que puede entregar tres valores de reactancia según el punto de conexión.

#### *Elemento almacenador de energía*

Está formado por un banco de condensadores, circuito de precarga y dispositivos de protección. Utilizando condensadores electrolíticos de 1500uF y 550V, se ha dispuesto de un conjunto que proporciona una capacidad total de 1500uF a 1100V. Esta tensión tiene un margen de seguridad suficiente para el nivel de tensión que el bus debe mantener. Como se desea conectar el prototipo directamente a la red es necesario implementar un circuito de precarga. El elemento básico para esta función es un rectificador de estado sólido conectado a la red trifásica de alimentación mediante una protección (*breaker tripolar*). La salida del rectificador se conecta a una resistencia, para limitar la corriente del bus de continua. El circuito de precarga solo opera mientras se carga el banco de condensadores a un nivel de energía adecuado para realizar la compensación. Después, se desactiva el circuito de precarga, y se conecta el bus de continua con el puente inversor y la red.

#### *Circuitos de acondicionamiento*

Se construyeron tarjetas electrónicas para el acondicionamiento de las señales de voltaje y corriente. En la lectura de corriente se tiene que tener en cuenta que se requiere un aislamiento galvánico

entre la parte de potencia y la parte de control. Por otro lado, se debe adecuar la señal a niveles admisibles por el convertor análogo-digital del DSP. El sensor utilizado es el modelo LA55-P de la marca LEM. Son sensores de efecto Hall que entregan a su salida una corriente proporcional a la corriente que pasa a través del núcleo. Para medir finalmente la corriente con el DSP se tiene que convertir a señal de tensión mediante una resistencia de alta precisión. El sensor de voltaje utilizado corresponde al modelo LV 25-400 de la marca LEM. Es un sensor de efecto Hall que entrega a su salida una corriente proporcional al voltaje del primario.

#### *Fuente de alimentación*

Se ha diseñado una fuente de alimentación de corriente continua con tensiones de +5V, +15V y -15V necesarias para alimentar el *driver* y los elementos de la realimentación del sistema. Las tarjetas de acondicionamiento de voltaje y corriente requieren de polarización dual de 15V. En cada tarjeta, se acondiciona la entrada proveniente de un sensor mediante la configuración de amplificadores operacionales (elementos activos). También, los circuitos de acondicionamiento sirven como intermediarios en la alimentación del sensor, que en ambos casos voltaje y corriente son transductores de efecto *hall*. El *driver* (manejador de disparo) es la otra tarjeta que requiere polarización. Se alimenta con 5V para polarizar el optoacoplador y con 15V para la polarización del integrado IR2110. La realimentación del sistema contempla corrientes y voltajes del sistema de alimentación, corrientes de salida del convertidor y la tensión del bus de continua. Esta información del sistema precisa del uso de sensores y de sistemas de acondicionamiento.

#### **Controlador**

El control del filtro activo es implementado usando un procesador digital de señal (DSP) de Texas Instruments de la familia C2000, específicamente la tarjeta de desarrollo eZdsp F2812 de Spectrum

Digital. Dependiendo de la teoría de compensación, el DSP debe:

- a. Transformar coordenadas.
- b. Evaluar expresiones matemáticas para calcular la potencia activa o reactiva instantánea.
- c. Implementar filtros digitales.

La estructura del programa se basa en un algoritmo que se ejecuta cuando se produce una interrupción asignada al tiempo de muestreo. Durante esta interrupción el DSP toma muestras de las señales análogas de interés (voltajes y corrientes) y realiza los cálculos para obtener las componentes de compensación que debe inyectar el controlador en el punto de conexión para compensar el efecto de los armónicos.

El algoritmo utilizado para realizar la compensación de armónicos en la implementación fue desarrollado utilizando teoría PQ y control lineal-PWM.

Los métodos de compensación de armónicos están basados en la deducción instantánea de las señales de referencia a partir de las señales armónicamente contaminadas. Para técnicas de compensación en el dominio del tiempo, esta labor requiere de la implementación de filtros digitales. El objetivo es obtener una configuración que

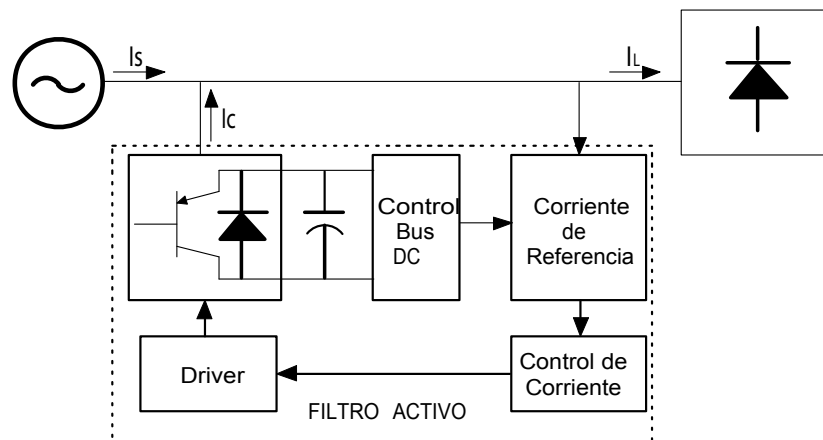
opere como filtro pasa-alto, que pueda ser programada en el controlador (en este caso un DSP) con un consumo mínimo de ciclos de instrucción, de buen comportamiento en frecuencia y un retardo mínimo. En la etapa de diseño se utilizó el paquete FdaTool (Filter Design & Analysis Tool) de Matlab.

El filtro pasa alto se construyó mediante la diferencia de la componente de potencia activa instantánea ( $p$ ) y la salida de un filtro pasa bajo aplicado a  $p$ . Este arreglo evita una mala compensación ocasionada por el desfase introducido por el filtro pasa alto en las componentes frecuenciales que se pretenden compensar.

### Algoritmos de control

El controlador realiza tres acciones principales de control: generación de la corriente de referencia, control de corriente y control del bus de continua. En la figura 2 se detallan las acciones de control y su integración.

Las teorías de compensación son la metodología utilizada para obtener la corriente de referencia que inyectada en el punto de conexión anula los efectos armónicos en la red. La PQ es la teoría de compensación implementada en el controlador del filtro activo. Conocida en inglés como *PQ Theory*, *Instantaneous Power Theory*, *Instantaneous Active*



**Figura 2.** Algoritmos de control filtro activo de potencia paralelo

**Fuente:** elaboración propia.

and Reactive Power Method ó Instantaneous Reactive Power Algorithm, esta constituye uno de los primeros esquemas de compensación. La primera publicación en inglés es el trabajo realizado por Akagi, Kanazawa y Nabae (1983).

De acuerdo con esta teoría, las corrientes para el filtro activo se obtienen de la potencia activa y reactiva de la carga mediante cálculos previos que relacionan los voltajes y corrientes de carga en un marco de referencia estacionario aplicando la transformada  $\alpha\beta$ , también conocida como la transformada de Clarke.

La figura 3 muestra el diagrama del método de compensación usado, incluyendo el control de la tensión de la barra de continua. El voltaje del bus de continua se regula mediante una acción de control proporcional que ejecuta el controlador para definir los intervalos de carga y descarga, y en general, controlar el intercambio de energía entre la barra de continua y la red. Cuando el controlador detecta la descarga del condensador, incrementa el valor de la corriente con el objeto de recuperar la tensión prevista en el condensador.

Un algoritmo adicional es el controlador de corriente, que tiene como función garantizar que las corrientes de compensación sigan fielmente las corrientes de referencia obtenidas mediante la estrategia de compensación de armónicos.

Una variedad de enfoques para el control de corriente se han reportado en la literatura, empleando técnicas como: PWM sinusoidal, control lineal PWM, control de corriente por banda de histeresis, control vectorial, modo deslizante, técnica dead-beat, control predictivo y en un periodo más reciente técnicas de computación suave (Dey y Mekhilef, 2015). Estas técnicas actúan sobre los dispositivos semiconductores del puente inversor modificando el patrón de conmutación (Vega y Alzate, 2015). En este trabajo se implementó la técnica control lineal-PWM, comparando la señal de error con una onda triangular de frecuencia y amplitud fijas. Si la señal de error es mayor que la onda triangular, el interruptor superior se activa y simultáneamente es desconectado el interruptor inferior. Cuando la señal de error es menor que la onda triangular el interruptor inferior se activa y simultáneamente es desconectado el interruptor superior. Puesto que este controlador utiliza una onda triangular de frecuencia fija, se mantiene constante la frecuencia de conmutación del inversor, lo que hace de esta su principal ventaja. Dicha técnica de control de corriente es un sistema de modulación de ancho de pulso: la onda triangular es la portadora, mientras que la señal de error de la corriente es la onda modulada.

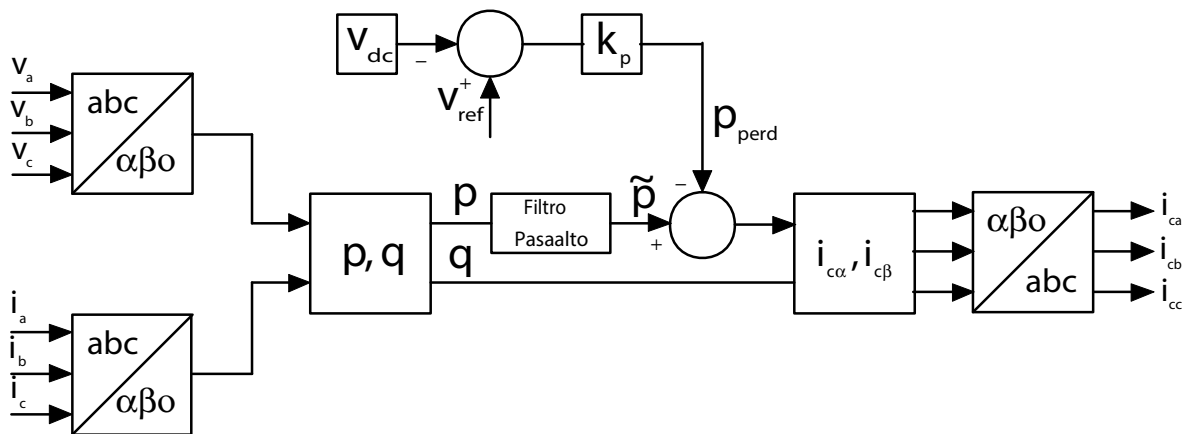


Figura 3. Diagrama de bloques teoría PQ

Fuente: elaboración propia.

## Montaje del sistema

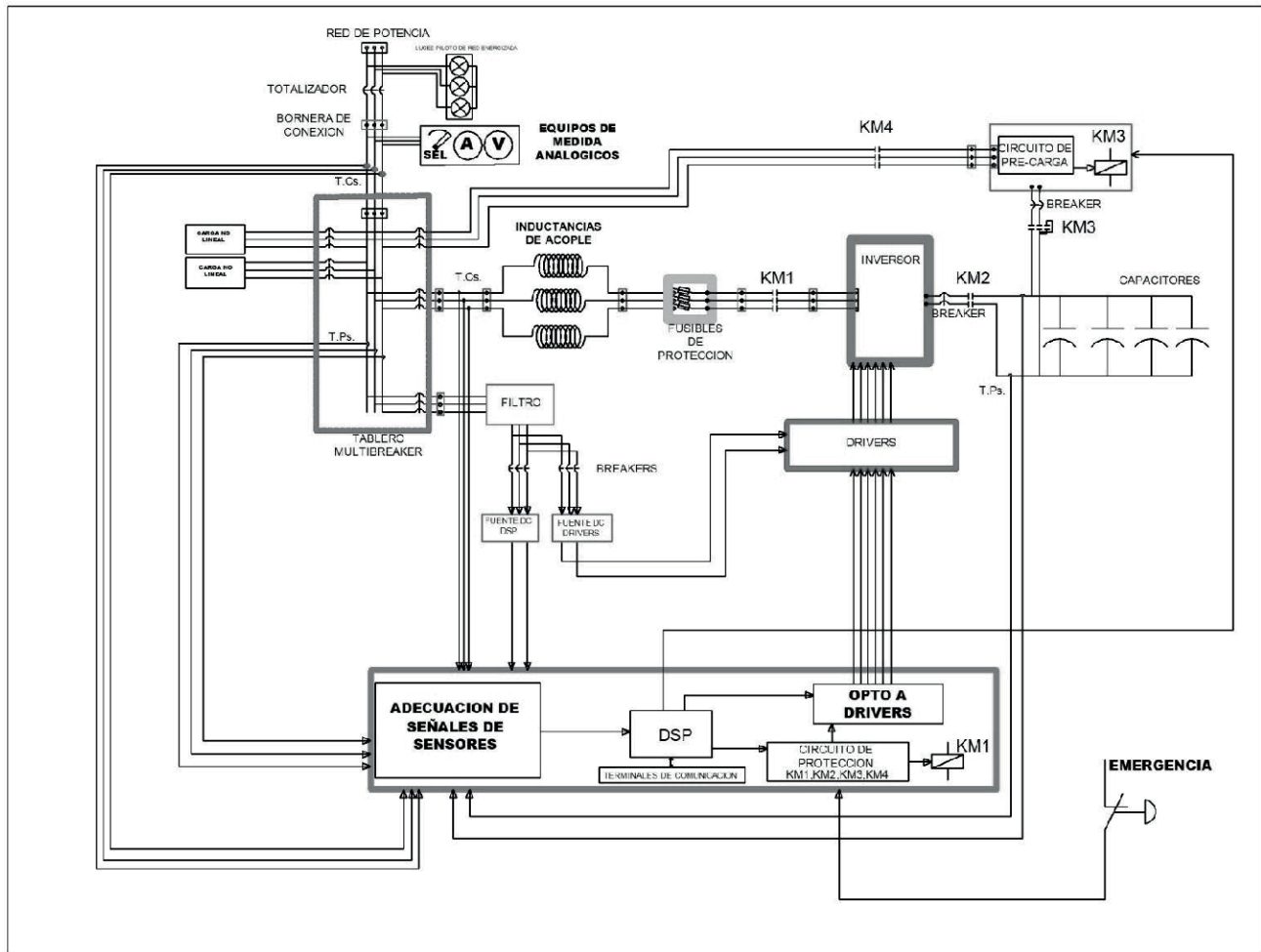
El prototipo se ha montado sobre un gabinete teniendo en cuenta las conexiones mostradas en la figura 4.

La idea principal para realizar el montaje es separar los elementos de control de los elementos de potencia, ubicando a conveniencia protecciones y sensores. También, se debe tener en cuenta aspectos como:

- Facilidad de acceso de los elementos de control para verificar tanto las señales de entrada como de salida del controlador.

- Construcción modular para poder cambiar fácilmente cualquier elemento en caso de avería.
- Apantallamiento electromagnético en la etapa de control para evitar interferencias del circuito de potencia.
- Uso de indicadores (luces piloto y medidores análogos) para supervisar el desempeño del prototipo y algunos parámetros de interés.

El montaje de los elementos de control y de potencia se ha realizado en el interior del gabinete, a lado y lado de una lámina que permite sujetar cada componente. Elementos adicionales como



**Figura 4.** Diagrama general de componentes y conexiones del prototipo

**Fuente:** elaboración propia.

visualizadores, luces piloto, interfaz de comunicación del controlador, entre otros, están ubicados en el panel frontal del gabinete para una fácil inspección y acceso.

## RESULTADOS

Se realizaron pruebas a 220V usando como carga un rectificador trifásico no controlado con carga RL. La estrategia de compensación de armónicos utilizada en la implementación es la teoría PQ con el control lineal PWM como técnica de control de corriente. La portadora es una señal triangular. Se muestran resultados para una fase por tratarse de una carga balanceada.

Carga RL: resistencia  $330\Omega$  e inductancia de  $280\text{mH}$ . Valor pico de la corriente  $0,5\text{A}$ . Bobina de acople de  $11\text{mH}$ , relación entre las frecuencias de la moduladora y portadora 21.

En la figura 5 se muestra la corriente de la carga y el voltaje de la fuente. En la 6, se ilustra el contenido armónico de la corriente a compensar. Se notan componentes armónicas principalmente de bajo orden, siendo el quinto armónico el más representativo, con un porcentaje del 21,1 %.

En la figura 7 se observa la corriente compensada y de inyección. Se utilizó una frecuencia de la portadora igual a 21 veces la frecuencia fundamental, obteniéndose una compensación aceptable, aunque con muchas componentes de alta

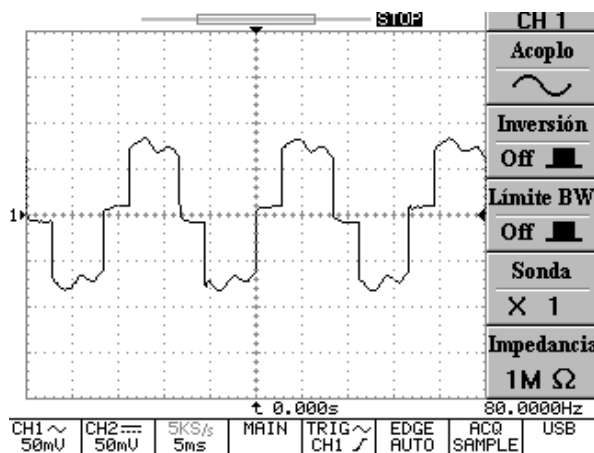


Figura 5. Corriente en la carga y voltaje de la fuente

Fuente: elaboración propia.

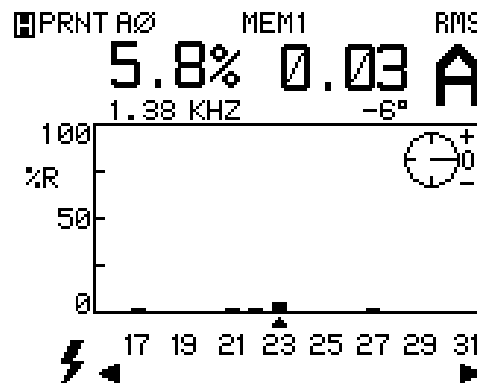
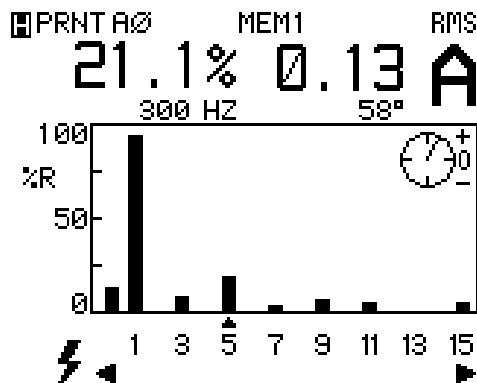
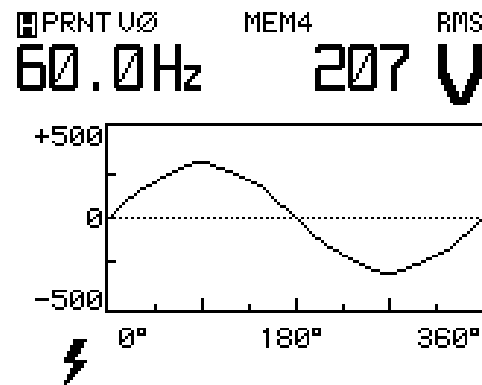


Figura 6. Componentes armónicas de la corriente de carga

Fuente: elaboración propia.



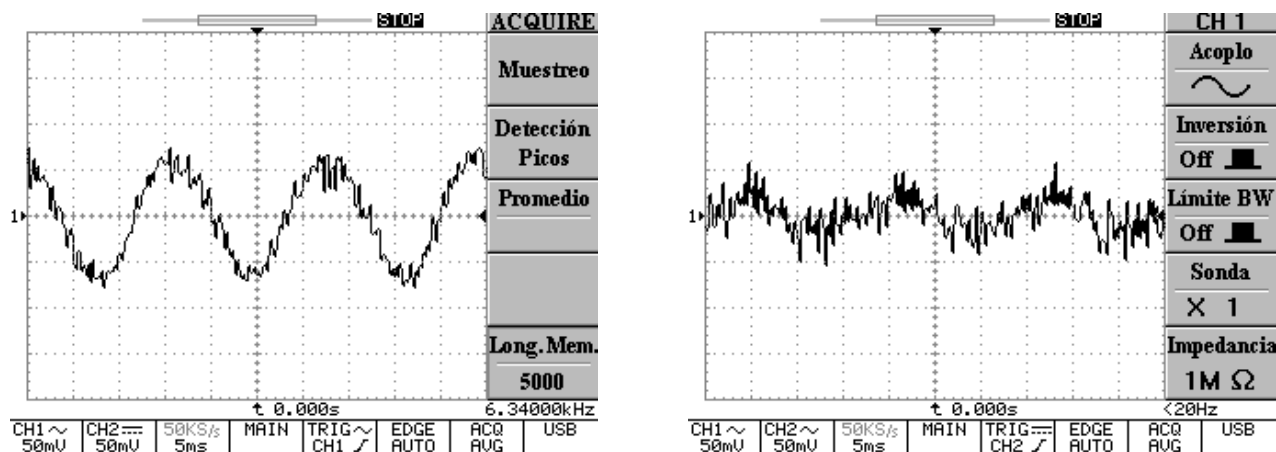


Figura 7. Corriente compensada y de inyección

Fuente: elaboración propia.

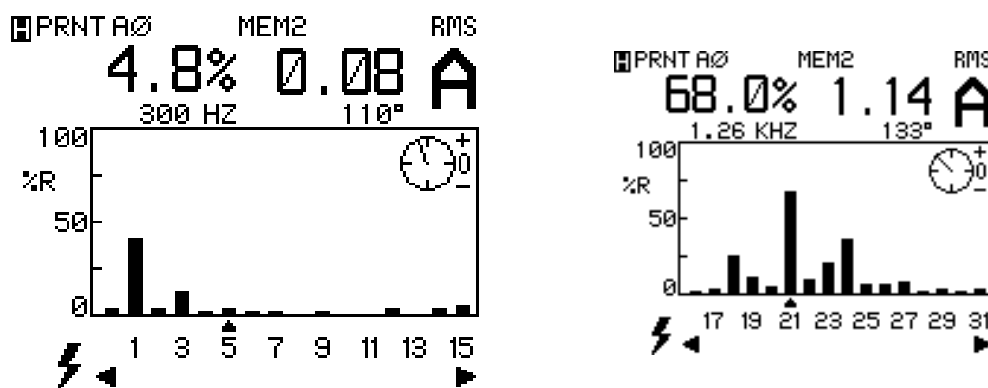


Figura 8. Componentes armónicas de la corriente compensada

Fuente: elaboración propia.

frecuencia. En la figura 8, se observa una atenuación de los armónicos 5, 7, 9 y 11 pero también, una banda de frecuencias centrada en la componente 21. Este comportamiento es característico de este tipo de modulación. El quinto armónico disminuyó a un 4,8 %.

## CONCLUSIONES

Se construyó un prototipo de 5KVA para la compensación de armónicos en un sistema de distribución. El prototipo puede realizar una o más de las funciones requeridas para compensar sistemas de potencia y mejorar la calidad de la energía,

actuando sobre otras fuentes de problema como potencia reactiva y factor de potencia. Además, puede ser utilizado en el control de motores.

El prototipo se implementó en una red trifásica de 220V, usando como carga un rectificador trifásico no controlado con carga resistiva. Los resultados muestran una atenuación de los armónicos de bajo orden como el 5, 7 y 9; pero, generando componentes de alta frecuencia. El valor de la bobina de acople y del coeficiente de modulación en frecuencia, son determinantes en cuanto a los efectos de compensación; esto implica la elección de un valor adecuado para cada aplicación.

## FINANCIAMIENTO

Universidad Tecnológica de Pereira.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akagi, H.; Kanazawa, Y. y Nabae, A. (1983). *Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits*. Presentado en International Power Electronics Conference (IPEC' 83). Tokio, Japón.
- Belonkar, A. y Salodkar, M. (2013). *Performance Analysis of Shunt Active Power Filter with Different Switching Signal Generation Techniques*. Presentado en Recent Advances and Applications of Electrical Engineering: Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering (AEE '10). Penang, Malaysia.
- Cárdenas, P.; Jiménez, F. y Peña, C. (2009). Filtro activo de potencia en paralelo: análisis y diseño. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2(14), 17-25.
- Dey, P. y Mekhilef, S. (2015). Current Controllers of Active Power Filter for Power Quality Improvement: A Technical Analysis. *Automatika – Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*, 56(1). <https://doi.org/10.7305/automatika.2015.04.572>
- Hidalgo, C.A.; Díaz, N.L. y Trujillo, C.L. (2014). Diseño e implementación de controladores lineales para regulación del bus DC en convertidores VSC para HVDC. *Tecnura: Tecnología y Cultura Afirmando el Conocimiento*, 18(40), 48–61.
- Juhai, Z. (2012). An Analysis of Shunt Active Power Filter Based On Instantaneous Reactive Power Theory. En: *Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), 2012 7th International*, 4, 3000-3003. <https://doi.org/10.1109/IPEMC.2012.6259349>
- Kumar, Y.; Jaykanth, N. y Borghate, V. (2014). Analysis and Simulation of Shunt Active Power Filter to Address Power Quality Problems. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 3(3), 2228-2232.
- Martínez, F.H. (2003). Técnicas de conversión AC/DC en sistemas monofásicos con factor de potencia unitario. *Revista Tecnura*, 6(12), 31-41.
- Morán, L.A.; Dixon, J.W.; Espinoza, J.R. y Wallace, R.R. (1999). Using Active Power Filters to Improve Power Quality. En: *5th Brazilian Power Electronics Conference* (pp. 501–511). Recuperado de: <http://web.eng.puc.cl/~power/paperspdf/dixon/37a.pdf>
- Ramana, B.V.; Chowdary, S.D. y Ratnam, G.V. (2014). Analysis of Active and Passive Power Filters For Power Quality Improvement under Different Load Conditions. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 03(08), 11102-11115. <https://doi.org/10.15662/ijareeie.2014.0308035>
- Vega, C.J. y Alzate, R. (2015). Control óptimo inverso como alternativa para la regulación de un convertidor DC-DC elevador. *Tecnura*, 19(46), 65–78.





## Evaluación del desgaste por abrasión de una mezcla drenante modificada con residuo de llanta triturada (GCR)

### Evaluation of abrasion of a modified drainage mixture with rubber waste crushed (GCR)

Yee Wan Yung Vargas<sup>1</sup>, Jorge Eliécer Cordoba Maquilón<sup>2</sup>, Hugo Alexander Rondón Quintana<sup>3</sup>

**Fecha de recepción:** 21 de febrero de 2016

**Fecha de aceptación:** 10 de septiembre de 2016

**Cómo citar:** Yung V., Y.W.; Cordoba M. J.E. y Rondón Q., H.A. (2016). Evaluación del desgaste por abrasión de una mezcla drenante modificada con residuo de llanta triturada (GCR). *Revista Tecnura*, 20(50), 106-118. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a08

#### RESUMEN

**Contexto:** Las mezclas asfálticas drenantes son definidas como aquellas cuyos vacíos con aire oscilan entre 20% y 25%, y emplean como ligante, un asfalto modificado con algún polímero principalmente elastomérico. A diferencia de otros estudios reportados sobre el tema, se evaluó el efecto de la temperatura de mezcla entre el asfalto modificado con GCR y el material pétreo (160 °C y 170 °C), y la variación de las temperaturas de compactación para cada una de ellas (110 °C, 130 °C, 150 °C) y (150 °C, 160 °C, 170 °C) respectivamente.

**Método:** El presente estudio evaluó en laboratorio, la resistencia al desgaste por abrasión (ensayo Cántabro) y la rigidez bajo carga monotónica (ensayo Marshall) y cíclica (módulo resiliente) que experimentó una mezcla asfáltica drenante MD fabricada con asfalto modificado con grano de caucho reciclado de llanta (GCR) por vía húmeda (se modifica el asfalto con el GCR a alta temperatura). Como asfalto base para la fabricación de las mezclas se utilizó cemento asfáltico CA 60-70 (PG 64-22).

**Resultados:** se reporta un incremento notable en la resistencia al desgaste por abrasión, a la resistencia bajo carga monotónica y la rigidez bajo carga cíclica de la MD cuando se modifica con GCR.

**Conclusiones:** Como conclusión general se resalta la influencia que tienen las temperaturas de mezcla entre el asfalto y el GCR, así como la de compactación (asfalto modificado y agregado) sobre el comportamiento de la MD modificada con GCR.

**Palabras clave:** Asfaltos modificados; desgaste por abrasión; mezclas drenantes; Estabilidad Marshall; GCR; Módulo resiliente.

#### ABSTRACT

**Context:** Porous asphalt mixtures are defined as an asphalt concrete with air voids content of around 20% and 25%, and the typical binder is a modified asphalt with some elastomeric polymer. Unlike other studies reported on the subject: i) The effect of mixing temperature between asphalt modified with GCR and stone materials (160 °C and 170 °C) was evaluated, ii) as the variation of compaction

- 1 Ingeniera civil, especialista en Vías y Transporte, magíster en Ingeniería-Infraestructura y Sistemas de Transporte. Docente de la Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta, Colombia. Contacto: [yeewanyv@ufps.edu.co](mailto:yeewanyv@ufps.edu.co); [ywyungv@unal.edu.co](mailto:ywyungv@unal.edu.co)
- 2 Ingeniero civil, especialista en Vías y Transporte, especialista en Psicología Organizacional, magíster en Ingeniería-Infraestructura y Sistemas de Transporte, coctor en Ingeniería. Docente Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. Contacto: [jecordob@unal.edu.co](mailto:jecordob@unal.edu.co)
- 3 Ingeniero civil, magíster en Ingeniería Civil, doctor en Ingeniería. Profesor titular, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C., Colombia. Contacto: [harondonq@udistrital.edu.co](mailto:harondonq@udistrital.edu.co)

temperatures for each of (110 °C, 130 °C, 150 °C) and (150 °C, 160 °C, 170 °C), respectively.

**Method:** This study measured in laboratory, the resistance to abrasion (Cantabria trial) and the stiffness under monotonic (Marshall test) and cyclical (resilient modulus) loading of a porous asphalt mixture MD. Asphalt cement CA 60-70 (PG 64-22) was used as binder. This binder was modified with recycling tyre rubber (GCR) by wet way (The GCR and binder are completely mixed to form asphalt rubber).

**Results:** a significant increase in resistance to abrasion, resistance under monotonic loading and stiffness under cyclic loading of the MD is reported when this mixture is modified with GCR.

**Conclusion:** The results showed that there is a highlighted influence of mix temperature (between asphalt and GCR) and compaction temperature (modified asphalt and aggregate) on the behavior of the MD modified with GCR.

**Keywords:** Modified asphalt; abrasive wear; porous asphalt; Marshall stability; GCR; Resilient modulus.

## INTRODUCCIÓN

### Problemática ambiental

De acuerdo con Rondón y Reyes (2015), los neumáticos en desuso son uno de los materiales más desechados en el mundo. Aproximadamente: i) el 2 % de los residuos sólidos totales provienen del desecho de neumáticos en desuso (Singh, Nimmo, Gibbs y Williams, 2009); ii) en Estados Unidos se desechan anualmente aproximadamente 300 millones de llantas (Zhong, Zeng y Rose, 2002; Shen, Amirkhanian y Lee, 2007); iii) de acuerdo con Botero *et al.* (2005), en Puerto Rico se produce, por cada habitante, un neumático de desecho al año; iv) la producción anual en Brasil es de aproximadamente 45 millones de llantas, y de estas, cerca de 30 millones son desechadas (Neto *et al.*, 2003); v) para el año 2003 existían aproximadamente 900 millones de neumáticos colocados de manera inapropiada en el medio ambiente (Magalhães y Soares, 2003); vi) en China, en el año 2002 se produjeron 80 millones de llantas de desecho, y se esperaba para el año 2010 un número total de neumáticos abandonados de 200 millones (Cao, 2007); vii) en Bogotá D.C. (Colombia), tan solo en 1999 se generaron 1'981.375 llantas en desuso, y esta magnitud incrementó a 2'642.938 para

mediados de agosto de 2010 (Rondón y Reyes, 2015). Estos desechos impactan negativamente el ambiente, contaminando principalmente el aire de la atmósfera, ya que por lo general son almacenados (generando focos de infección), incinerados al aire libre o utilizados como fuente de energía alterna (Rondón y Reyes, 2015).

### Antecedentes sobre asfalto-GCR

Modificar asfaltos es una técnica ampliamente utilizada en el mundo para mejorar la respuesta de asfaltos y mezclas asfálticas (Rondón y Fernández, 2014; Rondón, Sánchez y Castaño, 2014). La tecnología de modificar materiales asfálticos con caucho no es reciente. En la década de 1840 aparece en Inglaterra la primera patente de un ligante asfáltico modificado con caucho natural. En la década de 1960, Charles H. MacDonald descubrió con éxito una forma exitosa de incorporar grano de caucho reciclado de llanta (GCR) al asfalto, y a dicha mezcla la denominó *asfalto-caucho*. Una descripción histórica sobre el tema de asfaltos y mezclas modificadas con GCR puede ser consultada en Carlson y Zhu (1999). De acuerdo con Rondón y Reyes (2015), el tamaño de las partículas de GCR para ser utilizado como modificador de asfalto debe ser menor a 6,3 mm (Rondón y Reyes, 2015). Para modificar el asfalto con GCR se

emplean por lo general dos técnicas: i) por vía húmeda, el GCR es adicionado al asfalto a alta temperatura; ii) por vía seca, el GCR reemplaza parte del agregado pétreo dentro de la mezcla. En la actualidad, Colombia cuenta con las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (Invías) (2013, artículo 413-13) para la caracterización de cementos asfálticos (CA) modificados con GCR, la cual se basa en la ASTM D-6114. Para el caso de Bogotá D.C., la ciudad cuenta con una especificación para la “aplicación de grano de caucho reciclado (GCR) en mezclas asfálticas en caliente (vía húmeda)” según especificación del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) (2011, artículo 560-11). En ambas especificaciones se describen los objetivos, los alcances, los tipos de materiales, las condiciones para el recibo de los trabajos, la forma de producción del asfalto-caucho y la forma de medida y pagos entre otros aspectos.

Algunas ventajas de utilizar GCR para la modificación de asfaltos y mezclas asfálticas son: i) aumento en la resistencia a la fatiga y al ahuellamiento (Dong y Tan, 2011; Hsu, Chen y Hung, 2011; Punith *et al.*, 2012); ii) incremento de la resistencia al envejecimiento (Huang, 2008; Dong y Tan, 2011; Punith, Xiao y Amirkhanian, 2011); iii) aumento de la resistencia al agrietamiento por bajas temperaturas (Choubane, Sholar, Musselman y Page, 1999; Huang, Bird y Heidrich, 2007; Khodary, 2010); iv) menor susceptibilidad térmica (Othman, 2006; Khodary, 2010; Dong y Tan, 2011); v) incremento en la resistencia al daño por humedad (Dong y Tan, 2011; Punith, Xiao y Amirkhanian, 2011); vi) mayor resistencia del asfalto modificado al calor (IDU y Universidad de los Andes, 2002, 2005); vii) incremento en la recuperación elástica del asfalto bajo carga (Huang, 2008; Khodary, 2010); viii) disminución del ruido de rodadura (Putman, 2005; Anderson, Pierce, Uhlmeier y Weston, 2008; Wang, Chang, Xing y Xing, 2009); ix) mejoramiento de las propiedades reológicas (Huang, 2008; Kumar, Mehndiratta y Singh, 2010; Punith, Xiao y Amirkhanian, 2011); x) generan capas asfálticas de mayor durabilidad y

menor necesidad de mantenimiento en proyectos viales (Wang y Zeng, 2006; Cooper, Mohamad y Abadie, 2007; Lee, Amirkhanian, Putman y Kim, 2007); xi) disminuyen el impacto ambiental negativo que producen las llantas (Huang, Bird y Heidrich, 2007; Wang *et al.*, 2009; Xiao y Amirkhanian, 2009). Algunas desventajas de utilizar GCR para modificar asfaltos son: i) incrementan la viscosidad del ligante generando un aumento en la temperatura de mezcla y compactación (Bahia y Davies, 1994); ii) la modificación del CA con el GCR se realiza a temperaturas elevadas (entre 175 y 200 °C), produciendo un aumento en el uso de energía y combustibles durante la fabricación de la mezcla (Dong y Tan, 2011), iii) hay necesidad de comprar un equipo de modificación para mezclar el asfalto con el GCR y almacenarlo, lo que incrementa el costo inicial de la mezcla; iv) en ciertos casos, el caucho capta parte de los aceites del asfalto, lo que afecta las propiedades de adherencia y cohesión (Peralta *et al.*, 2010).

### Mezclas asfálticas drenantes

En Colombia estas mezclas son conocidas como MD de acuerdo con INVIAS (2013, artículo 453-13). Son mezclas cuyo porcentaje de vacíos es lo suficientemente alto (entre 20-25 %) para permitir que se filtre el agua de lluvia con rapidez y evacuarla hacia las obras de drenaje de la vía, evitando el fenómeno de hidropneumático y encharcamiento en las vías. Adicionalmente, son mezclas que por su alta porosidad generan una textura superficial rugosa, adecuada para que la fricción entre el neumático de los vehículos con la rasante del pavimento sea alta, contribuyendo a la disminución en los niveles de accidentalidad de las vías. Son mezclas utilizadas para conformar la capa de rodadura en la capa asfáltica. El cemento asfáltico empleado es modificado con polímeros (Rondón y Reyes, 2015). El diseño de este tipo de mezcla se ejecuta por medio del método y ensayo Cántabro (ASTM D7064). En este, se evalúa la resistencia al desgaste por abrasión y a la disgregación, las briquetas

o muestras son cilíndricas del tipo Marshall, compactadas a 50 golpes por cara, y se siguen los lineamientos especificados en INV. E-760-13, NLT 352/00.

Modificar mezclas porosas con el fin de transformar y mejorar sus propiedades mecánicas (especialmente en vías sometidas a climas de alta temperatura y tráfico pesado) ha sido recomendado ampliamente hace ya varios años (Ruiz, Alberola, Pérez y Sánchez, 1990; Álvarez, Martín y Estakhri, 2011). A continuación se presentan algunos estudios ejecutados sobre mezclas asfálticas drenantes o porosas modificadas con GCR o elastómeros. Cetin (2013), en un estudio sobre una mezcla asfáltica porosa modificada con GCR, reporta que el tamaño de las partículas de GCR influye sobre la resistencia a la abrasión, al daño por humedad y la rigidez bajo carga cíclica. En términos generales, registra que un incremento en el tamaño y contenido de GCR en la mezcla porosa disminuye su resistencia mecánica y durabilidad. Una conclusión similar la presenta Ibrahim *et al.* (2014), y además mencionan, que esta disminución en la resistencia es más notoria cuando reduce el contenido de asfalto. Según estos últimos investigadores, cuanto mayor sea el contenido de GCR adicionado, mayor debe ser la cantidad de asfalto necesario para optimizar el comportamiento de una mezcla asfáltica porosa, especialmente si el GCR presenta tamaño de partícula gruesa. Lo anterior puede ser explicado a partir de los resultados reportados por Katman *et al.* (2005). Estos investigadores reportaron una disminución en la resistencia a la abrasión cuando se modificó por vía húmeda una mezcla porosa. Según ellos, el GCR absorbe parte de la cantidad de ligante que se necesita para cubrir adecuadamente el agregado pétreo, disminuyendo la adherencia entre el ligante y dicho agregado, la resistencia al daño por humedad y al fenómeno de *stripping*. Partl, Pasquini, Canestrari y Virgili (2010) modificaron dos mezclas porosas con un polímero elastomérico (estireno-butadieno-estireno, SBS) y reportaron, con base en ensayos de laboratorio y un modelo de

daño, una mayor resistencia al fenómeno de fatiga de estas mezclas en comparación con las convencionales (sin modificar). Cao *et al.* (2011) también reportan, a partir de ensayos de tracción indirecta, deformación permanente y fatiga, un mejor comportamiento de las mezclas porosas cuando se modifican con un polímero elastomérico. Hsu, Cheng y Hung (2011) reportan un incremento en la resistencia a la deformación permanente y la rigidez bajo carga cíclica de mezclas porosas cuando se modifican con caucho. Tahmoressi (2001) en la evaluación de cinco vías pavimentadas a escala real en el estado de Texas (USA) con mezcla asfáltica porosa, registró un mejor comportamiento (especialmente en la resistencia al agrietamiento) de dichas mezclas cuando se modifican con GCR. Por otro lado, estas mezclas son utilizadas cuando se quiere disminuir el ruido de rodadura (Nelson y Abbott, 1990; Lu y Harvey, 2011).

## OBJETIVO DEL ESTUDIO

La mayor parte de los estudios ejecutados sobre modificación de mezclas asfálticas con GCR han sido realizados sobre mezclas de concreto asfáltico o del tipo denso y en caliente. En comparación con este último, se han realizado pocos estudios sobre modificación de mezclas drenantes o porosas modificadas con GCR. A pesar que se han ejecutado diversas investigaciones sobre el tema de estudio, la discusión sobre la eficacia de emplear GCR para fabricar mezclas drenantes no ha finalizado. Por consiguiente, los resultados de la presente investigación ayudan a que se profundice en la discusión. El objetivo del presente estudio fue evaluar la resistencia al desgaste por abrasión, la resistencia bajo carga monotónica y la rigidez bajo carga cíclica que desarrolla una mezcla asfáltica drenante cuando se modifica por vía húmeda el asfalto con un residuo de llanta triturada GCR. Las mezclas fueron elaboradas empleando como asfalto base, cemento asfáltico normalizado tipo CA 60-70, residuo de llanta triturada con tamaño máxima de partícula de 0,6 mm y granulometría

de material pétreo acorde con la especificación Invías (2013, artículo 453-13) para la elaboración de mezclas drenantes. A diferencia de otros estudios al respecto, en el presente se evaluó el efecto de la temperatura de mezcla entre el asfalto y el GCR (vía húmeda de modificación), y entre el asfalto ya modificado y el agregado pétreo (temperatura de mezcla y de compactación).

## METODOLOGÍA

### Caracterización de materiales

En la tabla 1 se presentan los resultados de los ensayos ejecutados para caracterizar el agregado pétreo utilizado para la fabricación de las mezclas drenantes. Se observa en dicha tabla que los

materiales pétreos cumplen los requisitos mínimos de calidad exigidos por la especificación Invías (2013, artículo 453-13) para mezclas drenantes. Los resultados de los ensayos ejecutados sobre el cemento asfáltico normalizado CA 60-70 se evaluaron en condiciones normales (sin modificar), y modificado con la llanta triturada GCR (tabla 2). La relación GCR/CA presentada en la tabla 2 es en peso. Se reporta un incremento notable en la rigidez cuando se aumenta el contenido de GCR en el asfalto (incremento en el punto de ablandamiento y disminución de la penetración). El GCR que se utilizó presenta un tamaño inferior a 0,6 mm (tamiz No. 30), libre de metal, fibras textiles u otros contaminantes, como lo refiere las especificaciones técnicas del IDU (2011, artículo 560-11) e Invías (2013, artículo 413-13).

**Tabla 1.** Resultados de ensayos sobre materiales pétreos

Ensayo	Especificación	Resultado	Valor especificado
Humedad	INV. E-122-13	1,49 %	-
Desgaste Micro-Deval	INV. E-238-13	8,97 %	20 % máximo
Caras fracturadas en los agregados	INV. E-127-13	95 %	(85/70), 1 cara/2 caras
Sanidad frente al ataque de sulfatos	INV. E-220-13	0,63 %	12 % máximo
10 % de finos (valor en seco)	INV. E-224-13	140 kN	110 kN mínimo
Equivalente de arena	INV. E-133-13	55,13 %	50 % mínimo
Índice de alargamiento	INV. E-230-13	7 %	-
Índice de aplanamiento	INV. E-230-13	18 %	-

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 2.** Resultados de ensayos sobre CA 60-70 sin modificar y modificado con GCR

GCR/CA [%]	Ductilidad [cm], AASHTO T 51	Punto de ignición [°C], ASTM D-92	Punto de ablandamiento [°C], AASHTO T 53	Penetración [0.1 mm], AASHTO T 49
0	141,7	315,56	44	59,5
10	50,7	287	45,5	50,7
12	40,0	289	48	47,7
15	28,3	285	50,5	40,7
17,5	17,7	289	51	33,0
20	11,3	301	53,5	28,0

Fuente: elaboración propia

## Determinación del porcentaje óptimo de GCR en el asfalto

Se realizaron combinaciones de CA 60-70 con diferentes porcentajes de GCR/CA=10 %, 12 %, 15 %, 17,5 % y 20 % con respecto al peso por vía húmeda. La combinación del asfalto (CA 60-70) con el GCR se realizó teniendo en cuenta los parámetros presentados en la tabla 3 (basados en los establecidos por la especificación IDU, 2011).

Con el fin de realizar el diseño de la mezcla asfalto-GCR, se ejecutaron ensayos de viscosidad (tabla 4) empleando un viscosímetro rotacional (AASHTO T 316). De acuerdo con los resultados de las viscosidades mostrados en la tabla 4, se tomó como contenido óptimo de GCR en peso a adicionar al asfalto 17 %, ya que está dentro de los parámetros establecidos por la especificación Invías (2013, artículo 413-13): i) viscosidad 1,5 y 3,0 Pa-s; ii) penetración entre 40 y 60 décimas de mm; iii) punto de ablandamiento máximo de 55 °C.

## Diseño experimental

La granulometría base utilizada para la fabricación de las mezclas asfálticas drenantes MD convencional (sin aditivo, GCR/CA=0 %) y modificadas MD-M (GCR/CA=17 %) se presenta en la tabla 5 (Invías, 2013, artículo 453-13).

La fase experimental para evaluar la respuesta mecánica de las mezclas MD-M se dividió en dos etapas:

*Etapa 1.* Inicialmente se evaluó la resistencia al desgaste por abrasión de la mezcla MD convencional y la modificada MD-M ejecutando ensayos Cántabro (ASTM D7064, INV. E-760-13). Este ensayo fue realizado teniendo en cuenta que es el utilizado para el diseño de mezclas asfálticas drenantes. Ambos tipos de mezclas (MD y MD-M) fueron fabricadas empleando contenidos de asfalto CA=4,0 %, 4,5 % y 5,0 %. De acuerdo con la especificación ASTM D 6925, la viscosidad de laboratorio recomendada para obtener la temperatura de fabricación de mezclas asfálticas del tipo

**Tabla 3.** Mezcla del asfalto con el GCR

GCR/CA [%]	Temperatura de mezcla [° C]	Tiempo de mezcla [minutos]
10	160	55
12	160	55
15	160	55
17,5	165	60
20	165	60

**Fuente:** elaboración propia

**Tabla 4.** Resumen de resultados de viscosidad para diferentes GCR/CA

GCR/CA [%]	Viscosidad [Pa-s]
0	0,12
10	0,46
15	0,64
17,5	1,85
20	3,54

**Fuente:** elaboración propia

**Tabla 5.** Granulometría para mezclas drenantes

Tamiz		Porcentaje que pasa
Normal	Alterno	MD y MD-M
19,0 mm	3/4"	100
12,5 mm	1/2"	85
9,5 mm	3/8"	62,5
4,75 mm	No. 4	23,5
2,00 mm	No. 10	14,5
425 mm	No. 40	8,5
75 mm	No. 200	5

**Fuente:** elaboración propia.

abierta o porosa es, por lo general, aquella donde el ligante alcance una viscosidad entre 700 cp y 900 cp. Para el caso de asfaltos modificados este requisito no es confiable, debido en gran medida a que el comportamiento de estos materiales es fuertemente dependiente de la velocidad de corte (fluido no newtoniano) y las temperaturas reportadas en muchas ocasiones son altas y no realistas (West, Watson, Turner y Casola, 2010; Zoorob, Castro y



Pereira, 2012) degradando, a dichas temperaturas, las propiedades originales del ligante al oxidarlo y envejecerlo. Adicionalmente genera problemas de emisiones contaminantes a la atmósfera. Por lo anterior, las mezclas convencionales fueron elaboradas a 130°C entre el asfalto y el material pétreo, con temperatura de compactación (100 °C, 110 °C, 130 °C). Las mezclas con aditivo (GCR) fueron fabricadas por ensayo y error bajo temperaturas de mezcla de 160 °C y 170 °C entre el asfalto modificado y el material pétreo. Así mismo la temperatura de compactación tuvo variaciones de (110 °C, 130°C, 150 °C) para la mezcla de 160 °C, y temperatura de compactación (150 °C, 160 °C, 170 °C) para la mezcla de 170 °C.. Por cada porcentaje de asfalto, temperatura de mezcla y temperatura de combinación entre el asfalto y el GCR fueron fabricadas cinco briquetas para la realización del ensayo Cántabro. Las mezclas se compactaron a 50 golpes por cara y cada briqueta presentaba una masa de 1000 g siguiendo los lineamientos establecidos por Invías (2013, artículo 453-13). Ejecutando el ensayo Cántabro, se determinaron las pérdidas por desgaste por abrasión en la máquina de los ángeles en seco y en húmedo (estas últimas sumergidas durante 24 horas a 60 °C en baño maría).

*Etapa 2.* Con los resultados del ensayo Cántabro se establecieron el contenido óptimo de asfalto, las temperaturas de mezcla y temperatura de combinación entre el asfalto y el GCR. Para establecer los parámetros mencionados anteriormente se utilizaron los criterios establecidos por Invías (2013) para el diseño de mezclas drenantes: i) los vacíos con aire de la mezcla (AASHTO T 269) no deben ser inferiores al 20 % y superiores al 25 %; ii) la pérdida por desgaste en el ensayo cántabro (NLT 352, ASTM D7064, INV. E-760-13) no debe ser superior al 25 % en seco; iii) el tiempo que tardan 100 ml de agua en atravesar la muestra no deberá exceder 15 segundos; iv) el porcentaje de asfalto no debe ser inferior al 4,5 % con respecto al peso de los agregados. Lo anterior con el fin de fabricar nuevas briquetas de 1000 g compactadas

a 50 golpes por cada cara (cinco por cada contenido de asfalto CA=4,0 %, 4,5 % y 5,0 % y GCR/CA=17 % en peso) para evaluar la resistencia bajo carga monotónica a través del ensayo Marshall (AASHTO T 245-97, 2004), y la rigidez bajo carga cíclica mediante la determinación del módulo resiliente (AASHTO TP31) a tres temperaturas (10 °C, 20 °C y 30 °C) y frecuencias de carga (2,5 Hz, 5 Hz y 10 Hz). Cada ensayo de módulo resiliente fue realizado sobre nueve muestras (tres por cada temperatura) fabricadas de la misma forma como se manufacturaron las briquetas para los ensayos Cántabro y Marshall.

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

En las figuras 1-3 se presentan los resultados del ensayo Cántabro realizados sobre las mezclas drenantes convencional MD (sin aditivo, GCR/CA=0 %) y modificada MD-M (GCR/CA=17 %). Para el caso de la mezcla asfáltica drenante MD convencional (figura 1) se observa que la mayor resistencia al desgaste por abrasión en seco lo experimenta cuando se fabrica con un contenido de asfalto CA=5,0 %. En este porcentaje de asfalto, las mezclas desarrollan un desgaste por abrasión inferior al máximo especificado por Invías (2013) de 25 % para cualquier temperatura de mezcla utilizada. Este criterio de máximo desgaste por abrasión lo cumple adicionalmente la mezcla convencional cuando es fabricada a temperatura de 130 °C para cualquier porcentaje de asfalto empleado, y con un porcentaje de asfalto de 4,5 % y temperaturas de mezcla de 110 °C y 130 °C. Para el caso del desgaste por abrasión bajo condición húmeda se observa que la mayor resistencia la experimenta la mezcla fabricada con un contenido de asfalto CA=4,5 % bajo temperatura de mezcla de 130 °C (pérdida en húmedo de 64,56 %). Este valor es superior al máximo exigido por la especificación Invías (2013) de 45 % para el diseño de mezclas MD. En síntesis, para el caso de la mezcla asfáltica convencional, el mejor comportamiento al desgaste por abrasión lo desarrolla la mezcla fabricada

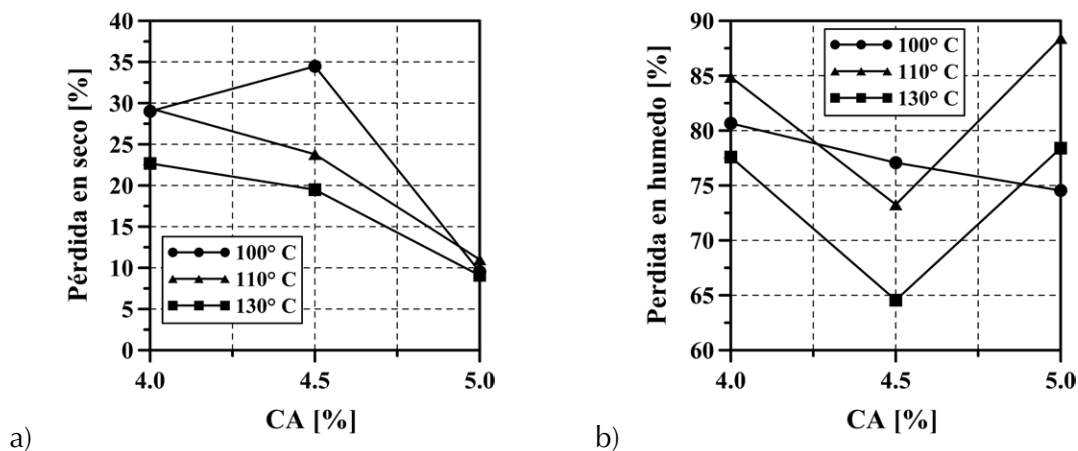
bajo temperatura de mezcla de 130 °C y contenido de asfalto CA=4,5 %.

Para el caso de las mezclas drenantes modificadas con GCR (MD-M) y fabricadas combinando el asfalto y el material pétreo a 160 °C, se observa una disminución notable de la resistencia al desgaste por abrasión en seco y húmedo cuando se comparan con las mezclas de control convencionales MD (figura 2). Tan solo las mezclas MD-M con contenido de asfalto CA=5,0 % cumplen el requisito mínimo de desgaste por abrasión en seco requerido por Invías (2013), y la resistencia bajo condición húmeda disminuye ostensible. Contrario a lo anterior, cuando en las mezclas MD-M se combina el asfalto y el material pétreo a 170 °C, la resistencia al desgaste por abrasión en seco y húmedo aumenta con respecto a la de control MD (figura 3). Para un contenido de asfalto CA=4,5 % (mínimo exigido por Invías, 2013), el mejor comportamiento al desgaste por abrasión en seco y húmedo lo desarrolla la mezcla MD-M fabricada bajo temperatura de mezcla de 170 °C con una compactación de 160 °C (disminución de 31 % y 10 % en las pérdidas por desgaste por abrasión en seco y húmedo respectivamente). Lo anterior indica que el GCR requiere de altas temperaturas para poderse mezclar con el asfalto. En síntesis, la

mejor respuesta de las mezclas se reporta cuando aumenta la temperatura en la cual se combinan los elementos constituyentes: asfalto-GCR-agregados pétreos (temperatura de mezcla de 170° C entre el asfalto modificado y material pétreo, a una temperatura de compactación de 160°C). Lo anterior se debe principalmente a que el asfalto en combinación con el GCR incrementa la viscosidad del ligante base, requiriendo mayores temperaturas para alcanzar un estado de fluidez óptimo que le permita adherirse mejor al agregado pétreo (manejabilidad y compactabilidad de la mezcla).

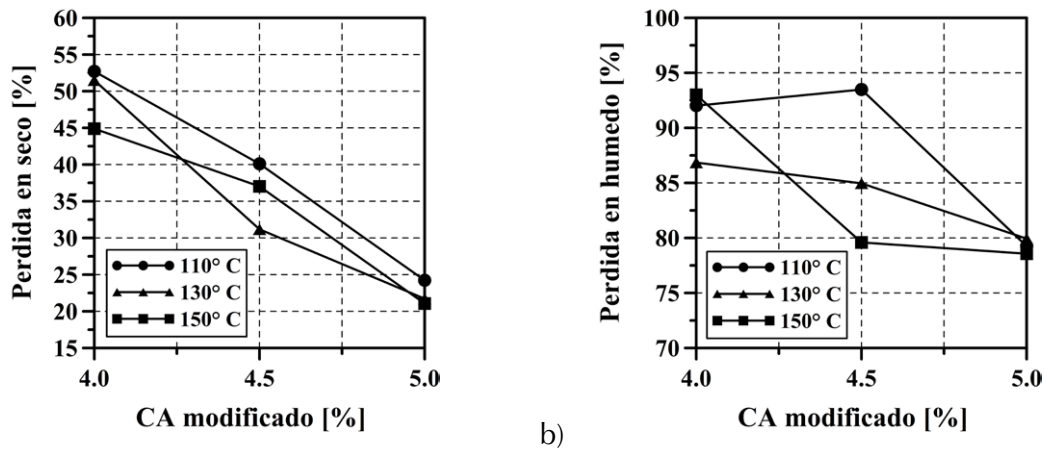
### Ensayo de resistencia bajo carga monotónica (Marshall)

Para la ejecución del ensayo Marshall se fabricaron briquetas con contenidos de CA=4,5 %, GCR/CA=17 %, temperatura de combinación entre el asfalto y GCR de 170 °C y de mezcla con el agregado pétreo de 170 °C. Estos parámetros fueron escogidos teniendo en cuenta los resultados anteriormente presentados de desgaste por abrasión en el ensayo Cántabro y los criterios redactados en el capítulo de metodología. En la tabla 6 se presentan los resultados obtenidos de la prueba de resistencia bajo carga monotónica (Marshall). Se reporta



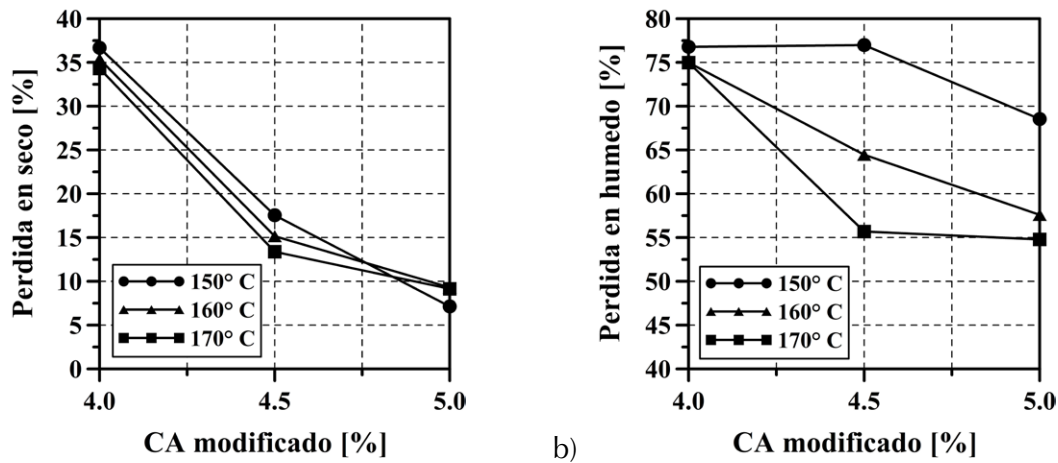
**Figura 1.** Desgaste por abrasión en mezclas drenantes convencionales (sin aditivo GCR) variando la temperatura de compactación

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 2.** Desgaste por abrasión en mezclas drenantes con aditivo GCR variando temperaturas de compactación. Temperatura de mezcla entre asfalto modificado con (GCR) y material pétreo: 160° C.

Fuente: elaboración propia.



**Figura 3.** Desgaste por abrasión en mezclas drenantes con aditivo variando temperaturas de compactación. Temperatura de mezcla entre asfalto modificado con (GCR) y material pétreo: 170° C.

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 6.** Resumen de estabilidad-flujo y relación estabilidad/flujo

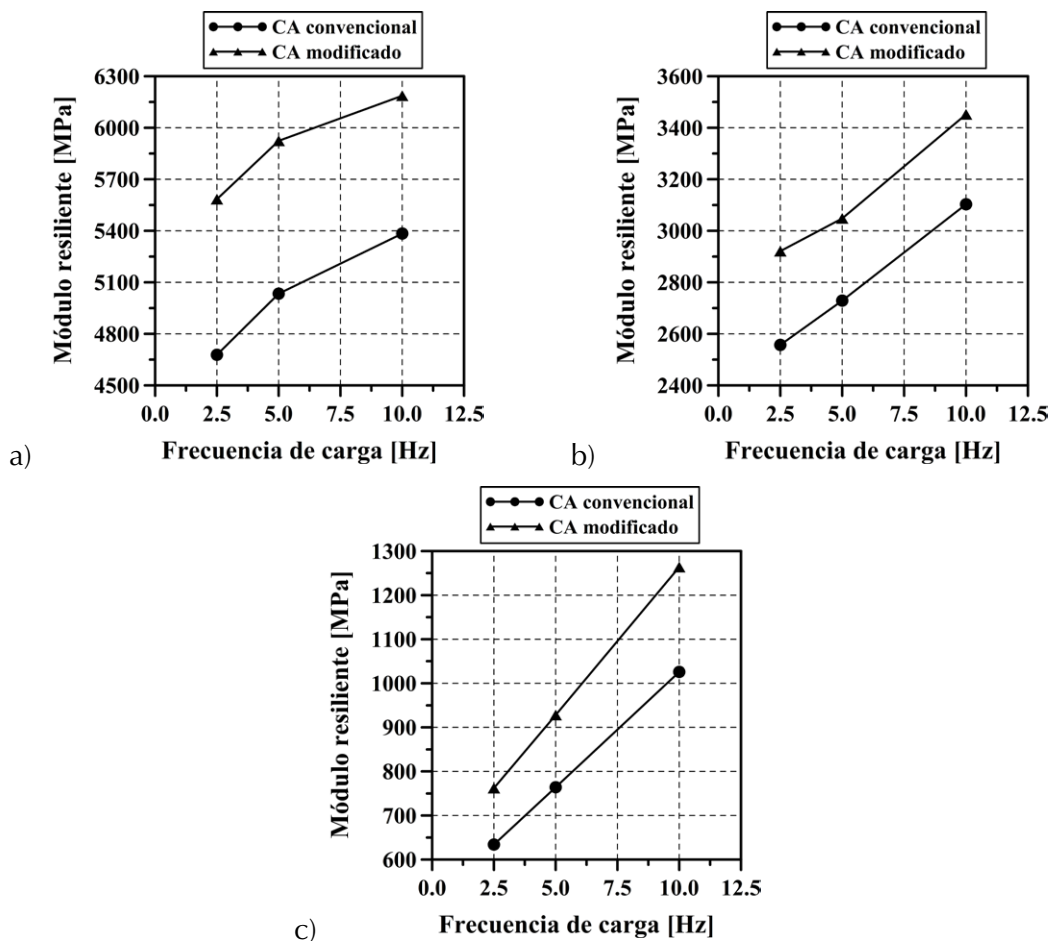
Mezcla	CA [%]	GCR/CA [%]	Flujo [mm]	E [kN]	E/F [kN/mm]
GCR/CA=0%	4,5	0	4,83	38,5	7,98
GCR/CA=17%	4,5	17	4,04	65,5	16,21

Fuente: elaboración propia.

un incremento significativo en la estabilidad (E) y relación estabilidad/flujo (E/F) de la mezcla asfáltica modificada con GCR, lo que induce a pensar que de manera directa la mezcla drenante modificada MD-M es más resistente bajo carga monotónica, y de manera indirecta, más resistente al fenómeno de acumulación de las deformaciones permanentes (ahuellamiento) a altas temperaturas de servicio. El uso de GCR (MD-M) incrementa E y E/F en 70,1 % y 103,1 %, respectivamente, con respecto a la mezcla MD que no lo utiliza. Lo anterior se debe principalmente al incremento en rigidez que desarrolla el asfalto cuando se modifica con el GCR.

## Módulo resiliente

Para la ejecución del ensayo de módulo resiliente también fueron fabricadas briquetas con contenidos de CA=4,5 %, GCR/CA=17 %, temperatura de combinación entre el asfalto y GCR de 170 °C y de mezcla con el agregado pétreo de 170 °C. En la figura 4 se presenta la evolución del módulo resiliente de las mezclas drenantes convencional MD (sin aditivo, GCR/CA=0 %) y modificada MD-M (GCR/CA=17 %). Se observa un incremento típico en los valores de módulo resiliente cuando disminuye la temperatura e incrementa la frecuencia de carga. Adicionalmente se reporta un incremento



**Figura 4.** Módulos resilientes para mezclas MD sin modificar y modificadas con GCR. a) 10 °C; b) 20 °C; c) 30 °C

**Fuente:** elaboración propia.

significativo en la rigidez bajo carga cíclica cuando la mezcla drenante se modifica con GCR. El incremento promedio en el módulo es de aproximadamente 17 % para cualquier temperatura de ensayo. Este incremento en el módulo es debido principalmente a la mayor rigidez y viscosidad que desarrolla el asfalto base cuando se modifica con el GCR.

## CONCLUSIONES

El presente estudio midió la resistencia al desgaste por abrasión, bajo carga monotónica y cíclica que experimentó una mezcla asfáltica drenante cuando se modificó por vía húmeda con GCR. Con el fin de evaluar dichas resistencias, se adelantaron ensayos Cántabro, Marshall y módulo resiliente. A partir de los resultados se concluye:

- El cemento asfáltico base incrementa su viscosidad y rigidez cuando se adiciona GCR por vía húmeda.
- Las temperaturas de mezcla entre el asfalto y el GCR, así como la de mezcla entre el asfalto ya modificado y el agregado pétreo, influyen notoriamente en el comportamiento de la mezcla drenante modificada. Se reporta una disminución notoria en la resistencia al desgaste por abrasión cuando las mezclas drenantes modificadas con GCR son fabricadas a 160° C y su temperatura de compactación es de 150 °C. Sin embargo, cuando se mezcla a 170 °C dicha resistencia incrementa, específicamente para una temperatura de compactación de 160 °C comparados con las mezclas convencionales sin aditivo y un porcentaje de CA del 4,5%.
- La resistencia bajo carga monotónica y la rigidez bajo carga cíclica de la mezcla drenante incrementa significativamente cuando se modifica con GCR.
- El mejor comportamiento de la mezcla analizada se alcanzó cuando se empleó un contenido de asfalto CA=4,5 % en peso, GCR/CA=17 % en peso, temperatura de mezcla entre el asfalto

y el GCR por vía húmeda de 170 °C y temperatura de mezcla entre el asfalto modificado y el agregado pétreo de 170° C, con una temperatura de compactación de 160°C.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, A.E.; Martín, A.E. y Estakhri, C. (2011). A review of mix design and evaluation research for permeable friction course mixtures. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1159–1166.
- Anderson, K.W.; Pierce, L.M.; Uhlmeier, J.S. y Weston, J. (2008). *Evaluation of long-term pavement performance and noise characteristics of open-graded friction courses*. Post Construction and Performance Report, Experimental Feature WA 05-06, Contract 7134, WA-RD 683.1. Washington.
- Bahia, H.U. y Davies, R. (1994). Effect of crumb rubber modifiers CRM on performance-related properties of asphalt binders. *J. Assoc. Asph. Paving Technol.*, 63, 414–449.
- Botero, J.H.; Valentín, M.O.; Suárez, O.M.; Santos, J.; Acosta, F.J.; Cáceres, A. y Pando, M.A. (2005). Gomas trituradas: estado del arte, situación actual y posibles usos como materia prima en Puerto Rico. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 5(1), 69-86.
- Cao, W. (2007). Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process. *Construction and Building Materials*, 21, 1011-1015.
- Cao, W.D.; Yao, Z.Y.; Shang, Q.S.; Li, Y.Y. y Yang, Y.S. (2011). Performance evaluation of large stone porous asphalt-rubber mixture. *Advanced Materials Research*, 150-151, 1184–1190.
- Carlson, D.D. y Zhu, H. (1999). *Asphalt-Rubber—An anchor to crumb rubber markets*. Third Joint UNCTAD/IRSG Workshop on Rubber and the Environment. Veracruz, México: International Rubber Forum.
- Cetin, A. (2013). Effects of crumb rubber size and concentration on performance of porous asphalt mixtures. *International Journal of Polymer Science*, ID789612, 1-10.

- Choubane, B.; Sholar, G.A.; Musselman, J.A. y Page, G.C. (1999). Ten-year performance evaluation of asphalt-rubber surface mixes. *Transportation Research Record*, 1681, 10-18.
- Cooper, S.B. Jr.; Mohammad, L.N. y Abadie, C. (2007). *Evaluation of field projects using crumb rubber modified asphaltic concrete*. Report No. FHWA/LA.04/393, LTRC. Louisiana: Louisiana State University.
- Dong, Y. y Tan, Y. (2011). Mix design and performance of crumb rubber modified asphalt SMA. *Geotechnical Special Publication*, 212, ASCE, 78-86.
- Hsu, T.; Chen, S. y Hung, K. (2011). Performance evaluation of asphalt rubber in porous asphalt-concrete mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(3), 342-349.
- Hsu, T.W. y Tseng, K.H. (1996). Effect of rest periods on fatigue response of asphalt concrete mixtures. *Journal of Transportation Engineering*, 122(4), 316-322.
- Huang, S.C. (2008). Rubber concentrations on rheology of aged asphalt binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(3), 221-229.
- Huang, Y.; Bird, R.N. y Heidrich, O. (2007). A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(1), 58-73.
- Ibrahim, M.R.; Katman, H.Y.; Karim, M.R.; Koting, S. y Mashaan, N.S. (2014). The effect of crumb rubber particle size to the optimum binder content for open graded friction course. *The Scientific World Journal*, ID 240786, 1-8.
- Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) (2011). *Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y de espacio público para Bogotá D.C.* Bogotá D.C.
- Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) y Universidad de los Andes (septiembre de 2002). *Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas*. Informe Final. Bogotá D.C.
- Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) y Universidad de los Andes (2005). *Segunda fase del estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas – Pista de prueba*. Reporte Final, Contrato IDU – 306 – 003.
- Instituto Nacional de Vías (Invías) (2013). *Especificaciones generales para construcción de carreteras*. Bogotá D.C.
- Katman, H.Y.; Karim, M.R.; Mahrez, A. e Ibrahim, M.R. (2005). Performance of wet mix rubberised porous asphalt. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 5, 695-708.
- Khodary, M.H.F. (2010). *Evaluation of fatigue resistance for modified asphalt concrete mixtures based on dissipated energy concept*. Darmstadt: Technische Universität.
- Kumar, P.; Mehndiratta, H.C. y Singh, K. (2010). Comparative study of rheological behavior of modified binders for high-temperature areas. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(10), 978-984.
- Lee, S.J.; Amirhanian, S.N.; Putman, B.J. y Kim, K.W. (2007). Laboratory study on the effects of compaction on the volumetric and rutting properties of CRM asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(12), 1079-1089.
- Lu, Q. y Harvey, J. (2011). Laboratory evaluation of open-graded asphalt mixes with small aggregates and various binders and additives. *Transportation Research Record*, 2209, 61–69.
- Magalhães, J.H. y Soares, J.B. (diciembre de 2003). The effect of crumb rubber gradation and binder-rubber interaction time on the mechanical properties of asphalt-rubber mixtures (dry process). En: *Asphalt Rubber Conference Papers*. Brasilia, Brasil.
- Nelson, P.M. y Abbott, P.G. (1990). Acoustical performance of previous Macadam surfaces for high-speed roads. *Transportation Research Record*, 1265, 25–33.
- Neto, S.A.D.; Farias, M.M.; Pais, J.C.; Pereira, P. y Picado Santos, L. (diciembre de 2003). Properties of asphalt-rubber binders related to characteristics of the incorporated crumb rubber. En: *Asphalt Rubber Conference* (pp. 1-13). Brasilia, Brasil.
- Othman, A. (2006). Fracture resistance of rubber-modified asphaltic mixtures exposed to high-temperature cyclic aging. *Journal of Elastomers and Plastics*, 38, 19-30.
- Partl, M.N.; Pasquini, E.; Canestrari, F. y Virgili, A. (2010). Analysis of water and thermal sensitivity of

- open graded asphalt rubber mixtures. *Construction and Building Materials*, 24(3), 283–291.
- Peralta, J.; Silva, H.M.R.D.; Machado, A.V.; Pais, J.; Pereira, P.A.A. y Sousa, J.B. (2010). Changes in rubber due to its interaction with bitumen when producing asphalt rubber. *Road Materials and Pavement Design*, 11(4), 1009–1031.
- Punith, V.S.; Xiao, F. y Amirkhanian, S.N. (2011). Effects of moist aggregates on the performance of warm mix asphalt mixtures containing non-foaming additives. *Journal of Testing and Evaluation*, 39(5), 1-11.
- Punith, V.S.; Suresha S.N.; Sridhar, R.; Sunil, B. y Veeraragavan, A. (2012). Laboratory investigation of open-graded friction course mixtures containing polymers and cellulose fibers. *Journal of Transportation Engineering*, 138(1), 67-74.
- Punith, V.S.; Xiao, F. y Amirkhanian, S.N. (2011). Effects of moist aggregates on the performance of warm mix asphalt mixtures containing non-foaming additives. *Journal of Testing and Evaluation*, 39(5), 1-11.
- Putman, B.J. (2005). *Qualification of the effects of crumb rubber in CRM binder*. Ph.D. Disertación. Carolina del Sur, EE.UU.: Clemson University.
- Rondón, H.A. y Reyes, F.A. (2015). *Pavimentos – Materiales, Construcción y Diseño*. Bogotá: Editorial ECOE.
- Rondón, H.A. y Fernández, W. (2014). Mechanical resistance of a chemically-modified warm mix asphalt. *Revista Tecnura, Special Edition Doctorate*, 18, 97-108.
- Rondón, H.A.; Sánchez, E.H. y Castaño, J.O. (2014). Resistencia bajo carga monotónica de mezclas de concreto asfáltico modificadas con gilsonita por vía seca. *Revista Tecnura, Edición especial*, 18, 31-37.
- Ruiz, A.; Alberola, R.; Perez, F. y Sánchez, B. (1990). Porous asphalt mixtures in Spain. *Transportation Research Record*, 1265, 87–94.
- Shen, J.; Amirkhanian, S.N. y Lee, S.J. (2007). HP-GPC characterization of rejuvenated aged CRM binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(6), 515-522.
- Singh, S.; Nimmo, W.; Gibbs, B.M. y Williams, P.T. (2009). Waste tyre rubber as a secondary fuel for power plants. *Fuel*, 88(12), 2473-2480.
- Tahmoressi, M. (2001). *Evaluation of asphalt rubber pavements in Texas*. Rubber Pavements Association Report. Tempe, Arizona.
- Wang, L.; Chang, C.Q.; Xing, Y. y Xing, Y.M. (2009). Viscoelastic mechanical properties of crumb rubber modified asphalt mixture. En: *ICCTP 2009: Critical Issues in Transportation Systems Planning, Development, and Management, ASCE*, 2153-2158.
- Wang, J.C. y Zeng, X. (2006). Influence of temperature and pressure on the dynamic properties of rubber-modified asphalt concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(1), 125-131.
- West, R.C.; Watson, D.E.; Turner, P.A. y Casola, J.R. (2010). *Mixing and compaction temperatures of asphalt binders in hot-mix asphalt*. NCHRP Report 648. Washington D.C: TRB.
- Xiao, F. y Amirkhanian, S.N. (2009). HP-GPC Approach to evaluating laboratory prepared long-term aged rubberized asphalt binders. En: *GeoHunan International Conference 2009, Geotechnical Special Publication*, 191, 42-48.
- Zhong, X.G.; Zeng, X. y Rose, J.G. (2002). Shear modulus and damping ratio of rubber-modified asphalt mixes and unsaturated subgrade soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(6), 496-502.
- Zoorob, S.E.; Castro, J.P. y Pereira, L.A. (2012). Assessing low shear viscosity as the new bitumen softening point test. *Construction and Building Materials*, 27(1), 357–367.





## Ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes tomadas con sistemas UAV

### Orthomosaics and digital elevation models generated from images taken with UAV systems

Jesús Orlando Escalante Torrado<sup>1</sup>, Jhon Jairo Cáceres Jiménez<sup>2</sup>, Hernán Porras Díaz<sup>3</sup>

**Fecha de recepción:** 8 de febrero de 2016

**Fecha de aceptación:** 10 de septiembre de 2016

**Cómo citar:** Escalante T., J.O.; Cáceres J., J.J. y Porras D., H. (2016). Ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes tomadas con sistemas UAV. *Revista Tecnura*, 20(50), 119-140. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a09

#### RESUMEN

**Contexto:** Actualmente, los vehículos aéreos no tripulados (UAV por su sigla en inglés) son una de las herramientas tecnológicas de mayor investigación y aplicación en áreas como la fotogrametría aérea y de percepción remota, presentándose como una importante alternativa para la captura de imágenes de alta resolución espacial y temporal. Sin embargo, las características de vuelo, de las imágenes y de los sensores utilizados en los UAV generan grandes desafíos en el procesamiento tradicional para la generación de productos cartográficos como modelos digitales de elevación y ortomosaicos, por lo que se requiere de la identificación de nuevas estrategias de procesamiento.

**Método:** En el presente artículo se realiza una revisión bibliográfica de las principales características de los UAV empleados en fotogrametría aérea junto con las estrategias de procesamiento afines que actualmente se están empleando en áreas como visión por computador y fotogrametría.

**Resultados:** A partir de la revisión se observa que las estrategias de procesamiento en el área de visión por computador son más afines con la información capturada con los sistemas UAV para la generación de modelos digitales de elevación y ortomosaicos.

**Conclusiones:** Los adelantos tecnológicos de los sistemas UAV y los avances en las estrategias de procesamiento de grandes volúmenes de datos seguirán impulsando la investigación y aplicación de estos sistemas en áreas como la fotogrametría y visión por computador, para la generación de productos cartográficos de mayor precisión.

**Palabras Clave:** imágenes aéreas, MDE, nube de puntos, ortomosaicos, UAV.

#### ABSTRACT

**Context:** Nowadays, Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are among the technological tools most researched and applied in areas such as aerial photogrammetry and remote sensing, presenting itself as an important alternative for capturing imagery with

- 1 Ingeniero civil, estudiante de Maestría en Ingeniería Civil, investigador Grupo Geomática, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. Contacto: [jescalto@uis.edu.co](mailto:jescalto@uis.edu.co)
- 2 Ingeniero de sistemas, doctor en Ingeniería Civil y Costera, docente e investigador de la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. Contacto: [jcaceres@uis.edu.co](mailto:jcaceres@uis.edu.co)
- 3 Ingeniero civil, doctor en Ingeniería Telemática, director Grupo Geomática, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. Contacto: [hporras@uis.edu.co](mailto:hporras@uis.edu.co)



high spatial and temporal resolution. However, UAV flight parameters, image and sensor characteristics, result on major challenges for traditional processing for producing mapping products such as digital elevation models and orthomosaics, that is why it is required to identify new processing strategies.

**Method:** In this paper, a review of the main characteristics of UAVs used in aerial photogrammetry is done, along with related processing strategies currently being used in areas such as computer vision and photogrammetry.

**Results:** From this review, it is shown that processing strategies in the area of computer vision are

more akin to the information captured with UAV systems for generating digital elevation models and orthomosaics.

**Conclusions:** The technological advances in UAVs systems and advances in strategies for processing large data volumes continue to drive research and application of these systems for the generation of mapping products more accurately in areas such as photogrammetry and computer vision.

**Keywords:** aerial images, DSM, orthomosaic, point clouds, UAV.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente, la comunidad fotogramétrica y de percepción remota establece y promueve el uso de los vehículos aéreos no tripulados o sistemas UAV (por sus siglas en inglés) como una nueva y confiable alternativa de bajo costo para la adquisición de imágenes aéreas (ISPRS, 2004). Estos sistemas que han sido desarrollados y empleados desde finales de los años cincuenta en el campo militar para tareas de reconocimiento, vigilancia y misiones en territorios hostiles, hoy en día forman parte también de actividades civiles de monitoreo, mediciones atmosféricas, evaluación de daños, agricultura, mapeo y cartografía entre otras (Bendea *et al.*, 2008; Chiabrando, Nex, Piatti y Rinaudo, 2011). Por lo general los sistemas UAV se componen de dos elementos principales: una plataforma aérea, equipada con una cámara y un sistema de navegación, y un centro de control en tierra desde donde se programa y monitorea la actividad aérea. Desde el punto de vista de la fotogrametría y de sensores remotos, las grandes ventajas que estos sistemas ofrecen, en comparación con las plataformas tradicionales como satélites y aviones tripulados, tienen que ver con: la obtención de imágenes de alta resolución espacial y temporal, los bajos costos de adquisición y de operación, el uso en

ambientes peligrosos para el ser humano, la ausencia de una tripulación, la respuesta rápida y las pocas restricciones de vuelo en la mayoría de países (Shi, Wang y Xu, 2011; Xiang y Tian, 2011).

Gracias a estas ventajas, los sistemas UAV han cumplido un papel importante en investigación en aspectos tan diversos como: atención de emergencias (Adams y Friedland, 2011; Arthur, Al-Tahir y Davis, 2012), geología (Li, Li y Fan, 2012), arqueología (Chiabrando *et al.*, 2011), agricultura (Xiang y Tian, 2011), ciudades digitales 3D (Xie, Lin, Gui y Lin, 2012) y tráfico urbano (Salvo, Caruso y Scorodo, 2014), entre otros.

Por lo general, las aplicaciones más importantes de sistemas UAV en áreas como la fotogrametría y de percepción remota han sido la generación de productos cartográficos y de modelos tridimensionales. Esto ha sido posible con el aporte de estrategias de procesamiento desarrolladas en áreas como la de visión por computador y de fotogrametría de rango cercano (Hartley y Mundy, 1993). De acuerdo con esto, en el presente artículo se presenta una revisión general de las estrategias que están siendo empleadas para la generación de nubes de puntos, de modelos digitales de elevación y de ortomosaicos a partir del procesamiento de imágenes UAV.

En este documento se presenta un recorrido por las etapas llevadas a cabo en un levantamiento de fotogrametría aérea con sistemas UAV, iniciando con una descripción de la etapa de captura de datos, de los sistemas UAV y de las actividades de planeación de vuelos y adquisición de imágenes. Luego se presenta la revisión de las estrategias de procesamiento que están siendo empleadas e investigadas en torno a las imágenes tomadas con sistemas UAV. En esta sección se hace un recorrido por las etapas de procesamiento identificadas en la bibliografía para la generación de modelos digitales de elevación y ortomosaicos. Por último, se establecen algunas ideas a manera de conclusión.

## RECOLECCIÓN DE DATOS

La recolección de datos para levantamientos de fotogrametría con sistemas UAV consiste en la captura de imágenes aéreas a lo largo de una ruta de vuelo que es ajustada a unos parámetros previamente definidos. En esta sección se lleva a cabo una revisión de las plataformas y sensores, así como de las actividades necesarias para la recolección de datos.

A continuación se presentan las características principales de las plataformas UAV, las ventajas de su uso, los tipos de plataformas existentes, la mención de algunos sensores que están siendo acoplados a las plataformas y las organizaciones asociadas a los sistemas UAV. Más adelante se indican los pasos requeridos en la planeación de un vuelo para la adquisición de imágenes con sistemas UAV.

### Vehículos aéreos no tripulados (UAV)

Los vehículos aéreos no tripulados, o sistemas UAV, también llamados UVS (sistema de vehículo no tripulado) o UAS (sistema de aeronave no tripulada), son aeronaves que vuelan autónomamente a través de un sistema de piloto automático que es monitoreado desde un centro de control en tierra

(Everaerts, 2008). En el Committee of Standards "Lexicon of UAV/ROA Terminology AIAA (2004) (como se citó en Chiabrando *et al.*, 2011) se define los UAV como

[...] aeronaves que están diseñadas o modificadas para no llevar un piloto humano y que son operadas a través de comandos electrónicos iniciados por el controlador de vuelo o por un sistema de control de gestión de vuelo autónomo a bordo que no requiere la intervención del controlador de vuelo (p. 697).

El uso de estas plataformas aéreas tuvo inicio en el campo militar en los años cincuenta con tareas de reconocimiento, vigilancia, mapeo y misiones en territorios hostiles. Sin embargo, los primeros usos en aplicaciones geomáticas tuvo lugar a comienzos de los años ochenta, y solo recientemente los sistemas UAV han llegado a ser de uso común en estas aplicaciones al punto de llegar a ser actualmente una alternativa a las plataformas aéreas tripuladas para la adquisición de imágenes (Nex y Remondino, 2013). Colomina y Molina (2014) presentan tabulada la cantidad de plataformas UAV referenciadas en el periodo 2005-2013 a nivel mundial, notándose el mayor aumento en los temas de producción y desarrollo de plataformas (207 en 2005 a 540 en 2013) y el uso en aplicaciones de uso civil y comercial (55 en 2005 a 247 en 2013).

En el desarrollo de plataformas UAV, una gran cantidad de investigaciones han realizado la captura de datos partir de prototipos UAV no comerciales como el "Pelican" (Marenchino, 2009), el *Quanta-H* y *G* (Berni *et al.*, 2009) o el "NEO S-300" (Kohoutek y Eisenbeiss, 2012). Mientras que en el uso comercial compañías privadas con plataformas más sofisticadas, mencionadas más adelante, ofrecen productos fotogramétricos (modelos digitales de superficie y ortomosaicos) generados a partir de la información recolectada con estos sistemas (Nex y Remondino, 2013).

### Clasificación de plataformas UAV

Actualmente debido a la gran cantidad de plataformas aéreas consideradas UAV, se presentan diferentes maneras para clasificarlas. Estas pueden ser: por tamaño, por capacidad de carga, por altura de vuelo, por autonomía de vuelo o por tipo de misión, entre otras. En el contexto de la adquisición de datos fotogramétricos una clasificación representativa es la de por tipo de plataforma, ya que esta define la forma de vuelo, y por tanto, las áreas más apropiadas de aplicación. De acuerdo con el tipo de plataforma UAV se presentan dos tipos (figura 1): de ala fija o tipo avión (Marenchino, 2009; Vallet, Panissod, Strecha y Tracol, 2012), y multirrotor, de ala rotatoria o tipo helicóptero (Niethammer *et al.*, 2010; Yahyanejad, Quaritsch y Rinner, 2011). Watts, Ambrosia y Hinkley (2012) presentan una revisión amplia de los diferentes modelos de plataformas UAV y el nivel de complejidad de estas, de acuerdo con las áreas de aplicación.

Las ventajas que ofrece cada una de las plataformas dependen del caso de uso. Nizam Tahar y Ahmad (2013) compararon el uso de una plataforma UAV de ala fija y una multirrotor en la generación de un modelo digital de pendientes. En esa investigación se determinó que las mayores diferencias son el menor costo de la plataforma multirrotor, y la leve mejora en la precisión de los resultados de esta plataforma, que en la investigación puede estar asociado a la diferencia de altura en la toma de datos (80 m y 320 m para el UAV multirrotor y el

de ala fija, respectivamente). En tanto que la plataforma de ala fija presentó un menor consumo de tiempo en las etapas de captura y procesamiento de las imágenes, por lo que para el uso mencionado se puede establecer que las dos plataformas son igualmente apropiadas.

Sin embargo, el modo de vuelo de estas dos plataformas determina que para espacios reducidos, registro fotográfico a baja altura o modelamiento 3D de objetos, las plataformas multirrotor son las apropiadas, mientras que el registro de grandes extensiones y vuelos a mediana y gran altura, las plataformas de ala fija presentan mayores ventajas.

Con respecto a cómo se compone un sistema UAV estándar empleado en actividades fotogramétricas, se pueden definir dos elementos principales: una plataforma aérea y un centro de control en tierra, enlazados a través de una señal de radio-comunicación. La plataforma aérea está equipada generalmente con un sistema de navegación o piloto automático que permite la navegación autónoma, siguiendo una ruta de vuelo predefinida por el usuario desde la estación de control en tierra.

Esta navegación autónoma es posible por medio de la integración de un sistema inercial y un sistema GPS en la plataforma aérea, que permiten conocer la postura y posición de esta durante el vuelo. Esta información es enviada en tiempo real a la estación de control desde donde se realiza el seguimiento de la plataforma. En el caso de la ausencia de un sistema de navegación, el uso de un



**Figura 1.** Sistemas UAV para fotogrametría de acuerdo al tipo de vuelo. (Izq) Ala fija, (Der) ala rotatoria o multirrotor.

**Fuente:** (Izq) UAV eBee, Sensefly (2015). (Der) UAV Aibot X6, Aibotix (2015)

control remoto es la única manera de dirigir la plataforma aérea, aunque el control remoto también puede servir como complemento del sistema de navegación en momentos como el despegue y descenso del UAV.

En el caso de plataformas UAV más sofisticadas, actualmente se encuentran sistemas que permiten la vinculación con receptores GNSS como el eBee RTK (Sensefly, 2014), el Gatewing UX5 (Trimble, 2014), en los que la plataforma se conecta a una estación base en tierra y desde esta se transmiten datos de corrección de posición a la plataforma, permitiendo que las imágenes capturadas tengan asociada una posición de alta precisión; la inclusión de cámaras multispectrales como en el eBee Ag (Sensefly, 2014) y el MD4-1000 (Microdrones, 2014) en donde bandas espectrales como el infrarrojo y el infrarrojo cercano son empleadas para agricultura; la transmisión de video en tiempo real como el Aibot X6 (Aibotix, 2014); o la implementación de cámaras giroestabilizadas y de tipo Gimbal como el Zephyr2 UAV (MarcusUAV, 2014). En la tabla 1 se presentan en paralelo las

características más importantes de estas plataformas UAV consideradas comerciales, en donde los aspectos a tener en cuenta son el tipo de plataforma, el tiempo de vuelo y los sensores acoplables.

#### *Organizaciones relacionadas y reguladoras de los sistemas UAV*

Aunque actualmente no existe una reglamentación internacional para el uso y aplicación de los sistemas UAV, organismos nacionales como la Organización Nacional FFA y el Instituto Americano de Aeronáutica y Astronáutica (AIAA), en Estados Unidos, o entidades internacionales como la Organización Europea para la Seguridad de la Navegación Aérea (Eurocontrol), la Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA) y la Organización de Aviación Civil Internacional (ICAO), dirigida por las Naciones Unidas, así como regulaciones nacionales principalmente en países europeos (Nex y Remondino, 2013), se han encargado de definir políticas relacionadas con la seguridad y la incursión de estos sistemas en el espacio aéreo. Por otro lado, organismos como la Sociedad Internacional

**Tabla 1.** Características técnicas de plataformas UAV comerciales para fotogrametría

Características\ UAV	eBee RTK	Gatewing UX5	Zephyr2	MD4-1000	Aibot X6
Plataforma					
Tipo	De ala fija			De ala rotatoria	
Envergadura	96 cm	100 cm	137 cm	103 cm	105 cm
Material	Espuma de Polipropileno expandido (EPP)	EPP, estructura de carbono	Poliéster	Fibra de carbono	Fibra de carbono
Peso	0,73 Kg	2,5 Kg	2,0 Kg	5,50 Kg	3,4 Kg
Tiempo de vuelo	45 min	50 min	60 min	88 min	30 min
Velocidad máx.	36-57 km/h	80 km/h	50-140 km/h	12 km/h	40 km/h
Altura máx.	1000 m	750 m	750	1000 m	1000 m
Precisión	3 – 20 cm	2,0 – 19,5 cm	4 cm	2 – 5 cm	2 cm
Sensores	GNSS, cámara multispectral	GNSS, cámara infrarrojo	Cámara Gimbal, multispectral	Cámara térmica, escáner láser y cámara multispectral	GNSS, Cámara termográfica, multispectral

**Fuente:** elaboración propia.

y la Sociedad Americana de Fotogrametría y Sensores Remotos (ISPRS y ASPRS, por sus siglas en inglés, respectivamente) y la comunidad académica en general, se han encargado de identificar nuevas áreas de investigación y de aplicación, así como de intentar establecer normativas orientadas a definir los estándares de calidad en la toma de información y en los resultados del procesamiento de la información tomada con sistemas UAV.

Por su parte, en Colombia, la Aeronáutica Civil, la autoridad que dicta la reglamentación en la aviación, a través del Reglamento Aeronáutico de Colombia (Aerocivil, 2009) en el numeral 4.25.8.2. Allí se establece que no hay ninguna prohibición en el uso de vehículos aéreos no tripulados para teledetección, fotografía o televisión; sin embargo, su uso debe estar sujeto a las limitaciones impuestas en las actividades de aeromodelismo. No obstante, recientemente a través de la circular reglamentaria No. 002, publicada en el *Diario Oficial No. 49.624* (Aerocivil, 2015) se han definido explícitamente los requisitos de aeronavegabilidad y operación de sistemas UAV en actividades diferentes a las de recreación y deporte.

## Planeación de vuelo y adquisición de imágenes

Esta etapa consiste en definir la región de interés y los parámetros de vuelo para la adquisición de las imágenes. Las plataformas UAV con un sistema de navegación cuentan, en su estación de control en tierra, con un *software* específico para realizar esta etapa. Independientemente del *software* y del tipo de plataforma UAV (tipo avión o tipo helicóptero) los pasos que se siguen para la planeación son básicamente los mismos.

En un vuelo en modo autónomo, la planeación inicia con la definición de una región de interés, generalmente dibujada sobre un mapa base georreferenciado (por ejemplo, Google Earth®). Para el caso de un vuelo en modo manual (maniobrado con control remoto), la definición de la región dependerá de la dirección dada a la plataforma

aérea con el control remoto por parte del operador de vuelo.

Una vez se define la región de interés, es necesario ingresar los parámetros de vuelo y, a partir de esta información, el *software* calcula automáticamente las líneas de vuelo. Los parámetros de vuelo requeridos son: la altura de vuelo o alternativamente el GSD (*ground sample distance*) y los porcentajes de traslape entre imágenes (longitudinal y transversalmente). Para el caso de sistemas UAV los porcentajes de traslape considerados apropiados varían entre 60-80 % o más, según el nivel de detalle requerido. En el caso de la altura de vuelo que está relacionada con el GSD (medido en cm/pixel), alturas grandes generan GSD grandes (menor resolución), mientras que alturas de vuelo bajas generan GSD pequeños (mayor resolución). En la generación de modelos 3D detallados por lo general se requiere de alturas de vuelo bajas y de altos porcentajes de traslape (Nex y Remondino, 2013).

En el caso de vuelos en modo manual, sin sistema de navegación, los valores de altura y porcentajes de traslape quedan a consideración del operador de vuelo a través del control remoto, o a través de la configuración de la cámara para tomar fotos en intervalos de tiempo fijos (Neitzel y Klonowski, 2011).

### *Adquisición de imágenes*

Luego de la etapa de planeación, el siguiente paso es la ejecución del vuelo para la adquisición de las imágenes, esto inicia con el lanzamiento de la plataforma aérea. Las plataformas tipo avión requieren de un lanzamiento manual o por medio de catapultas, mientras que en las plataformas tipo helicóptero o multirrotores el despegue se realiza automáticamente.

Por medio del sistema de navegación la plataforma aérea busca autónomamente el inicio de la ruta de vuelo programada y da inicio a la captura de las imágenes de manera secuencial de acuerdo con los parámetros establecidos. Mientras tanto, en la estación de control en tierra se monitorea el

estado del vuelo y de la plataforma a través de información como tiempo de vuelo, nivel de batería, temperatura e intensidad de la señal de comunicación. Igualmente es posible ajustar los parámetros de vuelo en tiempo real.

Otra de las características que se presenta en la adquisición de imágenes con sistemas UAV es la vinculación de cada foto con los valores de posición y orientación, registrados con los sistemas GPS e inercial en el momento de la captura. Esta es información que puede ser utilizada en las etapas posteriores de procesamiento.

Por otra parte, con respecto a las características de las imágenes capturadas, Turner, Lucieer y Watson (2012) hacen mención de las diferencias fundamentales que presentan las imágenes capturadas con sistemas UAV con respecto a las plataformas aéreas tripuladas: la altura de vuelo de los UAV es baja en relación con la variación de altura dentro de la escena registrada, lo que causa grandes distorsiones perspectivas, y por tanto influye negativamente en el ejercicio estereoscópico; la inestabilidad de la plataforma UAV que causa líneas de vuelo irregulares, y como efecto genera áreas de traslape variable entre imágenes, así como grandes variaciones angulares y rotacionales (ángulos en plataformas UAV de hasta 15° con la horizontal, mientras en fotogrametría tradicional el máximo permitido es 3°); y diferencias de escala y de iluminación entre imágenes adyacentes, que dificulta identificar elementos comunes entre ellas.

Debido a estas diferencias, el procesamiento de imágenes UAV debe ser diferente. Por tanto, es necesario implementar estrategias de procesamiento alternativas a las empleadas en fotogrametría tradicional, que tengan en cuenta las características de las imágenes UAV. Algunas de estas estrategias serán presentadas a continuación.

## PROCESAMIENTO DE IMÁGENES UAV

El uso de sistemas UAV para fotogrametría, o *fotogrametría UAV*, como lo define Eisenbeiss (2009), describe las plataformas de medición

fotogramétrica que son operadas remotamente, de manera autónoma o semiautónoma sin un piloto, así como el procesamiento de las imágenes tomadas con estas plataformas. En la fotogrametría UAV se identifican dos productos cartográficos tradicionales: los modelos digitales de superficie y los ortomosaicos georreferenciados (Nex y Remondino, 2013; Colomina y Molina, 2014).

El modelo digital de superficie (DSM) representa la información de altura de la superficie de la Tierra asociada a un sistema de referencia global, de todos los elementos registrados en la escena, es decir considerando las alturas de edificaciones, vegetación y demás objetos presentes en la superficie (Rumpler, Wendel y Bischof, 2013). Estos DSM son empleados para la generación de modelos digitales del terreno (DTM), que son aquellos en los que se han eliminado las elevaciones que no corresponden al terreno como también para la producción de ortoimágenes reales, el reconocimiento automático y extracción de edificios, el análisis de redes de comunicación, el modelamiento urbano, la simulación de desastres naturales, la planeación de vuelos, los estudios ambientales y las visualizaciones fotorrealistas en 3D, entre otras actividades (Lei, Fan, Ji y Zhai, 2008; Elaksher, 2008; Rumpler *et al.*, 2013).

Por otra parte, un mosaico corresponde al conjunto de imágenes tomadas desde una o varias cámaras, que presentan áreas de traslape entre sí, y que son unidas y combinadas en una sola imagen para ampliar el rango de visión de la escena (Cheng, Xue y Li, 2007). Cuando el mosaico es corregido de las distorsiones causadas por el relieve del terreno y los objetos en él, se denomina *ortomosaico*.

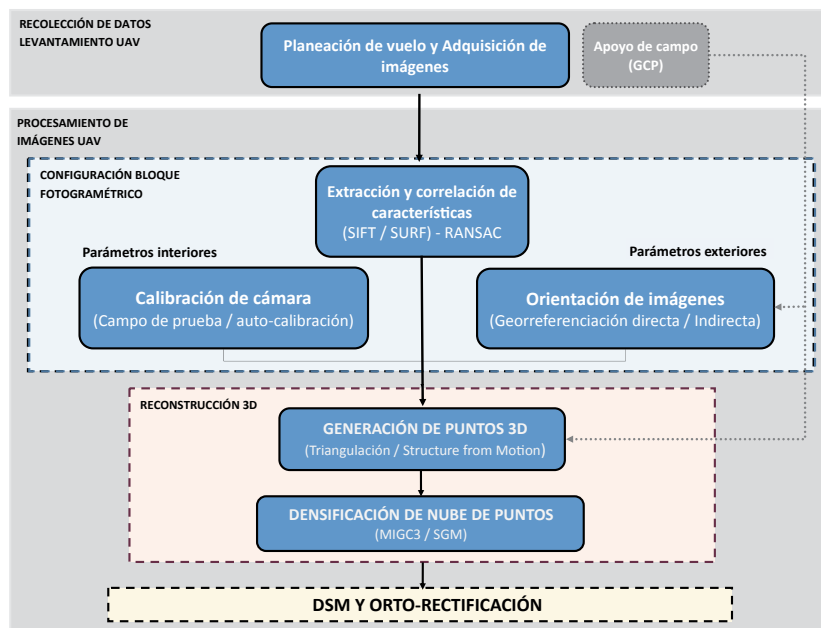
En el procesamiento de imágenes UAV para la generación de estos productos cartográficos, se combinan estrategias empleadas en fotogrametría tradicional y en visión por computador. Por tanto, se cuenta con una diversa cantidad de métodos. A pesar de que algunas investigaciones establecen que emplear *software* comercial no es apropiado (Arthur *et al.*, 2012), debido a que estos están

basados en fotogrametría tradicional, y a que en la fotogrametría UAV no se presentan las condiciones estereoscópicas normales que esta requiere, Gini *et al.* (2013) concluyen que las imágenes tomadas con sistemas UAV son aptas para ser procesadas por diferentes *software* fotogramétricos, incluyendo aquellos que son considerados tradicionales.

En resumen, el procesamiento llevado a cabo luego de la captura de datos se caracteriza por tres etapas principales: primera, la configuración del bloque fotogramétrico (véase “Configuración del bloque fotogramétrico”), en donde el objetivo es determinar la información que recrea la escena en el momento de la captura de las imágenes (datos de orientación exterior e interior de la cámara y los puntos que relacionan las imágenes entre sí); segunda, la reconstrucción 3D de la escena (véase “Reconstrucción de escenas 3D”) a partir de la extracción de una nube de puntos, y tercera, la generación del modelo digital de superficie y la ortorrectificación de las imágenes a partir de este (véase “Modelo digital de elevaciones y ortorrectificación”).

En la primera etapa (véase “Extracción y correlación de características (*feature extraction and matching*)”) se lleva a cabo una de las estrategias principales de procesamiento en fotogrametría que es la extracción y correlación de puntos comunes entre las imágenes. Esto permite conocer la orientación relativa entre imágenes y las áreas comunes registradas del terreno. Otras dos estrategias en esta etapa corresponden a determinar los datos de orientación interna y externa, a través de la calibración y orientación de imágenes, respectivamente (véase “Calibración de cámaras y orientación de imágenes”). Estas dos últimas estrategias se identifican como opcionales en algunas investigaciones mencionadas más adelante.

En la segunda etapa, el objetivo es determinar las coordenadas del terreno de cada uno de los puntos comunes extraídos de las imágenes (véase “Generación de puntos 3D”) y posteriormente determinar las coordenadas del terreno para cada uno de los píxeles en las imágenes a través de lo que se denomina densificación de nube de puntos (véase “Densificación de nube de puntos”).



**Figura 2.** Diagrama de etapas de procesamiento en fotogrametría UAV

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, en “Modelo digital de elevaciones y ortorrectificación” se presentan las estrategias para la generación del modelo digital del terreno a partir de la rasterización de la nube de puntos, y la ortorrectificación a partir del DSM generado, el cual permite la eliminación de la distorsión en las imágenes generada por el relieve.

En la figura 2, se presenta un diagrama con las etapas y estrategias de procesamiento mencionadas, que son de uso común en la bibliografía y que serán abordadas, con más detalle, a continuación.

### Configuración del bloque fotogramétrico

En un levantamiento de fotogrametría aérea con sistemas UAV, el conjunto de datos que conforman un bloque fotogramétrico corresponde a las imágenes capturadas en un vuelo y los parámetros que relacionan a estas entre sí (el traslape) y con la escena registrada (la posición y orientación). Es decir, el bloque fotogramétrico relaciona el espacio imagen y el espacio terreno. A continuación se presentan las estrategias empleadas para determinar la información que define un bloque fotogramétrico:

#### *Extracción y correlación de características (feature extraction and matching)*

Lingua, Marenchino y Nex (2009a, p. 3746) definen este proceso como “la extracción de características de interés en dos o más imágenes del mismo objeto y de la correlación (*matching*) de estas características en imágenes adyacentes”. Es decir, consiste en identificar y relacionar características similares (homólogas) entre imágenes en áreas comunes o de traslape. La relevancia del proceso de extracción y correlación se debe a que a partir de estas características extraídas es posible establecer la orientación relativa entre imágenes, la geometría interna de la cámara y la estructura tridimensional de la escena registrada.

Para la *extracción de características* se puede identificar dos tipos de algoritmos, los llamados operadores de puntos de interés o detectores de

puntos/bordes, empleados principalmente en fotogrametría, y los detectores de región, usados en visión por computador (Lingua, Marenchino y Nex, 2009b).

Los operadores de puntos de interés están asociados a la identificación de elementos que sobresalen en la imagen por sus características radiométricas, es decir, elementos con un alto gradiente en su alrededor, como puntos, bordes, esquinas, etc. Estas características pueden ser fácilmente identificables en imágenes adyacentes cuando las condiciones de captura son normales y no se presentan mayores cambios en las condiciones estereoscópicas (inclinación, rotación, escala o cambios en la iluminación entre dos imágenes adyacentes). Por esto, en fotogrametría tradicional se presenta un mayor uso de estos operadores, siendo el operador de Forstner (Forstner y Gulch, 1987) y el operador de Harris (Harris y Stephens, 1988) los de mayor uso en *software* comercial.

Por otra parte, los detectores de región son un conjunto de píxeles asociados con la identificación de elementos que no presentan variación frente a los movimientos de la cámara que generan rotación, cambios de puntos de vista, de escala, la presencia de ruido en la imagen o cambios de iluminación en la escena (Lingua *et al.*, 2009b). Estos efectos son muy comunes en fotogrametría de rango cercano y en visión por computador, por lo que estos algoritmos son desarrollados y empleados mayormente en estas áreas.

Para el caso de la fotogrametría UAV, en la que en la captura de imágenes no se presentan condiciones consideradas estándar como las requeridas en fotogrametría tradicional, los detectores de región han sido la alternativa para la extracción de características. Uno de los algoritmos de mayor implementación es el algoritmo SIFT (*scale invariant feature transform*) (Lowe, 1999; 2004). Según Lowe, el algoritmo se puede dividir en cuatro etapas principales: (i) detectar máximos y mínimos en el espacio-escala, (ii) identificar puntos de interés (iii) asignar orientación y (iv) generar el descriptor, el cual lleva asociado las propiedades del punto de

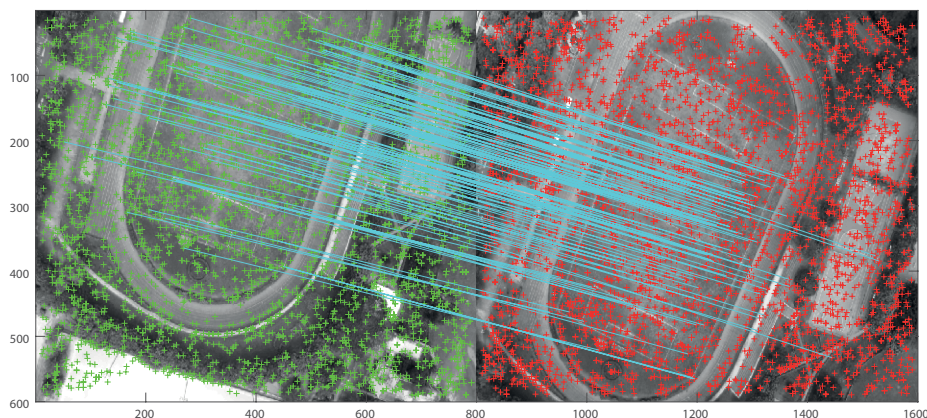


interés (posición, escala, orientación) en un vector descriptivo de 128 dimensiones.

Otros algoritmos basados en el SIFT han sido desarrollados con el objetivo de reducir la dimensión del vector descriptivo, y optimizar cada una de las etapas del algoritmo original. El algoritmo SURF (*speeded up robust features*) (Bay, Tuytelaars y Van Gool, 2006) se presenta como otra alternativa junto al SIFT, pero con un costo computacional menor (vector descriptivo de 64 dimensiones). Aunque el SURF es más rápido que el SIFT, este último extrae mayor número de puntos invariantes (Romero y Cazorla, 2009). Lingua *et al.* (2009c) presentan un análisis del rendimiento del operador SIFT, y desarrollan una versión autoadaptativa de este (A<sup>2</sup>SIFT) que permite a ciertos parámetros del algoritmo ser definidos en relación a la textura de la imagen, y así extraer un mayor número de puntos característicos. Juan y Gwun (2009) presentan una comparación del algoritmo SIFT, el SURF y una versión modificada llamada PCA-SIFT donde se concluyen las ventajas y desventajas de cada uno. Chen y Zhao (2011) proponen un enfoque para la reducción de la dimensión del descriptor SIFT para disminuir el tiempo de cómputo y mantener la robustez del algoritmo. Por último, Mikolajczyk y Schmid (2005) presentan una completa evaluación del rendimiento de varios detectores de región.

Una vez han sido extraídas las características de interés, el siguiente paso consiste en *la correlación de características* o correspondencia de puntos característicos (figura 3), que compara los vectores descriptores extraídos. Para ello se presentan dos métodos ampliamente utilizados: la búsqueda cuadrática (más lento pero riguroso, ya que realiza todas las combinaciones posibles en la comparación de los puntos) y la estructura de datos *kd-tree* (más rápido pero aproximado, debido a que la descomposición del espacio de datos disminuye la cardinalidad de los puntos a medida que se avanza en el árbol) (Arya *et al.*, 1998; Barazzetti, Remondino y Scaioni, 2010b).

Por último, las correspondencias erróneas (*outliers*) que se presentan en la correlación son eliminadas a partir de la estimación de la orientación relativa de las imágenes a través del cálculo de la matriz fundamental o a través de la matriz esencial si los parámetros internos de la cámara son conocidos (Barazzetti *et al.*, 2010b). Para la eliminación de correspondencias erróneas una de las estrategias más comunes es el algoritmo RANSAC (*random sample consensus*) (Fischler y Bolles, 1981; Li, Liu, Wang y Yan, 2005; Zuliani, 2012). Este algoritmo a través de un método iterativo determina la matriz de transformación (matriz fundamental) que mejor ajusta las correspondencias, y elimina las características que no cumplen un valor de



**Figura 3.** Extracción y correlación de características SIFT

**Fuente:** elaboración propia.

referencia. Otras estrategias como LMS (*least-median-square*) y MAPSAC (Barazzetti *et al.*, 2010b) son también encontradas en la bibliografía.

### Calibración de cámaras y orientación de imágenes

La calibración de la cámara y la orientación de imágenes son dos requisitos fundamentales para la reconstrucción métrica desde imágenes en las áreas de fotogrametría y visión por computador (Nex y Remondino, 2013). En la calibración geométrica de una cámara el objetivo es determinar los parámetros intrínsecos de esta, como la longitud focal, el punto principal de la imagen y las distorsiones de las lentes de la cámara. Mientras que en la orientación de imágenes el propósito es determinar los parámetros extrínsecos, que son la posición (coordenadas en un sistema de referencia) y la orientación (ángulos de inclinación) de la cámara en el momento de la captura de cada imagen.

### Calibración de la cámara

En la calibración de cámaras se pueden identificar dos métodos para determinar los parámetros intrínsecos de la cámara: la calibración en campo de prueba y la autocalibración.

- Calibración en campo de prueba (*test-field calibration*): Este método consiste en emplear un objeto 3D, 2D o 1D (Zhang, 2004) para determinar los parámetros intrínsecos de la cámara. En esta estrategia el objeto es ubicado en un sistema local de referencia del que se determinan las coordenadas de los elementos característicos del objeto (vértices o patrones dibujados en él). Luego, con la cámara, cuya posición también es conocida, se registra el objeto desde diferentes puntos de vista. A partir de las coordenadas conocidas y de la correlación de las imágenes capturadas se estima la matriz de proyección de la cámara de la cual son recuperados los parámetros intrínsecos. Una amplia variedad de estrategias para realizar este tipo de calibración puede ser encontrada en la bibliografía (Douterloigne,

Gautama y Philips, 2009; Heikkila y Silvén, 1997; Wiggenhagen, 2002; Zhang, 2000).

- Autocalibración (*self-calibration*): En este método no se requiere de ningún objeto físico para determinar los parámetros intrínsecos de la cámara. Es decir, la geometría interna de esta se puede determinar a partir de la relación de dos o más imágenes traslapadas sin requerimientos de control adicional (El-Habrouk, Li y Faig, 1996). El método se basa en la correlación de elementos comunes entre las imágenes de una escena y empleando un procesos de optimización global que generalmente es un ajuste fotogramétrico en bloque o *bundle block adjustment* (Triggs, McLauchlan, Hartley y Fitzgibbon, 1999). En este ajuste en bloque, a las ecuaciones de colinealidad se agregan parámetros adicionales que modelan los errores sistemáticos del sistema de captura, esto con el fin de obtener mayor exactitud.

Nex y Remondino (2013) establecen que mediante la autocalibración con ajuste en bloque la calibración de la cámara y la orientación de las imágenes, realizadas en etapas diferentes, pueden llevarse a cabo al mismo tiempo en aplicaciones donde no se requiere gran exactitud. Hemayed (2003) presenta una revisión de los estrategias en el uso del método de autocalibración, mientras que Udin y Ahmad (2011) presentan una estrategia de autocalibración de cámaras digitales de alta resolución. Finalmente, Remondino y Fraser (2006) diferencian las características entre los enfoques de calibración de cámaras en las áreas de fotogrametría y de visión por computador.

En el caso de la fotogrametría UAV, por lo general se emplea el método de autocalibración con ajuste por haces, debido al uso de cámaras no métricas y a las condiciones variables de la plataforma en el aire, que dificulta que los datos de calibración obtenidos en un campo de prueba se mantengan en el momento de procesar las imágenes. No obstante, el uso de calibración basada en objetos, antes o después de la captura de datos, también es una alternativa ya que permite obtener

datos que servirán como entradas iniciales en los diferentes modelos de calibración presentados en la bibliografía.

Eisenbeiss y Zhang (2006), a través de un *software* propio llamado BUN, que emplea la autocalibración con el modelo de Brown sin parámetros de distorsión, compararon la exactitud de los puntos de amarre o *tie points* extraídos con el *software* comercial LPS. En la investigación se obtuvo menor exactitud con el *software* comercial, lo que fue atribuido al hecho de que este está diseñado para levantamientos aéreos estándar, algo que no se presenta con plataformas UAV. No obstante, Bendea *et al.* (2008) también emplearon el *software* LPS en las operaciones de aerotriangulación, a través de una autocalibración, y consideraron que para actividades de mapeo rápido la exactitud obtenida con esta estrategia es adecuada. Junqing, Zongjian, Xiaojing y Yongrong (2012) desarrollaron una herramienta de calibración llamada MCC (*multi cameras calibration*), en la que se incluye la eliminación de las distorsiones ópticas de las imágenes.

Por su parte, Berni *et al.* (2009) realizaron la calibración geométrica de cámaras hiperespectral y térmica empleadas en plataformas UAV para la estimación de índices de vegetación. Esto se hizo a través de herramientas de calibración desarrolladas por J. Bouquet (citado por Berni *et al.*, 2009) en el *software Matlab*, y se apoya en el uso de un objeto 2D (una tabla de ajedrez). En la investigación de Berni *et al.* (2009), los parámetros calculados en la calibración fueron empleados como aproximaciones iniciales en la etapa de aerotriangulación, junto con datos del sistema GPS/INS.

#### *Orientación de imágenes*

Consiste en determinar los parámetros de orientación exterior (coordenadas de posición y ángulos de inclinación) de cada imagen durante el tiempo de captura de esta. Para obtener estos parámetros se pueden identificar dos procedimientos: (i) la georreferenciación indirecta (obtenida de la aerotriangulación en fotogrametría tradicional) y (ii) la georreferenciación directa:

- Georreferenciación indirecta: Para determinar los parámetros de orientación en fotogrametría tradicional se emplea el ajuste en bloque en el que son requeridos los puntos de amarre (puntos homólogos) entre imágenes, los parámetros de la cámara y los puntos de control tomados en el terreno (GCP, por sus siglas en inglés). Tang, Braun y Debitsch (1997) definen los pasos básicos de este proceso: (i) la *preparación del bloque*, en la que se ordenan las imágenes de acuerdo con el vuelo, junto con los datos de la cámara y los puntos de control en el terreno; (ii) la *determinación de tie points*, que consiste en la selección de características homologas entre imágenes y su correlación correspondiente; (iii) la *identificación de los GCP* en las imágenes, y (iv) el *ajuste en bloque*, en el que a partir de la información anterior se realiza un proceso de optimización por ajuste de mínimos cuadrados en el que son calculados finalmente los parámetros de orientación exterior. Se suele definir como aerotriangulación automática al proceso en el que los *tie points* y los GCP en las imágenes son identificados automáticamente. Algunos *software* comerciales como LPS (*Leica Photogrammetry Suite*) y su módulo ORIMA (*Orientation Management Software*), ISDM (*Z/I Imaging, Image Station Digital Mensuration*), ATiPE (*Automatic Tie Points Extraction*) (Barazzetti, Remondino y Scaioni, 2010a) y *Photomodeler*, este último empleado en fotogrametría terrestre para realizar la etapa de orientación (Eisenbeiss, 2009).
- Georreferenciación directa: La georreferenciación directa es entendida como la implementación de sistemas GPS/INS a bordo de las plataformas aéreas, para la medición directa de los parámetros de orientación exterior (coordenadas con el GPS y los ángulos de inclinación con el sistema inercial).

Desde el punto de vista de la fotogrametría tradicional este método reduce la cantidad de trabajo en campo al requerir menos puntos de control para determinar la orientación.

Cramer (1999) define tres ventajas principales en el uso de la georreferenciación directa: (i) permite una adquisición más rápida de los parámetros de orientación interior, (ii) podría en principio permitir la etapa de orientación sin puntos de control, con una buena configuración del bloque fotogramétrico, y (iii) son evitados los problemas adicionales en la correlación de imágenes realizada en la aerotriangulación, debidos a escenas capturadas consideradas problema (relieves difíciles, imágenes con baja textura, vegetación densa, cuerpos de agua extensos, etc.). Por otra parte, como consecuencias de este método se hace referencia a la dependencia de los datos con estos sistemas, siendo la exactitud de los dispositivos el aspecto más crítico.

Actualmente la mayoría de los sistemas UAV empleados para fotogrametría aérea cuentan con sistemas GPS/INS que son integrados en principio para propósitos de navegación pero que igualmente pueden ser aprovechados para la georreferenciación directa, por lo que este tipo de orientación de imágenes es la más implementada en sistemas UAV. Sin embargo, por cuestiones de capacidad de carga de las plataformas UAV pequeñas, la mayoría de veces estos GPS/INS corresponden a sistemas simplificados o de bajo costo que conllevan a una menor exactitud en la medición de los datos de posición y de orientación, pero que a través de estrategias de ajuste en las etapas de procesamiento pueden ser mejorados. En varias investigaciones esta integración de sistemas UAV con sistemas GPS/INS ha sido tratada, teniéndose como referencia inicial la investigación de Eisenbeiss (2009).

En investigaciones posteriores de Haala, Cramer, Weimer y Trittler (2012), se compararon los resultados de los dos métodos de orientación (directa y aerotriangulación) en la generación de DSM y ortomosaicos, obteniendo diferencias de hasta 3 m en la horizontal. Por su parte Bláha, Eisenbeiss, Grimm y Limpach (2011) evaluaron la exactitud

de los datos de un sistema GPS a través del procesamiento diferencial de los datos, y determinaron que si la exactitud con sistemas GPS/INS logra el nivel de centímetros, la georreferenciación directa puede ser realizada.

Otras investigaciones de georreferenciación directa en sistemas UAV pueden ser consultadas en la bibliografía (Anai *et al.*, 2012; Pfeifer, Glira y Briese, 2012; Turner, Lucieer y Wallace, 2014).

### Reconstrucción de escenas 3D

Luego de la etapa de orientación de las imágenes el siguiente paso corresponde a la reconstrucción 3D de la escena registrada. Esta reconstrucción se hace a partir de la relación geométrica y radiométrica de las imágenes y tiene como producto final un modelo de nube de puntos del cual se genera un modelo digital de elevaciones (DSM). En fotogrametría tradicional la reconstrucción se da apoyada en las imágenes, en los datos de orientación y de calibración de la cámara, y en los puntos de control en el terreno. Como escenario opuesto, en el área de visión por computador se han desarrollado estrategias que permiten la reconstrucción 3D a partir de conjuntos de imágenes que no cuentan con ningún dato adicional asociado (Snively, Seitz y Szeliski, 2007; Arévalo, Bayona y Rincón, 2015).

Considerando que la fotogrametría UAV presenta características asociadas a estas dos áreas, se pretende hacer una revisión de las estrategias empleadas para la reconstrucción de escenas 3D a partir de imágenes UAV. El flujo de trabajo consiste de tres etapas claramente identificadas en la bibliografía y que corresponden a: i) la generación de puntos 3D o nube de puntos dispersa, ii) la densificación de la nube de puntos y iii) DSM y ortorrectificación.

#### *Generación de puntos 3D*

La estrategia para la generación de puntos 3D consiste en determinar las coordenadas 3D de los puntos característicos extraídos en la primera etapa de

procesamiento. En el área de visión por computador se presenta una estrategia llamada *structure from motion* (SfM). Esta se basa en el ajuste en bloque y se diferencia de la fotogrametría estereoscópica en que la geometría de la escena y los parámetros de la cámara son calculados sin necesidad de tener datos iniciales, es decir, no requiere de una calibración previa de la cámara ni de GCP. En lugar de ello, la estrategia se basa en la redundancia obtenida de múltiples imágenes con altos porcentajes de traslape (Westoby *et al.*, 2012).

La estrategia de SfM, apoyada en las características extraídas y correlacionadas, y en las restricciones asociadas a la geometría epipolar, permite extraer la geometría de la cámara (posición y orientación) junto con la geometría 3D de las características, a través del refinamiento de los datos en el ajuste en bloque. Los datos resultantes son una nube de puntos dispersos en un sistema de coordenadas arbitrario, que luego son asociados a un sistema global a través de los parámetros de transformación de Helmert (Turner, Lucieer y Wallace, 2012; Nex y Remondino, 2013). La nube de puntos dispersa generada en esta estrategia es empleada como una aproximación inicial del modelo digital de superficie (DSM).

Dadas las características de la fotogrametría UAV (redundancia de imágenes y altos porcentajes de traslape) junto con la falta, en algunos casos, de datos de la geometría de la cámara, de sistemas GPS/INS en la plataforma y de la dificultad de obtener puntos de control en el terreno, se ha vinculado esta estrategia con el procesamiento de imágenes UAV.

Roncella, Re y Forlani (2011) presentan una comparación de dos estrategias de SfM empleadas en cinco casos de estudio con fotogrametría de rango cercano. Por su parte, Remondino, Del Pizzo, Kersten y Troisi (2012) presentan algunos *software* de libre acceso (*VisualSfM*, *Blunder*, *Apero*, *Insight3D*), servicios web libres (*Microsoft's Photosynth*) y *software* comercial (*Agisoft Photoscan*) para la generación de nubes de puntos dispersos a partir de la estrategia de SfM.

### *Densificación de nube de puntos*

Esta etapa consiste en extraer una mayor cantidad de puntos 3D de la escena que complementa la nube de puntos dispersa generada en la etapa anterior (figura 4). Las estrategias empleadas en esta etapa forman parte de lo que se considera como técnicas de correlación de múltiples imágenes o *multi-image matching*.

Algunas estrategias como la de Barazzetti, Scaioni y Remondino (2010), basadas en la técnica llamada GC3 (*geometrically constrained cross-correlation*) o MIGC3 (*multi-image geometrically constraint cross-correlation*) (Lingua, Marenchino y Nex, 2009c) emplean la nube de puntos dispersa para generar un modelo digital del terreno aproximado. La estrategia consiste en seleccionar una imagen base central y dos de búsqueda adyacentes. De la imagen base se identifica un punto característico que se proyecta sobre el modelo del terreno aproximado y se establece una altura máxima y una mínima. Estos tres puntos (punto máximo, mínimo y del terreno) son reproyectadas a las imágenes de búsqueda, definiendo la geometría epipolar aproximada en estas imágenes. Por último, sobre esta geometría epipolar, se identifican los puntos homólogos, y a su vez se determina el valor de la nueva altura en el terreno. Marenchino (2009) presenta un algoritmo de filtrado llamado *self-tuning standard deviation median filter* (S2MF) para la edición de la nube de puntos. Esta estrategia es generalmente empleada para filtrar DSM generados con técnicas LiDAR.

Otra estrategia corresponde a una técnica llamada estereopsis de múltiples vistas (*multi-view stereopsis*), presentada por Furukawa y Ponce (2007). La técnica emplea las correspondencias extraídas y expande estos puntos a manera de regiones dentro de las que determina las correspondencias de píxeles vecinos (Lucieer, Robinson y Turner, 2011). Esta técnica ha sido implementada en el *software* PMVS2 (*Patch-based Multiview Stereo*) el cual toma un conjunto de imágenes y los parámetros de la cámara para reconstruir la estructura 3D de la escena registrada, descartando

estructuras no rígidas o en movimiento (Furukawa y Ponce, 2007).

Hirschmuller (2005, 2008, 2011) presenta un método llamado *Semi-Global Matching* (SGM) para la generación de nubes de puntos densas. La estrategia se basa en la comparación de píxeles a través de un concepto denominado *mutual information*, que depende de las diferencias de entropía entre imágenes. La entropía, que es una medida de la cantidad de información requerida para describir una señal en imágenes, está asociada proporcionalmente al contraste presente radiométricamente (Gehrke, Morin y Downey, 2010), por tanto en píxeles homólogos las diferencias de entropía serán mínimas. En ese sentido la estrategia se encarga de establecer la correspondencia de cada uno de los píxeles de las imágenes, para la generación de una nube de puntos densa. Haala (2011) presenta un algoritmo basado en el *semi-global matching* de Hirschmuller con algunas consideraciones adicionales.

Hirschmüller y Bucher (2010) presentan una evaluación de los modelos digitales de elevación de zonas urbanas generados a partir de la nube de puntos del *semi-global matching*. En esta investigación se concluye que la calidad de los modelos digitales generados a partir de imágenes aéreas, son comparables a los generados por un escáner láser aéreo. Por otra parte, Gehrke *et al.* (2010) establece que la estrategia de *semi-global matching* es comparable con la tecnología LiDAR, en la medida en que se pueden obtener modelos digitales de

elevación de alta precisión generados a partir de nubes de puntos de alta densidad.

#### *Modelo digital de elevaciones y ortorrectificación*

La etapa final en el procesamiento de imágenes tomadas con sistemas UAV o fotogrametría UAV consiste en generar un modelo digital de elevaciones o de superficie (DSM) y un ortomosaico de la escena registrada. Para la generación de estos modelos la nube de puntos debe pasar por una triangulación y rasterización. Una estrategia muy comúnmente empleada es la triangulación de Delaunay, en la que se genera una red irregular de triángulos (TIN) de la que son interpolados los valores de altura para la generación de un archivo raster. Esta estrategia es igualmente empleada en la reconstrucción de superficies a partir de nubes de puntos obtenidas con escáner láser terrestre (Gallo, Cáceres y Porras, 2014). Por su parte, en la generación del ortomosaico, las imágenes individuales son rectificadas a partir del modelo de elevaciones, eliminando la distorsión asociada al relieve. Este proceso consiste en proyectar cada píxel de la imagen sobre el modelo de elevación para determinar el valor de altura, este valor es empleado para re proyectar sobre la imagen la nueva posición del píxel. La proyección y re proyección de los píxeles de la imagen se realiza con las ecuaciones de colinealidad. Por último, todas las imágenes rectificadas son unidas formando un mosaico.



**Figura 4.** Nube de puntos dispersa (izq.) y densa (der.). Software Postflight 3D – Sensefly

**Fuente:** elaboración propia.

Una de las investigaciones más detalladas en la generación de estos productos a partir de imágenes UAV y combinando estrategias de procesamiento en áreas como la fotogrametría y visión por computador es presentada por Barazzetti *et al.* (2014). La investigación se basa en la implementación de un algoritmo llamado MGCM (*multi-image least squares marching*) que apoyado en una nube de puntos dispersa genera un modelo más denso de puntos a través de triangulación. Finalmente, a partir de este modelo denso (*mesh*) se realiza la ortorrectificación considerando los objetos tridimensionales y las áreas de oclusión en la escena.

Algunos *software* de acceso libre como VMS (*vision measurement system*) empleados en fotogrametría de corto alcance, permiten generar modelos digitales de superficie como en la investigación de Niethammer *et al.* (2011), en donde el objetivo era evaluar los deslizamientos de tierra en una zona, comparando modelos del terreno a partir de imágenes y con tecnología LiDAR. Igualmente, para la generación de modelos digitales y ortomosaicos, algunas investigaciones han empleado *software* comercial como ERDAS (Udin, Hassan, Ahmad y Tahar, 2012), SOCET SET (Rosnell y Honkavaara, 2012), PHOTOMOD (Samad *et al.*, 2013) o a través de procesamiento de datos online (Vallet *et al.*, 2012). Finalmente, Hölh (2011) presenta una revisión de los aspectos que influyen en la generación de los modelos de elevación desde el punto de vista de las cámaras.

## CONCLUSIONES

Los sistemas UAV actualmente desempeñan un papel principal en investigación y aplicación en las áreas de fotogrametría aérea y de percepción remota. Son considerados una gran alternativa para la adquisición de imágenes de alta resolución espacial y temporal, y han mostrado un gran potencial para la respuesta rápida en diferentes escenarios.

Las grandes ventajas que ofrecen estos sistemas han sido impulsadas por los adelantos tecnológicos

en sistemas de sensores de captura, de navegación y de posicionamiento. Esto ha facilitado la simplificación e integración de estos sistemas en plataformas aéreas pequeñas, confiables y de relativa fácil adquisición. Paralelamente, los avances en las estrategias de procesamiento de imágenes en el área de visión por computador, y la integración con los conocimientos de la fotogrametría han permitido que el procesamiento de los grandes volúmenes de información obtenidos con los sistemas UAV y los altos niveles de automatización de las etapas de procesamiento sean posibles.

Estos adelantos tecnológicos y de procesamiento han impulsado investigaciones orientadas principalmente al desarrollo de algoritmos robustos en las etapas de extracción y correlación de características y a la generación de nubes de puntos de alta densidad, así como en mejorar la precisión de los productos cartográficos generados, mientras que otras investigaciones en el área de visión por computador se han enfocado en optimizar el procesamiento para aplicaciones en tiempo real.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, S.M. y Friedland, C.J. (2011). A survey of unmanned aerial vehicle (UAV) usage for imagery collection in disaster research and management. En: *9th International Workshop on Remote Sensing for Disaster Response* (p. 8). Stanford, CA, USA. Recuperado de: [http://blume.stanford.edu/sites/default/files/RS\\_Adams\\_Survey\\_paper\\_0.pdf](http://blume.stanford.edu/sites/default/files/RS_Adams_Survey_paper_0.pdf)
- Aerocivil (2009). Normas de aeronavegabilidad y operación de aeronaves. En: *Reglamentos Aeronáuticos de Colombia* (p. 660).
- Aerocivil. (2015). *Requisitos Generales de Aeronavegabilidad y Operaciones para RPAS*. Recuperado de: <https://www.aerocivil.gov.co/AAeronautica/Rrglamentacion/Cirdulares/CircularesReglamentarias/CR-5100-082-002.pdf>
- Aibotix (2014). Aibot X6 Multicopter for Mapping and Industry. Recuperado el 5 de septiembre de 2014, de: <http://www.aibotix.com/>

- Anai, T.; Sasaki, T.; Osaragi, K.; Yamada, M.; Otomo, F. y Otani, H. (2012). Automatic Exterior Orientation Procedure for Low-Cost Uav Photogrammetry Using Video Image Tracking Technique and Gps Information. *ISPRS–International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXIX-B7*(September), 469–474. <http://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B7-469-2012>
- Arévalo V., B.; Bayona I., E. y Rincón P., I.K. (2015). Metodología para documentación 3D utilizando fotogrametría digital. *Revista Tecnura*, 19, 113–120. <http://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura-2015.SE1.a09>
- Arthur, M.; Al-Tahir, R. y Davis, D. (2012). Rapid Processing of Unmanned Aerial Vehicles Imagery for Disaster Management. *FIG Working Week 2012 TS04H–Measurement Applications of Unmanned Vehicles*, 1–10. Recuperado de: [http://www.fig.net/resources/proceedings/fig\\_proceedings/fig2012/papers/ts04h/TS04H\\_arthur\\_altahir\\_et\\_al\\_6033.pdf](http://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2012/papers/ts04h/TS04H_arthur_altahir_et_al_6033.pdf)
- Arya, S.; Mount, D.M.; Netanyahu, N.S.; Silverman, R. y Wu, A.Y. (1998). An Optimal Algorithm for Approximate Nearest Neighbor Searching in Fixed Dimensions. *Journal of the ACM*, 45(6), 1–31.
- Barazzetti, L.; Brumana, R.; Oreni, D.; Previtali, M. y Roncoroni, F. (2014). True-orthophoto generation from UAV images: Implementation of a combined photogrammetric and computer vision approach. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-5*(June), 57–63. <http://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-57-2014>
- Barazzetti, L.; Remondino, F. y Scaioni, M. (2010a). Automation in 3D reconstruction: results on different kinds of close-range blocks. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVIII*(5), 55–61. Recuperado de: <http://isprsserv.ifp.uni-stuttgart.de/proceedings/XXXVIII/part5/papers/106.pdf>
- Barazzetti, L.; Remondino, F. y Scaioni, M. (2010b). Extraction of accurate tie points for automated pose estimation of close-range blocks. *ISPRS Technical Commission III ...*, XXXVIII(3A), 151–156. Recuperado de: [http://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/part3/a/pdf/151\\_XXXVIII-part3A.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/part3/a/pdf/151_XXXVIII-part3A.pdf)
- Barazzetti, L.; Scaioni, M. y Remondino, F. (2010). Orientation and 3D modelling from markerless terrestrial images: combining accuracy with automation. *The Photogrammetric Record*, 25(132), 356–381. Recuperado de: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1477-9730.2010.00599.x/full>
- Bay, H.; Tuytelaars, T. y Van Gool, L. (2006). SURF: Speeded Up Robust Features. En: A. Leonardis, H. Bischof y A. Pinz (eds.). *Computer Vision – ECCV 2006* (pp. 404–417). Berlín: Springer Verlag. [http://doi.org/10.1007/11744023\\_32](http://doi.org/10.1007/11744023_32)
- Bendea, H.; Boccoardo, P.; Tonolo, F.G.; Marenchino, D. y Piras, M. (2008). Low cost UAV for post-disaster assessment. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVII*(B8), 1373–1380. Recuperado de: [http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/8\\_pdf/14\\_ThS-20/37.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/8_pdf/14_ThS-20/37.pdf)
- Berni, J.A.J.; Zarco-Tejada, P.J.; Suárez, L.; González-Dugo, V. y Fereres, E. (2009). Remote sensing of vegetation from UAV platforms using lightweight multispectral and thermal imaging sensors. En: C. Heipke, K. Jacobsen, S. Müller y U. Sörgel (eds.). *ISPRS Hannover Workshop 2009* (p. 6). Hannover, Alemania. Recuperado de: [http://isprsserv.ifp.uni-stuttgart.de/proceedings/XXXVIII/1\\_4\\_7-W5/paper/Jimenez\\_Berni-155.pdf](http://isprsserv.ifp.uni-stuttgart.de/proceedings/XXXVIII/1_4_7-W5/paper/Jimenez_Berni-155.pdf)
- Bláha, M.; Eisenbeiss, H.; Grimm, D. y Limpach, P. (2011). Direct georeferencing of UAVs. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVI-II*(1/C22), 131–136. Recuperado de: [http://www.igp.ethz.ch/photogrammetry/publications/pdf\\_folder/2011\\_Direct\\_Georeferencing\\_of\\_UAVS.pdf](http://www.igp.ethz.ch/photogrammetry/publications/pdf_folder/2011_Direct_Georeferencing_of_UAVS.pdf)
- Chen, W. y Zhao, Y. (2011). An improved SIFT algorithm for image feature-matching. *2011 International Conference on Multimedia Technology*, 197–200. <http://doi.org/10.1109/ICMT.2011.6003022>
- Cheng, Y., Xue, D., & Li, Y. (2007). A Fast Mosaic Approach for Remote Sensing Images. *2007 International Conference on Mechatronics and Automation*, 2009–2013. <http://doi.org/10.1109/ICMA.2007.4303859>



- Chiabrando, F.; Nex, F.; Piatti, D. y Rinaudo, F. (2011). UAV and RPV systems for photogrammetric surveys in archaeological areas: two tests in the Piedmont region (Italy). *Journal of Archaeological Science*, 38(3), 697-710. <http://doi.org/10.1016/j.jas.2010.10.022>
- Colomina, I. y Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79-97. <http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- Cramer, M. (1999). Direct Geocoding-is Aerial Triangulation Obsolete? In *Photogrammetric Week "99"* (pp. 59-70). Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.17.3058>
- Douterloigne, K.; Gautama, S. y Philips, W. (2009). Fully automatic and robust UAV camera calibration using chessboard patterns. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2, 551-554. <http://doi.org/10.1109/IGARSS.2009.5418141>
- Eisenbeiss, H. (2009). *UAV Photogrammetry*. Zürich: ETH and Institute of Geodesy and Photogrammetry.
- Eisenbeiss, H. y Zhang, L. (2006). Comparison of DSMs generated from mini UAV imagery and terrestrial laser scanner in a cultural heritage application. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI-5*, 90-96. <http://doi.org/10.1.1.221.8350>
- El-Habrouk, H.; Li, X.P. y Faig, W. (1996). Determination of geometric characteristics of a Digital Camera by Self-Calibration. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXI(B1), 60-64.
- Elaksher, A. (2008). A multi-photo least squares matching algorithm for urban area DEM refinement using breaklines. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences 37, Part B3A, XXXVII(B3a)*, 33-38. Recuperado de: [http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/3\\_pdf/05a.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/3_pdf/05a.pdf)
- Everaerts, J. (2008). The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for remote sensing and mapping. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII(B1), 1187-1192. Recuperado de: [http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1\\_pdf/203.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/203.pdf)
- Fischler, M.A. y Bolles, R.C. (1981). Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *CACM*, 24(6), 381-395.
- Forstner, W. y Gulch, E. (1987). A Fast Operator for Detection and Precise Location of Distinct Points, Corners and Centres of Circular Features.pdf. En: *Proceedings of the ISPRS Intercommission Workshop on Fast Processing of Photogrammetric Data* (pp. 281-305). Interlaken, Suiza.
- Furukawa, Y. y Ponce, J. (2007). Accurate, dense, and robust multiview stereopsis. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (Vol. 32, pp. 1-8). Minneapolis, USA. <http://doi.org/10.1109/TPAMI.2009.161>
- Gallo L., E.O.; Cáceres J., J.J. y Porras D., H. (2014). Modelos urbanos tridimensionales generados a partir de nubes de puntos de un escáner láser terrestre Three-dimensional urban models generated from point clouds. *Revista Tecnura*, 18(41), 134-153. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.3.a10>
- Gehrke, S.; Morin, K. y Downey, M. (2010). Semi-global matching: An alternative to LIDAR for DSM generation. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Recuperado de: [http://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/part1/11/11\\_01\\_Paper\\_121.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/part1/11/11_01_Paper_121.pdf)
- Gini, R.; Pagliari, D.; Passoni, D.; Pinto, L.; Sona, G. y Dosso, P. (2013). UAV Photogrammetry : Block Triangulation Comparisons. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL(1/W2), 157-162.
- Haala, N. (2011). Multiray Photogrammetry and Dense Image Matching. En: D. Fritsch (ed.). *Photogrammetric Week '11* (pp. 185-195). Stuttgart: Wichmann.
- Haala, N.; Cramer, M.; Weimer, F. y Trittler, M. (2012). Performance Test on Uav-Based Photogrammetric Data Collection. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-1/, 7-12. <http://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-7-2011>

- Harris, C. y Stephens, M. (1988). A Combined Corner and Edge Detector. *Proceedings of the Alvey Vision Conference 1988*, 147–151. <http://doi.org/10.5244/C.2.23>
- Hartley, R.I. y Mundy, J.L. (1993). The relationship between photogrammetry and computer vision. En: *Integrating Photogrammetric Techniques With Scene Analysis and Machine Vision. SPIE Digital Library* (Vol. 1944, p. 14).
- Heikkila, J. y Silvén, O. (1997). A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. En: *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 1106–1112). Recuperado de: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=609468](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=609468)
- Hemayed, E.E.E.E. (2003). A survey of camera self-calibration. *Proceedings of the IEEE Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance, 2003*, 351–357. <http://doi.org/10.1109/AVSS.2003.1217942>
- Hirschmuller, H. (2005). Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information. ... *Vision and Pattern Recognition, 2005. CVPR ....* Recuperado de: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=1467526](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1467526)
- Hirschmüller, H. (2008). Stereo processing by semi-global matching and mutual information. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 30(2), 328–41. <http://doi.org/10.1109/TPAMI.2007.1166>
- Hirschmüller, H. (2011). Semi-Global Matching Motivation, Developments and Applications. *Photogrammetric Week*, 173–184. Retrieved from <http://www.robotic.dlr.de/fileadmin/robotic/hirschmu/pw2011hh.pdf>
- Hirschmüller, H. y Bucher, T. (2010). Evaluation of digital surface models by semi-global matching. *DGPF Tagungsband*. Recuperado de: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/dgpf/wien/5-HirschmuellerBucher-SemiGlobalMatching.pdf>
- Höhle, J. (2011). On the potential of new digital aerial cameras for DEM generation. *The Photogrammetric Journal of Finland*, 22(2), 27–36. Recuperado de: [http://foto.hut.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf\\_e/2011/PJF2011\\_Hohle.pdf](http://foto.hut.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf_e/2011/PJF2011_Hohle.pdf)
- ISPRS. (2004). Approved resolutions of the XXth ISPRS Congress–Istanbul 2004. En: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (Vol. XXXV, p. 40). Estambul, Turquía.
- Juan, L. y Gwun, O. (2009). A comparison of sift, pca-sift and surf. *International Journal of Image Processing (IJIP)*, 3(4), 143–152. Recuperado de: <http://www.cscjournals.org/csc/manuscript/Journals/IJIP/volume3/Issue4/IJIP-51.pdf>
- Junqing, C.; Zongjian, L.; Xiaojing, W.; Yongrong, L. y Acquisition, A.I. (2012). Application of UAV system for low altitude photogrammetry in Shanxi. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXIX(1)*, 351–354.
- Kohoutek, T. y Eisenbeiss, H. (2012). Processing of UAV based range imaging data to generate detailed elevation models of complex natural structures. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXIX*, 405–410. Recuperado de: <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXIX-B1/405/2012/isprsarchives-XXXIX-B1-405-2012.pdf>
- Lei, R.; Fan, D.; Ji, S. y Zhai, H. (2008). Theory and Algorithms of DSM generation from multi-line-array images matching. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVII(B4)*, 337–342. Recuperado de: [http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/4\\_pdf/59.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/4_pdf/59.pdf)
- Li, M.; Li, D. y Fan, D. (2012). A study on automatic UAV image mosaic method for paroxysmal disaster. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXIX(B6)*, 123–128.
- Li, X.; Liu, Y.; Wang, Y. y Yan, D. (2005). Computing Homography with RANSAC Algorithm: A Novel Method of Registration. En: C.-S. Li y M.M. Yeung (eds.). *SPIE 5637* (Vol. 5637, pp. 109–112). <http://doi.org/10.1117/12.579121>

- Lingua, A.; Marenchino, D. y Nex, F. (2009a). Performance Analysis of the SIFT Operator for Automatic Feature Extraction and Matching in Photogrammetric Applications. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 9(5), 3745–66. <http://doi.org/10.3390/s90503745>
- Lingua, A.; Marenchino, D. y Nex, F. (2009b). A comparison between “ old and new ” feature extraction and matching techniques in Photogrammetry. *RevCAD, Journal of Geodesy and Cadastre*, 9, 43–52.
- Lingua, A.; Marenchino, D. y Nex, F. (2009c). Automatic Digital Surface Model (DSM) generation procedure from images acquired by Unmanned Aerial Systems (UASs). *RevCAD, Journal of Geodesy and Cadastre*, (9), 53-64.
- Lowe, D.G. (1999). Object recognition from local scale-invariant features. *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, 2, 1150-1157. <http://doi.org/10.1109/ICCV.1999.790410>
- Lowe, D.G. (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2), 91-110. <http://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>
- Lucier, A., Robinson, S. y Turner, D. (2011). Unmanned Aerial Vehicle (UAV) remote sensing for hyperspatial terrain mapping of Antarctic Moss beds based on Structure from Motion (SfM) point clouds. *Proceeding of the 34th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Sydney, Australia*, (January 2008), 1–4. Recuperado de: <http://www.isprs.org/proceedings/2011/ISRSE-34/211104015Final00641.pdf>
- MarcusUAV (2014). *Personal UAV Systems For Photography, Surveillance and More*. Recuperado el 5 de septiembre de 2014 de: <http://www.marcusuav.com/>
- Marenchino, D. (2009). *Low-cost UAV for the environmental emergency management. Photogrammetric procedures for rapid mapping activities*. Ph.D Thesis Politecnico Di Torino. Recuperado de: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.329.9625&rep=rep1&type=pdf>
- Microdrones (2014). *UAV Solutions for Mapping, Unmanned Cargo and Inspection Tasks*. Recuperado el 5 de septiembre de 2014 de: <http://www.microdrones.com/en/home/>
- Mikolajczyk, K. y Schmid, C. (2005). Performance evaluation of local descriptors. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(10), 1615-1630. <http://doi.org/10.1109/TPAMI.2005.188>
- Neitzel, F. y Klonowski, J. (2011). Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII, 1–6. Recuperado de: [http://143.93.114.105/sites/default/files/public/data/uav-g\\_neitzel\\_klonowski.pdf](http://143.93.114.105/sites/default/files/public/data/uav-g_neitzel_klonowski.pdf)
- Nex, F. y Remondino, F. (2013). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1-15. <http://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
- Niethammer, U.; James, M.R.R.; Rothmund, S.; Tranelletti, J. y Joswig, M. (2011). UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. *Engineering Geology*, 128, 2–11. <http://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.03.012>
- Niethammer, U.; Rothmund, S.; James, M.R.; Tranelletti, J. y Joswig, M. (2010). UAV-Based Remote Sensing of Landslides. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII(5), 496-501.
- Nizam T., K. y Ahmad, A. (2013). An Evaluation of Fixed Wing and Multi-Rotor UAV Images using Photogrammetric Image Processing. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 7, 346-350. Recuperado de: <http://waset.org/publications/11861/an-evaluation-on-fixed-wing-and-multi-rotor-uav-images-using-photogrammetric-image-processing>
- Pfeifer, N.; Glira, P. y Briese, C. (2012). Direct Georeferencing With on Board Navigation Components of Light Weight Uav Platforms. *ISPRS–International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B7(September), 487–492. <http://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B7-487-2012>
- Remondino, F. y Fraser, C. (2006). Digital camera calibration methods: Considerations and comparisons. *International Archives of the Photogrammetry*,

- Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5), 266–272.
- Remondino, F.; Del Pizzo, S.; Kersten, T.P. y Troisi, S. (2012). Low-Cost and Open-Source Solutions for Automated Image Orientation—A Critical Overview. En: *Progress in Cultural Heritage Preservation* (Vol. 2012, pp. 40–54). Springer Berlin Heidelberg. [http://doi.org/10.1007/978-3-642-34234-9\\_5](http://doi.org/10.1007/978-3-642-34234-9_5)
- Romero, A.M. y Cazorla, M. (2009). Comparativa de detectores de características visuales y su aplicación al SLAM. *X Workshop de Agentes Físicos, Septiembre 2009*, 55–62. Recuperado de: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Comparativa+de+detectores+de+características+visuales+y+su+aplicación+on+al+SLAM#0>
- Roncella, R.; Re, C. y Forlani, G. (2011). Comparison of two structure and motion strategies. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII, 343–350.
- Rosnell, T. y Honkavaara, E. (2012). Point cloud generation from aerial image data acquired by a quadcopter type micro unmanned aerial vehicle and a digital still camera. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 12(1), 453–480. <http://doi.org/10.3390/s120100453>
- Rumpler, M.; Wendel, A. y Bischof, H. (2013). Probabilistic Range Image Integration for DSM and True-Orthophoto Generation. En: J.-K. Kämäräinen y M. Koskela (eds.). *Image Analysis* (pp. 533–544). Espoo, Finlandia: Springer Berlin Heidelberg. [http://doi.org/10.1007/978-3-642-38886-6\\_50](http://doi.org/10.1007/978-3-642-38886-6_50)
- Salvo, G.; Caruso, L. y Scordo, A. (2014). Urban Traffic Analysis through an UAV. *Procedia—Social and Behavioral Sciences*, 111, 1083–1091. <http://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.143>
- Samad, A.M.; Kamarulzaman, N.; Hamdani, M.A.; Mastor, T.A. y Hashim, K.A. (2013). The potential of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for civilian and mapping application. En: *2013 IEEE 3rd International Conference on System Engineering and Technology* (pp. 313–318). Shah Alam, Malaysia: IEEE. <http://doi.org/10.1109/ICSEngT.2013.6650191>
- Sensefly (2014). Professional Mapping Drones, Flight Planning & Control, Maps and 3D Models. Recuperado 5 de septiembre de: <https://www.sensefly.com/home.html>
- Shi, J.; Wang, J. y Xu, Y. (2011). Object-Based Change Detection Using Georeferenced UAV Images. *ISPRS—International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-1/(1/C22), 177–182. <http://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-177-2011>
- Snavely, N.; Seitz, S.M. y Szeliski, R. (2007). Modeling the World from Internet Photo Collections. *International Journal of Computer Vision*, 80(2), 189–210. <http://doi.org/10.1007/s11263-007-0107-3>
- Tang, L.; Braun, J. y Debitsch, R. (1997). Automatic aerotriangulation — concept, realization and results. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 52(3), 122–131. [http://doi.org/10.1016/S0924-2716\(97\)00012-9](http://doi.org/10.1016/S0924-2716(97)00012-9)
- Triggs, B.; McLauchlan, P.; Hartley, R. y Fitzgibbon, A. (1999). Bundle adjustment—a modern synthesis. *Vision Algorithms*, 99, 1–71. Recuperado de: [http://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-44480-7\\_21](http://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-44480-7_21)
- Trimble. (2014). Trimble UX5 Aerial Imaging Rover. Recuperado el 5 de septiembre de 2014, de: <http://www.trimble.com/Survey/ux5.aspx>
- Turner, D.; Lucieer, A. y Wallace, L. (2014). Direct Georeferencing of Ultrahigh-Resolution UAV Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(5), 2738–2745. <http://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2265295>
- Turner, D.; Lucieer, A. y Watson, C. (2012). An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure from Motion (SfM) Point Clouds. *Remote Sensing*, 4(12), 1392–1410. <http://doi.org/10.3390/rs4051392>
- Udin, W.S. y Ahmad, A. (2011). Calibration of high resolution digital camera using self-calibration bundle adjustment method. En: *2011 IEEE 7th International Colloquium on Signal Processing and its Applications* (Vol. 1, pp. 137–141). Ieee. <http://doi.org/10.1109/CSPA.2011.5759859>
- Udin, W.S.; Hassan, A.F.; Ahmad, A. y Tahar, K. N. (2012). Digital Terrain Model extraction using digital aerial imagery of Unmanned Aerial Vehicle.

- 2012 *IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and Its Applications*, 272–275. <http://doi.org/10.1109/CSPA.2012.6194732>
- Vallet, J.; Panissod, F.; Strecha, C. y Tracol, M. (2012). Photogrammetric Performance of an Ultra Light Weight Swinglet “Uav.” *ISPRS–International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-1/, 253-258. <http://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-253-2011>
- Watts, A.C.; Ambrosia, V.G. y Hinkley, E.A. (2012). Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use. *Remote Sensing*, 4(12), 1671-1692. <http://doi.org/10.3390/rs4061671>
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). “Structure-from-Motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Wiggenhagen, M. (2002). Calibration of Digital Consumer Cameras for Photogrammetric Applications. En: *ISPRS Commission III, Symposium 2002* (p. 6). Graz, Austria.
- Xiang, H. y Tian, L. (2011). Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV). *Biosystems Engineering*, 108(2), 174-190. <http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.11.010>
- Xie, F.; Lin, Z.; Gui, D. y Lin, H. (2012). Study on Construction of 3D Building Based on Uav Images. *ISPRS–International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B1, 469-473. <http://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B1-469-2012>
- Yahyanejad, S.; Quaritsch, M. y Rinner, B. (2011). Incremental, orthorectified and loop-independent mosaicking of aerial images taken by micro UAVs. *2011 IEEE International Symposium on Robot and Sensors Environments (ROSE)*, 137–142. <http://doi.org/10.1109/ROSE.2011.6058531>
- Zhang, Z. (2000). A Flexible New Technique for Camera Calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11), 1330–1334.
- Zhang, Z. (2004). Camera calibration. En: G. Medioni y S.B. Kang (eds.). *Emerging Topics in Computer Vision* (pp. 4–43). Recuperado de: <http://www.inf.ethz.ch/personal/pomarc/pubs/KangMedioniBook.pdf>
- Zuliani, M. (2012). *RANSAC for Dummies*. Recuperado de: <http://vision.ece.ucsb.edu/~zuliani/Research/RANSAC/RANSAC.shtml>





## Revisión del estado de arte en captación y aprovechamiento de aguas lluvias en zonas urbanas y aeropuertos

### Review of the status of art collection and utilization of rain water in urban and airports

Adolfo León Agatón<sup>1</sup>, Juan Carlos Córdoba Ruiz<sup>2</sup>, Uriel Fernando Carreño Sayago<sup>3</sup>

**Fecha de recepción:** 05 de junio de 2015

**Fecha de aceptación:** 10 de septiembre de 2016

**Cómo citar:** León A., A.; Córdoba R., J.C. y Carreño S., U.F. (2016). Revisión del estado de arte en captación y aprovechamiento de aguas lluvias en zonas urbanas y aeropuertos. *Revista Tecnura*, 20(50), 141-153. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a10

#### RESUMEN

**Contexto:** El agua es actualmente considerada como el recurso natural más crítico del planeta. Numerosos estudios realizados a nivel mundial demuestran que los sistemas de recolección de aguas lluvias han sido necesarias para para suplir diferentes necesidades básicas, uno de los pasos más importantes en la planificación de un sistema de recolección de aguas pluviales es la utilización de un método para determinar la capacidad óptima de tanques de recolección y almacenamiento

**Método:** En este trabajo se presenta diferentes conceptos de autores de artículos a nivel mundial que hacen referencia al aprovechamiento de agua lluvia, a su captación y aprovechamiento evitando que se desperdicie este recurso y que llegue a los alcantarillados y al arrasar con las basuras que encuentra lo que sucede es que contaminan y tapan estos doctos provocando inundaciones.

**Resultados:** La investigación han demostrado que los sistemas de captación de agua de lluvia promueven

el ahorro de agua en diversos ámbitos como por ejemplo en estadios, universidades escuelas, aeropuertos y zonas residenciales.

**Conclusiones:** se determina que el agua lluvia no se ha tenidos en cuenta como factor de ahorro, ni aprovechamiento de este recurso con respecto a un impacto ambiental. En cuanto al concepto de captación y aprovechamiento del agua lluvia se tiene en cuenta como todo tipo de esfuerzo técnico, simple o complejo, surgido de la iniciativa de algunas personas para almacenarla y ser aprovechada posteriormente para uso de los agricultores, descargas de inodoros, orinales y riego de jardines, lavado de pisos, entre otras. Si se profundiza en un estudio de costo beneficio para recolectarla y aprovecharla para ser remplazada por el agua potable, mostraría muy buenos resultados

**Palabras clave:** aguas lluvias, aprovechamiento de aguas lluvias, captación de aguas lluvias, sistemas de recolección.

1 Ingeniero Industrial, magíster en Ingeniería Industrial. Docente Fundación Universitaria Los Libertadores. Bogotá, Colombia. Contacto: [aleona@libertadores.edu.co](mailto:aleona@libertadores.edu.co)

2 Ingeniero industrial, candidato a magíster en Administración de Organizaciones. Docente Fundación Universitaria Los Libertadores. Bogotá, Colombia. Contacto: [jccordobar@libertadores.edu.co](mailto:jccordobar@libertadores.edu.co)

3 Ingeniero de Producción Biotecnológico, magíster en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Fundación Universitaria Los Libertadores. Bogotá, Colombia. Contacto: [ucarrenos@libertadores.edu.co](mailto:ucarrenos@libertadores.edu.co)

## Abstract

**Context:** Water is currently considered the most critical natural resource on the planet. Numerous worldwide studies have shown that rainwater harvesting systems have been needed to meet different basic needs. One of the most important steps in planning a rainwater harvesting system is to use a method to determine The optimal capacity of collection and storage tanks

**Method:** In this paper we present different concepts of authors of articles at a global level that refer to the use of rainwater, its capture and use avoiding that this resource is wasted and that it reaches the sewers and raking with the garbage found What happens is that they contaminate and cover these teachers causing flooding.

**Results:** Research has shown that rainwater harvesting systems promote water saving in a variety of

settings, such as stadiums, universities, schools, airports and residential areas.

**Conclusions:** it is determined that rainwater has not been taken into account as a saving factor, nor the use of this resource with respect to an environmental impact. As for the concept of catchment and use of rainwater, it is taken into account as any kind of technical effort, simple or complex, arising from the initiative of some people to store it and be used later for farmers, toilet flushing, urinals and irrigation of gardens, washing of floors, among other. If you go into a cost benefit study to collect it and take advantage of it to be replaced by drinking water, it would show very good results

**Keywords:** Rainwater, rainwater harvesting, rainwater harvesting, harvesting systems.

## INTRODUCCIÓN

El agua es actualmente considerada como el recurso natural más crítico del planeta (Naciones Unidas, 2006). Numerosos estudios realizados en el mundo demuestran que los sistemas de recolección de aguas lluvias han sido importantes para suplir diferentes necesidades básicas, como: Australia (Marks et al, 2006; Tam et al., 2010), China (Gong, 2002; Yuan et al., 2003), Grecia (Sazakli et al, 2007), India (Goel y Kumar, 2005; Pandey et al., 2006), Indonesia (Song et al., 2009), Irán (Fooladman et al., 2004), Irlanda (Li et al., 2010), Jordania (Abdulla et al., 2009), Namibia (Sturm et al., s.f.), Singapur (Appan, 1999), Sudáfrica (Kahinda et al., s.f.), España (Domenech et al., 2011), Suecia (Villarreal y Dixon, 2005), Reino Unido (Fewkes, 1999), EE. UU. (Jones et al., 2010), Taiwán (Chiu et al., 2009) y Zambia (Handia et al., 2003). Uno de los pasos más importantes en la planificación de un sistema de recolección de aguas pluviales es la utilización de un método para determinar la capacidad óptima de tanques de recolección y almacenamiento. No deben ser demasiado grandes

(debido a los altos costos de construcción y mantenimiento), ni muy pequeños (ya que no se cumplen las exigencias de aguas lluvias). Esta capacidad se puede elegir con posterioridad a un análisis económico para diferentes escenarios (Chiu et al., 2009) o de los ahorros potenciales de agua potable para diferentes tamaños de depósito (Guisi et al., 2009).

Hoy se tiene el aprovechamiento del agua lluvia como fuente potencial de agua en las ciudades (Hatt y Fletcher, 2006); en países en vías de desarrollo, sobre todo, el aprovechamiento de aguas lluvias se ha convertido, en los últimos años, en una alternativa interesante, debido, principalmente, al bajo costo.

## EXPERIENCIAS SOBRE APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS EN EL MUNDO

### Europa

Zhe et al. (2010) se enfocaron en el tratamiento de aguas residuales y de aguas lluvias, en el país de Irlanda, ciudad de Dublín; donde se buscó la

aplicación de estas estrategias por el agotamiento de fuentes hídricas con el paso de los años y el aumento excesivo de habitantes. Según el estudio, la demanda de agua se ha duplicado a nivel mundial cada 21 años, y lo más importante que revela este artículo es que el agua para las necesidades básicas, como beber y cocinar, es mínima; solo el 6 % del agua suministrada es destinada a estas necesidades. El porcentaje restante es usado en lo que los autores denominan "aumento del nivel de vida", es decir, higiene personal: en una casa típica el mayor volumen de agua es utilizada en aseo, ducha, inodoros, lavadoras y lavado de vajillas, este volumen es mucho mayor al requerido para beber y cocinar.

En Alemania, en el conjunto residencial Daimler Chrysler Potsdamer Platz, en Berlín, conformado por 19 edificios, se utilizan 32.000 m<sup>2</sup> de área de recolección de aguas lluvia en techos y una capacidad de almacenamiento de 3.500 m<sup>3</sup> para descarga, riego, y alimentar un estanque artificial. El proyecto Belss-Luedecke-Strasse Building State se diseñó con un área de 7.000 m<sup>2</sup> de áreas de cubiertas para la recolección del agua y con otro sistema en los escurrimientos de las calles, los espacios de parqueaderos y las vías peatonales del conjunto que aportan otros 4.200 m<sup>2</sup> de área disponible. Se almacena el agua en una cisterna 160 m<sup>3</sup> y después de un tratamiento de varios pasos, se utiliza para descargas y riegos (Ballén *et al.*, 2006).

En España el estudio desarrollado para evaluar la viabilidad económica y ambiental de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias en las ciudades españolas, su construcción e implementación, y el uso de las aguas asociadas ofrecen una alternativa en el suministro doméstico de agua. Se desarrolló un modelo predictivo para estimar la viabilidad financiera y medioambiental del uso de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias para los tipos de vivienda en que estos pueden ser construidos, en las diferentes áreas urbanas. Los más viables, desde el punto de vista financiero, no son necesariamente los mejores en términos de posibles impactos ambientales, principalmente

por el alto porcentaje del efecto de la infraestructura sobre el impacto total, lo que requiere tener muy buenas estimaciones de la fase de utilización de los componentes más viables dentro de un sistema, que depende fundamentalmente de la cantidad de agua de lluvia que puede ser efectivamente aprovechada (Morales *et al.*, 2012).

## África

En África la situación de abastecimiento de agua potable es crítica, debido a la escasez de fuentes apropiadas en términos de calidad y seguridad, falta de recursos económicos, tecnología inapropiada y altos niveles de pobreza. Por estos factores, el aprovechamiento de agua lluvia se ha constituido en una alternativa en países como Botswana, Togo, Malí, Malawi, Namibia, Zimbabue, entre otros. Se han adelantado proyectos en regiones donde hay muy baja precipitación y el nivel de agua superficial es muy pobre. En general en el continente el desarrollo de sistemas de aprovechamiento no ha tenido el desarrollo esperado, debido a las bajas precipitaciones, al reducido número y tamaño de las cubiertas de techos, al alto costo comparado contra los ingresos nacionales y a la escasez de elementos bases como arena y cemento (Ballén *et al.*, 2006). El continente sirve de ejemplo en cuanto al desarrollo de prácticas convencionales de aprovechamiento de carácter informal que se desarrollan con costos reducidos, eficiencias muy bajas y baja calidad de agua resultante, cuyo financiamiento proviene en su mayoría de agencias internacionales promotoras o subsidiarias, y que son adoptadas por familias de clase media utilizando tecnologías de bajo costo así como materiales disponibles en la zona y que solamente pueden suplir un porcentaje de la demandad total.

En la zona urbana de Zambia, por ser un país ubicado en el centro del continente africano, tan solo el 43 % de la población urbana tiene acceso a este recurso, a esto también se suma que es un país con un alto índice de condiciones de pobreza, lo cual dificulta aún más el acceso a este recurso. El



agua de lluvia que cae sobre el territorio se desperdicia y la potable es escasa, por lo tanto, se plantea la recolección de aguas pluviales, para dicho fin, se vinculan a los habitantes de la ciudad de Lusaka en un proyecto mediante el cual se pueda recolectar el agua que cae durante las tormentas, para darle un uso doméstico e, incluso, consumirla. Se realiza un plan piloto en escuelas de regiones alejadas donde el agua que cae sobre los techos es recibida en un canal, el cual dirige el líquido hacia unos recipientes plásticos de 210 litros (recipientes reutilizados que en alguna ocasión contenían aceite), en estos se almacena el agua para su posterior consumo, por parte de maestros y estudiantes. Este proyecto no fue de fácil aceptación por la comunidad de Zambia, dado que las aguas pluviales, más que representar un beneficio, implicaban una molestia, pues según ellos, solo generaban inundaciones en el terreno. La gobernación se dio a la tarea de realizar estudios de suelos e ingeniería de acueductos, para que la recolección de aguas pluviales se convirtiera en un hecho y no quedara solo en proyectos de escuela. Ya se habían aplicado estrategias como capacitar a la mujeres de la región para utilizar bombas de mano y elaborar de pozos subterráneos no muy hondos, de donde se podían abastecer; pero esto no era suficiente y se hizo necesario crear otra alternativa ante la gran demanda derivada de la llegada de más personas procedentes de zonas rurales a la capital (Handia y Madalitso, 2003).

## Asia

Según Chiu, Liaw y Chen (2005), se entiende por *captación y aprovechamiento del agua de lluvia* todo tipo de esfuerzo técnico, simple o complejo, surgido de la iniciativa de los agricultores o desarrollo científicamente, para aumentar la cantidad de agua de lluvia que se almacena en el suelo o en estructuras construidas, para utilizarlas posteriormente, bajo condiciones de déficit de lluvias. El proyecto Siglo 121, en China, mediante un campo de recolección de agua y dos de almacenamiento

que abastecen un terreno de cultivo que beneficia a 1,2 millones personas y 1,18 millones de cabezas de ganado en la meseta de Loess de Geansu, muestra cómo es posible aprovechar este recurso.

En Singapur, el 86 % de los edificios de apartamentos cuentan con techos especialmente diseñados para la captación de aguas lluvias que son almacenadas en cisternas separadas. Por su parte, en Tokio en la zona de Ronjinson sobre la vía pública se tiene instalada una estructura que recolecta agua, la transporta a un pozo subterráneo y por medio de una bomba manual es utilizada para riego de jardines, aseo de fachadas y pisos, para combatir eventuales incendios y en situaciones de emergencia (Ballén *et al.*, 2006).

## Oceanía

En Sídney se analizó el potencial de ahorro de agua potable por la instalación de tanques de recolección en diez viviendas unifamiliares, por eso se desarrolló un modelo de simulación con escala de tiempo, mediante el cual se estudiaron aspectos como confiabilidad de suministro, rendimientos financieros y ahorro de agua de cada familia usando tanques de 2 kl, 3 kl y 5 kl. Se concluyó que el ahorro de agua está relacionado directamente con el nivel de precipitación del lugar, la relación costo/beneficio para los tanques es menor a 1 y es necesario tener en cuenta las zonas de mayor consumo, como: aseo, lavado y riegos exteriores. El promedio de ahorro anual del agua está directamente relacionado con la precipitación anual del área en estudio, y una relación costo/beneficio mayor que uno (1) se podría alcanzarse con la implementación de los tanques de uso combinado (Ataur y Keanea, 2011).

En el campus de la Universidad Swinburne de Tecnología, en Melbourne, se desarrolló un modelo de balance hídrico con el cual se pretende optimizar el tamaño de los tanques para recolección de aguas lluvias; para el caso se tomaron como ejemplo dos tanques de 185 m<sup>3</sup> y 110 m<sup>3</sup> usados en la recolección de aguas pluviales subterráneas,

con el objeto de reducir su tamaño basados en sus rendimientos y diseño. Se tuvieron en cuenta aspectos como: variación tiempos y precipitación (húmedo, medio y seco), capacidad de almacenamiento, desbordamiento, dando como resultado que su mayor función se concentra durante el tiempo húmedo, mientras que en tiempo seco su utilidad se reduce en gran medida. Por otra parte, la vigencia para la recuperación de la inversión es muy amplia, lo que traería desventajas para el proyecto. Se desarrolló de modelo teniendo en cuenta un sistema de entradas y salidas, el cual depende de las precipitaciones (captación de agua), consumo, desperdicios y volumen de almacenamiento. Se obtuvo información de niveles de precipitación a través de datos estadísticos consultados durante los tres años anteriores (Monzur *et al.*, 2011).

## América

En Norteamérica medio millón de personas utilizan sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias para uso doméstico, propósitos agrícolas comerciales e industriales. Actualmente existen 50 empresas establecidas especializadas en diseño de sistemas de aprovechamiento y su instalación. El Healthy House, una estructura de 158 m<sup>2</sup> ubicada en Toronto (Canadá), es autosuficiente en su abastecimiento de agua potable utilizando agua lluvia. Con una estructura de techos de recolección, canales y tanque de almacenamiento y tratando el agua con cal para reducir la acidez y suministrarle un sabor fresco, un sistema de filtro de arena fina y carbón activado para remover las impurezas y un sistema de desinfección mediante radiación ultravioleta, es un estructura autosuficiente (Ballén *et al.*, 2006).

La Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá, evaluó la viabilidad técnica y económica de utilizar el agua lluvia como alternativa para el riego y el lavado de zonas duras de su propio campus universitario (Lara *et al.*, 2007). En el Instituto María Auxiliadora de Caldas se desarrolló un proyecto tendiente a utilizar el agua lluvia como ahorro

de agua potable (Castañeda, 2010); el área total y el área de captación de aguas lluvia fueron calculados por un sistema de posicionamiento global (Londoño Silva, 2006).

## MODELOS COSTO/BENEFICIO

Un estudio de viabilidad económica en España realizado por Morales *et al.* (2012), muestra que es posible modelar tanto los indicadores financieros convencionales como los indicadores de impacto, el uso de sistemas lineales y una escala de tamaño apropiado para la mayoría de los sistemas de captación de aguas pluviales. En conclusión, la demanda de agua doméstica para lavadoras tiene un menor impacto que el uso de agua del grifo. El factor determinante en el diseño de los sistemas de captación de aguas pluviales es la escala del sistema, donde la escala de barrio es la mejor alternativa. El material utilizado para el almacenamiento tanques no es un factor destacado. Sin embargo, definimos el almacenamiento del tanque con la ecuación (1).

$$NPV = \frac{SWt * WPt - Lt - MCt}{(1 + r)^t} \quad (1)$$

Donde:

SWt: ahorro de agua en el período t (m<sup>3</sup>).

WPt: precio del agua en t periodo (D / m<sup>3</sup>).

Lt: inversión necesaria en el periodo t (D).

MCt: mantenimiento y los costos de operación en el periodo t (D) (que también incluye la energía uso, detergente y agua).

n: tiempo de vida del sistema.

t: año del funcionamiento del sistema.

r: tasa de descuento.

El potencial de captación de aguas pluviales (en L / año) realizado por Farrenya *et al.* (2011), en techos se puede estimar basado en la precipitación local, el potencial de captación lo define la ecuación (2).

$$RWH = P * A * R \quad (2)$$

Dónde: (P, en mm / año), la cuenca zona (A, en m<sup>2</sup>) y el coeficiente de escorrentía (RC, adimensional).

Hyoungjun *et al.* (2012) desarrollaron un modelo probabilístico en donde se involucraban las diferentes variables en la captación de las aguas lluvias. Este modelo calcula la cantidad agua lluvia, la zona de captación, tanque de almacenamiento, contando con un sistema de recolección de agua. Este cálculo se basa en la ecuación de balance de agua.

La generación de modelos implica el desarrollo de ecuaciones de balance de masa para cada componente en la recolección de aguas pluviales (es decir, captación, tanque de almacenamiento y las instalaciones de infiltración). Se combinaron las ecuaciones de balance de masa y la densidad de probabilidad para la caracterización de la escorrentía aguas pluviales.

Cuando las precipitaciones superan la suma de la evaporación y el almacenamiento de retención, el escurrimiento suele referirse al volumen de las precipitaciones que cae sobre una superficie. Este se mide mediante la ecuación (3).

$$1 - \exp\left(-\alpha \frac{Q_{out} + Vt + Sc}{A}\right) \quad (3)$$

Donde:

Q<sub>out</sub>, t salida del tanque(L3).

Vt volumen del depósito (L3).

Q<sub>in</sub>, t flujo de entrada al depósito (L3).

Stb: almacena el agua de lluvia en el tanque antes de evento de lluvia (L3).

Q: necesaria cantidad de agua de lluvia para la demanda (L3).

Por tanto, la cantidad de escurrimiento de acuerdo con el rango de la precipitación en la zona de captación puede ser expresado por la ecuación (4).

$$\frac{\alpha}{A} \exp\left(-\alpha \frac{Q_{out} + Vt + Sc}{A}\right) \quad (4)$$

Monzur, Adballah, Aatur y Amimul (2011) presentan un estudio de caso de la evaluación del

depósito de agua de lluvia y el diseño de grandes áreas del techo, en Melbourne (Australia), basado en datos de precipitación diaria observados, con el propósito de desarrollar una herramienta de apoyo a las decisiones para el análisis de rendimiento y diseño de los tanques de agua de lluvia. En este estudio, se consideran dos tanques de almacenamiento de 185 m<sup>3</sup> y 110 m<sup>3</sup> subterráneos. El estudio establece la necesidad de optimización detallada y análisis financiero más exhaustivo.

Desarrollaron una ecuación para calcular el ahorro producido con la utilización del aprovechamiento de las aguas lluvias:

$$PV = \frac{St}{(1+i)^t} \quad (5)$$

Donde:

St: es el ahorro en un año 't', 'i' es la tasa de descuento o devolución.

Eroksuz y Aatur (2010) desarrollaron una ecuación que permite predecir cuál debe ser el ahorro, dependiendo de la demanda (ecuación (6)).

$$\log(W) = -6.309 + 0.779 \log(A) + 0.318 \log(T) + 2.078(R) \quad (6)$$

Donde:

W es un ahorro medio anual de agua en m<sup>3</sup>.

A es el área del techo en m<sup>2</sup>.

T es el tamaño del tanque de agua de lluvia en m<sup>3</sup>.

R es la precipitación media anual en mm.

La ecuación tiene un coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) = 96 %, con error estándar de estimación del 2 % de ahorro medio anual de agua. La ecuación es válida para Sídney, Newcastle y Wollongong, ciudades de Nueva Gales del Sur.

Kang y Hyun (2004) desarrollaron una metodología para el establecimiento de las relaciones probabilísticas entre la capacidad de almacenamiento y la velocidad de déficit de un sistema de aguas lluvias a la hora de considerar el cambio climático. Un edificio de cuatro pisos en una universidad fue seleccionado como caso de estudio. El escenario fue reducido a la zona de estudio con el SDSM (modelo de regionalización estadística)

y las distribuciones probabilísticas fueron seleccionados y modelada según los resultados de las pruebas de bondad de ajuste. Como resultado, se deriva un conjunto de curvas que describen las relaciones entre la capacidad de almacenamiento y la tasa de déficit. A partir de estas curvas, se determinó que la capacidad de almacenamiento de los RWHS estudiados podría reducirse debido al aumento de la precipitación media anual cuando se considera el impacto del cambio climático. Sin embargo, la consideración del cambio climático no puede ser importante para determinar la capacidad de almacenamiento de RWHS cuando se planifican los lugares que muestran suficientes precipitaciones durante todo el año. Este resultado puede ser útil para los ingenieros RWHS y tomadores de decisiones.

## RECOLECCIÓN Y ALMACENAMIENTO, TANQUES, BOMBEO Y GRAVEDAD

De acuerdo con el tipo de recolección de aguas lluvias se necesitará de la calidad de techos y de recipientes para almacenarla. Farreny *et al.* (2011) establecieron la calidad de los techos a la hora de recolectar aguas lluvias, integrando datos cuantitativos y cualitativos de las azoteas en una zona urbana. Cuatro tipos de techo se seleccionaron y muestrearon durante un periodo de dos años; tres tipos de techo inclinado: techos de tejas de barro; láminas de metal, policarbonato y plástico, y una azotea plana de grava. Se estableció un modelo para la estimación del volumen de escorrentía y la captación inicial de cada techo para evaluar la contaminación fisicoquímica de la escorrentía del techo. Los parámetros de calidad muestreados indicaron que el agua no se contaminaba con ningún techo en específico.

En cuanto a modelación probabilística de agua lluvia, Hyoungjun *et al.* (2012) desarrollaron un modelo probabilístico en donde se involucraban las diferentes variables en la captación de las aguas lluvias. Este modelo calcula la cantidad de agua lluvia, la zona de captación, tanque de

almacenamiento, mediante un sistema de recolección de agua, este cálculo se basa en la ecuación de balance de agua. La generación de modelos implica el desarrollo de ecuaciones de balance de masa para cada componente en la recolección de aguas pluviales (es decir, captación, tanque de almacenamiento y las instalaciones de infiltración). Se combinaron las ecuaciones de balance de masa y la densidad de probabilidad para la caracterización de la escorrentía de aguas pluviales.

El trabajo de Monzur *et al.* (2011) muestra un estudio de caso de la evaluación del depósito de agua de lluvia y el diseño de grandes áreas del techo, que se encuentra en Melbourne, Australia, basado en datos de precipitación diaria observados. Con el objetivo de desarrollar una herramienta de apoyo a las decisiones para el análisis de rendimiento y diseño de los tanques de agua de lluvia. En este estudio, se consideraron dos tanques de almacenamiento de 185 m<sup>3</sup> y 110 m<sup>3</sup> subterráneos. Utilizando el modelo desarrollado, el estudio establece la necesidad de optimización detallada y análisis financiero más exhaustivo.

En cuanto al cálculo de las precipitaciones de los diferentes sectores, Muna y Han (2011) establecieron los principales parámetros de diseño en la captación de aguas pluviales; estos son: precipitaciones, área de influencia, eficacia de recolección, volumen del tanque y demanda de agua. El análisis de sensibilidad en la captación de aguas lluvias fue muy bien recibido en Seúl (Corea del Sur), ya que posibilita esta alternativa como una de las más factibles para superar el déficit de agua en épocas de sequía.

Uno de los análisis más utilizados es el aprovechamiento de aguas lluvias es el estudio de modelación matemática costo/beneficio. Farrenya *et al.* (2011), en España, analizaron la relación costo/eficacia de varios sistemas de recolección de aguas lluvias en entornos urbanos. La investigación se basa en un estudio de caso en un barrio de viviendas sociales (600 habitantes/ha) con edificios de varios pisos. El barrio se encuentra en Granollers, ciudad con un clima mediterráneo (precipitación

media de 650 mm/año). Cuatro estrategias se definieron para realizar el estudio: a) construcción/escala de barrio y adaptar la acción frente a la nueva construcción; b) escenarios de precios del agua (los precios actuales del agua y el futuro aumento de los precios del agua); c) la relación costo/eficacia de estas estrategias, los sistemas de transporte, almacenamiento y distribución de agua de lluvia necesarias, y d) los términos económicos a través del *valor actual neto* dentro de un enfoque *costeo del ciclo de vida*.

En lo relacionado con el aprovechamiento de aguas lluvias en hogares familiares, Rahmana *et al.* (2011) investigaron sobre el potencial de ahorro de agua de los tanques de agua de lluvia instalados en viviendas unifamiliares en 10 lugares diferentes en Greater Sydney (Australia). Desarrollaron una simulación de balance de agua donde observaron la confiabilidad de este sistema, examinando tres tipos de tanque. Se encontró que el promedio anual de ahorro de agua en los tanques está fuertemente relacionado con la precipitación promedio anual. Los resultados de este estudio sugieren que las autoridades gubernamentales en Sídney deben mantener o, posiblemente, incentivar a la población para la máxima construcción de estos sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias.

Aprovechando el agua lluvia, Ballén *et al.* (2006) determinaron la factibilidad de utilizar el agua lluvia como fuente de abastecimiento para el consumo humano, esto si se cuenta con un adecuado tratamiento que potabilice el recurso. Para nuestro caso es importante cómo se puede aprovechar el agua lluvia sin tener que tratarla con productos químicos como los utilizados para el consumo humano, sino como fuente para cubrir la demanda generada por los usos que no requieren agua potable para su desarrollo (riego de jardines y plantas, lavado de autos, descarga de inodoros, aseo de pisos y lavado de ropa).

En Colombia es necesario tecnificar la aplicación de los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias, esto debido a que la mayoría de las aplicaciones realizadas son de tipo empírico sin un

diseño previo que corresponda a las características ambientales de la región y a las necesidades de los usuarios, ya que del adecuado diseño y mantenimiento del sistema depende la calidad y cantidad del agua suministrada.

En cuanto a la optimización de estructuras para el aprovechamiento de agua lluvia, López *et al.* (2009) presentaron una investigación sobre la arquitectura que debe tener un sistema para la recolección de aguas lluvias por medio de fachadas cerradas denominadas *culatas*, específicamente en el Valle de Aburrá (Colombia), para uso doméstico de no consumo, especialmente para la descarga de aparatos sanitarios. De esta manera se obtienen múltiples beneficios: a) ahorro de agua; b) ingresos por publicidad; c) regulación microclimática de la vivienda con la ayuda de los dispositivos que reflejan el sol y crean una cámara de aire entre el exterior y el interior, y d) recolección y uso de aguas lluvias. En la región de Santander (Colombia), Barragán y González (2012) plantearon el uso de aguas lluvias como alternativa a la situación de escasez y así aumentar la oferta de agua potable en el municipio de Barichara, teniendo en cuenta que la captación de agua pluvial constituye una opción viable, ecológica y económica para enfrentar, a corto plazo, el problema por su fácil implementación. Se dimensionaron tanques de almacenamiento óptimos partiendo de los análisis de superficies de captación y de estudios realizados a partir de la serie de precipitaciones diarias de veinte años, tomadas de la estación pluviométrica Santa Isabel (Ideam) ubicada en el municipio.

Los materiales de cubiertas son importantes en el diseño de una cuenca de captación. Mendez *et al.* (2011) examinaron el efecto de estos para techos convencionales sobre la calidad del agua de lluvia recolectada. Los resultados de escala piloto y los techos a gran escala demostraron que el agua de lluvia recolectada de cualquiera de estos materiales para techos requeriría tratamiento, si fuera para consumo humano, de filtración y desinfección. Los techos de metal se recomiendan comúnmente para aplicaciones de agua de lluvia y

este estudio mostró que los sistemas con techos de metal tienden a tener concentraciones más bajas de bacterias indicadoras de las heces, en comparación con otros materiales para techos. Sin embargo, baldosas de hormigón y techos frescos poseen una situación similar a la de los techos de metal, lo que indica que estos materiales son también adecuados para aplicaciones de agua de lluvia. Las concentraciones de algunos metales (por ejemplo, el arsénico) en el agua de lluvia del techo verde indican que la calidad de los sustratos comerciales debe examinarse cuidadosamente si el agua de lluvia recolectada está siendo considerada para el uso doméstico.

La calidad del agua es de vital importancia. Mendez *et al.* (2011) hicieron un estudio sobre diferentes techos en la captación de aguas lluvias y detallaron la calidad del agua en cada uno de estos. Integraron datos cuantitativos y cualitativos de la azotea sobre escorrentía de aguas pluviales en un ambiente mediterráneo de clima urbano, con el objetivo de proporcionar criterios para la selección del techo y así maximizar la disponibilidad y calidad del agua de lluvia. Se seleccionaron y monitorearon cuatro techos durante un periodo de dos años (2008-2010); tres techos inclinados elaborados con tejas de barro, hoja de metal y plástico de policarbonato, y otro de grava plana. Se observaron grandes diferencias en el coeficiente de escurrimiento (RC), dependiendo sobre todo de la pendiente y la rugosidad de la cubierta. Los techos inclinados lisos ( $RC > 0,90$ ) captaron aproximadamente el 50 % más de agua de lluvia que los techos en bruto planas ( $RC = 0,62$ ). La inclusión de criterios relacionados con la pendiente y la rugosidad en la planificación de la ciudad del techo puede ser útil para promover el agua de lluvia como un suministro de agua alternativo, para la prevención de inundaciones y la escasez de agua.

En una institución educativa del municipio de Caldas (Antioquia), se propuso un diseño de un sistema de aprovechamiento de agua lluvia como alternativa para el ahorro de agua potable en sanitarios y lavado de aguas comunes (Palacios, 2010).

La Universidad Industrial de Santander diseñó un sistema de mejora al aprovechamiento del agua lluvia, para utilizarlo en un sistema de riego por aspersión (Pérez y Sanabria, 2012).

Se necesitan herramientas para la optimización del diseño de los tanques de agua de lluvia. Para esto, Monzur *et al.* (2011) desarrollaron, a través de datos, la confiabilidad de cada sistema de captación de aguas lluvias para la toma de decisiones relevantes a la hora de implementar los tamaños de los tanques. Los máximos alcanzables para los diferentes programas de acción regionales razonables en diferentes condiciones climáticas se presentan para todos los lugares seleccionados en este estudio. Un modelo de balance hídrico diario se utilizó para el análisis de rendimiento y optimización del diseño de los tanques de agua de lluvia en cuatro regiones diferentes de Melbourne, norte, centro, sureste y suroeste.

## **CALIDAD DEL AGUA RECOLECTADA, PARTÍCULAS Y MICROORGANISMOS**

Se ha encontrado que la concentración de contaminantes presentes en las aguas de escorrentía urbana depende también de depósitos atmosféricos en tiempo seco y en tiempos de lluvia (Gromaire *et al.*, 1999; Schueler y Holland, 2000; Gobel, Dierkes y Coldewey, 2007). Adicionalmente, Rodríguez, García y Pardo (2015) muestran cómo la composición típica de agua residual necesita de un grado alto de tratamiento para cumplir con las normatividades, basados en atributos de las cualidades y propiedades del agua y teniendo en cuenta el impacto del entorno en el medio ambiente, como olores e impactos estéticos. Esto le brinda mayor importancia al aprovechamiento de agua lluvia para que no llegue a mezclarse con las aguas contaminadas y así incrementar su volumen.

Georgios *et al.* (2012) investigaron sobre la calidad del agua con seis casos de estudio a escala piloto de recolección de agua de lluvia, donde se instalaron en cinco casas urbanas, suburbanas y rurales, y en un campus universitario. Los sistemas

consisten en canales horizontales para recoger las aguas lluvias y tanques de almacenamiento de plástico. También se proporcionaron dispositivos para eliminar el agua del primer lavado. En el agua de lluvia recolectada la calidad se encontró satisfactoria sobre sus parámetros fisicoquímicos, pero no en cuanto a su calidad sanitaria. Por consiguiente, los sistemas de recolección de agua de lluvia en esta zona solo podían abastecer de agua apropiado para utilizar como aguas grises.

Los parámetros para medir la calidad de aguas lluvias en las áreas urbanas son: turbiedad, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno y metales pesados presentes en el agua. Estos últimos, presentes en las aguas lluvias de escorrentía, dependen de las partículas de polvo en la atmosfera provenientes de actividades industriales y semiindustriales de las zonas urbanas y de la corrosión que se dan en las superficies de tejados. Los parámetros varían de acuerdo a: cadmio (Cd), de 0,1 a 32 microgramos por litro; cobre (Cu), de 3 a 247 microgramos por litro; plomo (Pb), de 16 a 276 microgramos por litro; zinc (Zn), de 802 a 3806 microgramos por litro (Gobel, Dierkes y Coldewey, 2007). Los sólidos suspendidos totales (SST) varían entre 3 y 304 mg<sup>-1</sup>. Los valores bajos de pH varían entre 4,7 y 6,8 (Gobel, Dierkes y Coldewey, 2007). La demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días (DBO5) se encuentra entre 1 mg<sup>-1</sup> y 27 mg<sup>-1</sup> (Gromaire- Mertz Gromaire, 2007).

En un muestreo realizado en el barrio Kennedy de Bogotá y el municipio de Soacha, en donde varias comunidades que habitan en sectores periféricos sufren de condiciones precarias y limitadas de abastecimiento, que recolectan y utilizan aguas lluvias para diferentes usos domésticos, se encontró que el agua estudiada no es apta para ninguno de los usos que se les están dando actualmente, debido a los altos valores de turbiedad y altas concentraciones en metales pesados (Torres *et al.*, 2011). En un muestreo realizado en Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá, utilizando nueve puntos repartidos dentro del campus, denominados *puntos de muestreo*, se encontró que el

agua de escorrentía no era apta para ninguno de los usos inicialmente considerados, como lavado de fachadas y pisos, riego de jardines y vaciado de inodoros, debido a las altas concentraciones encontradas de metales pesados, sólidos suspendidos totales (SST) y su grado de contaminación (DBO%) además de la turbiedad presentada (Torres *et al.*, 2011). Otra experiencia de estudio realizada en un campo universitario es el de la Universidad Nacional, sede Bogotá, en el Edificio de Posgrados de Ciencias Humanas, donde mediante una cubierta de techo revestida con grava, almacenando en un tanque subterráneo y por medio de bombeo se utiliza para descarga de inodoros y alimentar las fuentes y los espejos de agua (Ballén *et al.*, 2006). También se ha determinado cómo el agua lluvia afecta los recursos hídricos cuando transportan elementos metálicos por las corrientes y los diferentes contaminantes del suelo, aumentando así la contaminación de elementos pesados en las fuentes hídricas en Bogotá (Zafra, Peña y Álvarez, 2013).

## APROVECHAMIENTO DE AGUA DE LLUVIA EN AEROPUERTOS

Los aeropuertos consumen una gran cantidad de agua en el desarrollo de sus operaciones rutinarias y en el mantenimiento de sus infraestructuras. Estas disponen, en general, de una importante área de techos que son susceptibles de ser utilizadas para la recolección de agua lluvia y sistemas de reutilización. La eficiencia y posibilidad de estos sistemas han sido estudiadas por diversos autores. Domenech *et al.* (2011); Jones *et al.* (2010); Li *et al.* (2010); Méndez *et al.* (2011), han descrito que dicha posibilidad depende en gran medida de la calidad del agua recolectada, que a su vez depende de las condiciones atmosféricas de la región, la presencia o ausencia de árboles y aves, y las superficies en las cuales se recibe y recolecta. El agua lluvia está sujeta a contaminación ocasionada por microorganismos y sustancias químicas. Para ser aprovechada debe ser tratada con anterioridad. El

nivel y cobertura de tratamiento depende de la intensidad de uso, potable o no, y de las condiciones de las superficies de recolección (Helmreich y Horn, 2009).

Los 1318 aeropuertos estudiados en 157 países en el año 2010 contribuyeron como estructura a movilizar 5 billones de pasajeros, con un incremento del 6,6 % con respecto al año anterior. Estas infraestructuras demandan una gran cantidad de agua para sus operaciones rutinarias, que puede ser comparada con las de una ciudad de tamaño medio. El aeropuerto de Heathrow, en Londres, consume el agua equivalente a una ciudad de 34.000 habitantes. El aeropuerto de Atlanta, Hartsfield-Jackson, consume la misma cantidad de agua de una ciudad de 15.000 habitantes. El de Charles de Gaulle, en París, el de una ciudad de 31.000 habitantes. En Brasil, los 20 principales aeropuertos consumen el 90 % del agua potable de la oferta, 4,8 millones de metros cúbicos en el año 2010, en actividades como aire acondicionado, irrigación de pistas, lavado de áreas pavimentadas, control de incendios y sanitarios, actividades que no requieren de agua potable. Todas estas instalaciones cuentan con enormes áreas de techo susceptibles de ser utilizadas para la recolección de agua de lluvia y control de presencia de aves y administración de vegetación de altura, lo que minimiza los riesgos de contaminación microbiana del agua (Moreira *et al.*, 2012). Estudios de posibilidad y viabilidad han sido desarrollados en estos ambientes por autores como Eroksuz y Aatur (2010); Guisi *et al.* (2009); Jones *et al.* (2010); Li *et al.* (2010) y Aatur y Keane (2011). Domenech *et al.* (2011) establecen que la viabilidad de la utilización del agua lluvia en aeropuertos depende de los usos finales, generalmente para unos cuantos propósitos específicos. El objetivo de este estudio fue investigar el consumo de agua en un aeropuerto de tamaño medio en Brasil, para determinar la demanda de agua potable y evaluar el potencial ahorro de agua de tanques de agua de lluvia mediante el análisis de la simulación (balance de agua).

## CONCLUSIONES

La investigación sobre el diseño y la implementación de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias es un campo que está cobrando relevancia e importancia, pasando de los sistemas artesanales locales como esfuerzos aislados a desarrollos tecnológicos económicamente viables y técnicamente eficientes, que se ajustan a las condiciones físicas del entorno, del ambiente, económicas de la población, entre otras. El desarrollo de la investigación surge de la necesidad de generar una cultura de manejo responsable del agua, como una parte de la problemática que involucra todos los aspectos del manejo del recurso. En este artículo se recopilan algunos de los estudios realizados con la óptica global para recalcar la necesidad mundial actual, siendo una actividad que puede ser realizada en múltiples ambientes y circunstancias.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Appan, A. (1999). A dual-mode system for harnessing roofwater for non-potable uses. *Urban Water*, 1, 317-321.
- Aatur, R., Keane, J., & Monzur, A. I. (2012). Rainwater harvesting in Greater Sydney: Water savings, reliability and economic benefits. *Resources, Conservation and Recycling*, 61, 16-21.
- Ballén, J. A; Galarza, M. A., & Ortiz, R. O. (2006). Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia. Simposio llevado a cabo en el VI Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Água (SEREA), Joao Pessoa, Brasil.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (2003). *Especificaciones técnicas captación de agua de lluvia para consumo humano*. Lima, Perú: Organización Panamericana de la Salud.
- Chiu, Y. R.; Liaw, C. H., & Cheng L. C. (2009). Optimizing rainwater harvesting systems as an innovative approach to saving energy in hilly communities. *Renewable Energy*, 34, 492-498.



- Domenech, L., & Saurí, D. (2011). A comparative appraisal of the use of rainwater harvesting in single and multi-family buildings of the Metropolitan Area of Barcelona (Spain): social experience, drinking water savings and economic costs. *Journal of Cleaner Production*, 19, 598-608.
- Eroksuz, E., & Aatur, R. (2010). Rainwater tanks in multi-unit buildings: A case study for three Australian cities. *Resources, Conservation and Recycling*, 54, 1449-1452.
- Farreny, R., Morales-Pinzón, T., Guisasola, A., Taya, C., Rieradevall, J., & Gabarrell, X. (2011). Roof selection for rainwater harvesting: Quantity and quality assessments in Spain. *Water Research*, 45, 3245-3254.
- Farrenya, R., Gabarrell, X., & Rieradevall, J. (2011). Cost-efficiency of rainwater harvesting strategies in dense Mediterranean neighbourhoods. *Resources, Conservation, and Recycling*, 55, 689-694.
- Fewkes, A. (2000). Modelling the performance of rainwater collection systems: towards a generalized approach. *Urban Water*, 1, 323-333.
- Fewster, P. F. (2004). Advances in the structural characterisation of semiconductor crystals by X-ray scattering methods. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 48-49, 245-273.
- Gikas, G. D., & Tsihrintzis, V. A. (2012). Assessment of water quality of first-flush roof runoff and harvested rainwater. *Journal of Hydrology*, 466-467, 115-126.
- Göbel, P., Dierkes, C., & Coldewey, W. G. (2007). Storm water runoff concentration matrix for urban areas. *Journal of Contaminant Hydrology*, 91, 26-42.
- Goel, A. K., & Kumar, R. (2005). Economic analysis of water harvesting in a mountainous watershed in India. *Agricultural Water Management*, 71, 257-266.
- Gromaire-Mertz, M. C., Garnaud, S., González, A., & Chebbo, G. (1999). Characterization of urban runoff pollution in Paris. *Water Science and Technology*, 39, 1-8.
- Handia, L., Tembo J. M., & Mwiindwa, C. (2003). Potential of Rainwater harvesting in urban Zambia. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28, 893-896.
- Hatt, B. E., Deletic, A. & Fletcher, T. D. (2006). Integrated treatment and recycling of stormwater: a review of Australian practice. *Journal of Environmental Management*, 79, 102-113.
- Helmreich, B., & Horn, H. (2009). Opportunities in rainwater harvesting. *Desalination*, 248, 118-124.
- Hyoungjun K., Mooyoung H., & Ju Y. L. (2012). The application of an analytical probabilistic model for estimating the rainfall-runoff reductions achieved using a rainwater harvesting system. *Science of the Total Environment*, 424, 213-218.
- Jones, M. P., & Hunt, W. F. (2010). Performance of rainwater harvesting systems in the south eastern United States. *Resources, Conservation and Recycling*, 54, 623-629.
- Kahinda, J. M., Taigbenu, A. E., & Borot, R. J. (2007). Domestic Rainwater harvesting to improve water supply in rural South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, 32, 1050-1057.
- Li, X. Y., & Gong, J. D. (2002). Compacted microcatchments with local earth materials for rainwater harvesting in the semiarid region of China. *Journal of Hydrology*, 257, 134-144.
- Li, Z., Boyle F., & Reynolds, A. (2010). Rainwater harvesting and greywater treatment systems for domestic application in Ireland. *Desalination*, 260, 1-8.
- Méndez, C. B., Klenzendorf, J. B., Afshar, B. R., Simmons, M. T., Barrett, M. E., Kinny, K. A., & Kirisits, M. J. (2011). The effect of roofing material on the quality of harvested Rainwater. *Water Research*, 45, 5, 2049-2059.
- Mitchell, V. G., McCarthy, D. T., Deletic, A., & Fletcher, T. D. (2008). Urban stormwater harvesting- sensitivity of a storage behaviour model. *Environmental Modelling & Software*, 23, 6, 782-793.
- Monzur, A. I., Abdallah, S., Aatur, R., & Amimul, A. (2011). Optimisation of rainwater tank design from large roofs: A case study in Melbourne, Australia. *Resources, Conservation and Recycling*, 55, 1022-1029.
- Morales-Pinzón, T., Lurueña, R., Rieradevall, J., Gasol, C. M., & Gabarrell, X. (2012). Financial feasibility and environmental analysis of potential rainwater

- harvesting systems: A case study in Spain. *Resources, Conservation and Recycling*, 69, 130-140.
- Moreira, R. F., Carvalho, I. C., Calijuri, M. L., & Santiago, A. F. (2012) Rainwater treatment in airports using slow sand filtration followed by chlorination: Efficiency and costs. *Resources, Conservation and Recycling*, 65, 124-129.
- Moreira, R. F., Carvalho, I. C., Calijuri, M. L., & Santiago, A. F. (2012). Rainwater use in airports: A case study in Brazil. *Resources, Conservation and Recycling*, 68, 36-43.
- Palacio-Castañeda, N. (2010). *Propuesta de un sistema de aprovechamiento de agua lluvia, como alternativa para el ahorro de agua potable, en la institución María Auxiliadora de Caldas*. Trabajo de Monografía para optar al título de Especialista en Manejo y Gestión del Agua. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- Pandey, P. K., Panda, S. N., & Panigrahi, B. (2006). Sizing on-farm reservoirs for crop-fish integration in rain-fed farming systems in Eastern India. *Biosystems Engineering*, 93, 475-489.
- Sazakli, E., Alexopoulos, A., Leotsinidis, M. (2007). Rainwater harvesting, quality assessment and utilization in Kefalonia Island, Greece. *Water Research*, 41, 2039-2047.
- Schueler, T. y Holland, H. (2000). *Is Rooftop Runoff Really Clean? The Practice of Watershed Protection*. Ellicott City, MD (EE. UU.): Center for Watershed Protection.
- Song, J., Han, M., Kim, T., & Song, J. (2009). Rainwater harvesting as a sustainable water supply option in Banda Aceh. *Desalination*, 248, 233-240.
- Sturm, M., Zimmermann, M., Schütz, K., Urban, W., & Harfung, H. (2009). Rainwater harvesting as an alternative water resource in rural sites in central northern Namibia. *Physics and Chemistry of the Earth*, 34, 776-785.
- Villarreal, E. L., & Dixon, A. (2005). Analysis of a rainwater collection system for domestic water supply in Ringdansen, Norrköping, Sweden. *Building and Environment*, 40, 1174-1184.
- Tam, V. W. Y., Tam, L. & Zeng, S. X. (2010). Cost effectiveness and tradeoff on the use of rainwater tank: An empirical study in Australian residential decision-making. *Resources, Conservation and Recycling*, 54, 178-186.





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 Copernicus (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 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)